UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE MECÁNICA

"ANÁLISIS DE PROPIEDADES TERMOFÍSICAS EN PANELES EXPERIMENTALES CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) Y SU EFECTO SOBRE EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA (TES)."

Trabajo de titulación, modalidad proyecto experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Autor: Toaza Hoyos Joe Sebastian

Tutor: Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg.

AMBATO – ECUADOR

2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Proyecto Experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **"ANÁLISIS DE PROPIEDADES TERMOFÍSICAS EN PANELES EXPERIMENTALES CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) Y SU EFECTO SOBRE EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA (TES)."**, elaborado por el Sr. Joe Sebastian Toaza Hoyos, portador de la cedula de ciudadanía: 1805274634, estudiante de la Carrera de Mecánica, de la Facultade de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo de titulación, bajo la modalidad experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Está concluido en su totalidad.

Ambato, diciembre 2025



.....

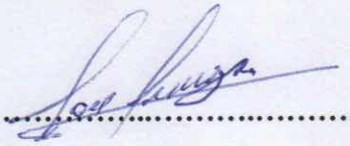
Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Joe Sebastian Toaza Hoyos, con C.C: 1805274634, declaro que todas las contenidos y actividades expuestos en el desarrollo del presente Trabajo de Titulación, modalidad proyecto experimental con el tema: **"ANÁLISIS DE PROPIEDADES TERMOFÍSICAS EN PANELES EXPERIMENTALES CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) Y SU EFECTO SOBRE EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA (TES).",** así como sus análisis, parámetros, criterios, tablas, gráficas, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto experimental, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo. En la virtud, el contenido, efectos legales y académicos que se desprenden del mismo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, diciembre 2025



.....

Joe Sebastian Toaza Hoyos

C.C.: 1805274634

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta, y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, diciembre 2025

.....

Toaza Hoyos Joe Sebastian

C.C.: 1805274634

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante **Joe Sebastian Toaza Hoyos** de la Carrera de Mecánica bajo el tema: **"ANÁLISIS DE PROPIEDADES TERMOFÍSICAS EN PANELES EXPERIMENTALES CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) Y SU EFECTO SOBRE EL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA (TES).", modalidad proyecto experimental.**

Ambato, diciembre 2025

Para constancia firman:

.....	.....
Ing. Luis Eduardo Escobar Luna	Ing. Jorge Enriquez López Velástegui, Mg.
MIEMBRO CALIFICADOR	**MIEMBRO CALIFICADOR**

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, por su esfuerzo constante, por su apoyo incondicional y por acompañarme en cada etapa de este proceso académico y personal. Su dedicación y confianza en mí han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A mi hermano, por su apoyo y por estar presente, de una u otra forma, a lo largo de mi formación.

A mi tía y a mi abuela, por su presencia constante en mi vida, por las palabras oportunas y por formar parte esencial de mi entorno familiar.

A toda mi familia, por acompañarme de diferentes maneras, directa o indirectamente, en la construcción de este objetivo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi tutor, Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, por su guía y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo. A los docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica, por compartir sus conocimientos y por su aporte en mi formación profesional. A mis compañeros y amigos, por su apoyo y colaboración a lo largo de esta etapa.

A mi familia, por estar siempre presente. En especial a mis padres, por su esfuerzo constante, por confiar en mí incluso en los momentos más difíciles, y por brindarme las herramientas, el ánimo y los valores que han sido clave para alcanzar esta meta. A mi hermano, y a mi tía y a mi abuela, por su compañía cercana y su influencia positiva en mi vida.

A la institución, por brindar los recursos, el espacio y las condiciones necesarias para la ejecución de este proyecto.

A todos quienes, directa o indirectamente, contribuyeron a la realización de este trabajo, les expreso mi sincero agradecimiento.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

PORTADA……...……i
APROBACIÓN DEL TUTOR....ii
AUTORIA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii
DERECHOS DE AUTOR iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO v
DEDICATORIA vi
AGRADECIMIENTO vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO....viii
ÍNDICE DE TABLAS xii
ÍNDICE DE FIGURAS....xiii
RESUMEN EJECUTIVO....xvii
ABSTRACT....xviii
CAPÍTULO I....1
MARCO TEÓRICO....1
1.1 Antecedentes investigativos....1
1.1.1 Materiales con cambio de fase....1
1.1.2 Propiedades de los PCM....2
1.1.3 Almacenamiento térmico....5
1.1.4 Aplicaciones de PCM....6
1.2 Planteamiento del problema....8
1.3 Justificación....9
1.4 Objetivos....10
1.4.1 Objetivo general....10
1.4.2 Objetivos específicos....10
1.5 Fundamentación teórica....10
1.5.1 PCM....11
1.5.2 Rangos de temperatura para la generación de energía de los PCM....15
1.5.3 Tipos de encapsulación PCM según el tamaño....16
1.5.4 Capacidad de almacenamiento térmico (TES)....17
1.5.5 Propiedades termofísicas de los PCM....18
1.5.6 Transferencia de calor en PCM....22
1.5.7 Distribución de temperatura....23
1.6 Hipótesis....24

1.7 Señalamiento de las variables de la hipótesis 24
1.7.1 Operacionalización de variables 24
CAPÍTULO II 25
METODOLOGÍA 25
2.1 Materiales para la elaboración de los paneles experimentales y encapsulados de PCM 25
2.2 Diseño experimental 27
2.3 Instrumentación 28
2.4 Calibración 28
2.5 Condiciones de ensayo 28
2.6 Ubicación 29
2.7 Métodos 29
2.7.1 Método cuantitativo 29
2.7.2 Método Comparativo 29
2.7.3 Método explicativo 29
2.7.4 Método bibliográfico 30
2.8 Criterios de selección de PCM 30
2.9 Características de los PCM seleccionados 30
2.10 Modelación de los encapsulamientos 31
2.11 Proceso del proyecto 34
2.12 Cálculos 35
2.12.1 Propiedades 37
2.12.2 Cálculos de Inercia térmica para los PCM 38
2.12.3 Cálculos de la tasa de transferencia de calor para los PCM encapsulados en cilindros de cristal, con los datos obtenidos en pruebas experimentales. 38
2.12.4 Comportamiento térmico del PCM encapsulado en cilindros de cristal: curvas de enfriamiento y termografías. 40
2.12.5 Cálculos de la tasa de transferencia de calor para los PCM encapsulados en placas rectangulares de cristal, con los datos obtenidos en pruebas experimentales. 46
2.12.6 Comportamiento térmico del PCM encapsulados en placas rectangulares de cristal: curvas de enfriamiento y termografías. 47
2.12.7 Cálculos para el PCM encapsulados en recipiente circular de plástico, con los datos obtenidos en pruebas experimentales. 54
2.12.8 Comportamiento térmico del PCM encapsulado en envase circular de plástico: curvas de enfriamiento y termografías. 55

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN 60
3.1 Análisis y discusión 60
3.1.1 Cálculos de incertidumbre 60
3.1.2 Discusión de resultados 61
3.1.2.1 Tasa de transferencia de calor de los materiales PCM 61
3.1.2.2 Comportamiento térmico 61
3.1.2.3 Liberación de energía y fracción líquida del PCM 62
3.1.2.4 Discusión crítica y comparación con estudios similares. 63
Comparación de inercia térmica entre PCM 64
Análisis comparativo de las curvas de enfriamiento 65
3.1.2.5 Validación de la hipótesis 67
CAPÍTULO IV 68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 68
4.1. Conclusiones 68
4.2. Recomendaciones 69
4.3. Bibliografía 69
ANEXOS 73
Anexo 1 73
Anexo 2 74
Anexo 3 75
Anexo 4 76
Anexo 5 77
Anexo 7 79
Anexo 8 80
Anexo 9 81
Anexo 10 82
Anexo 11 83
Anexo 12 84
Anexo 13 85
Anexo 14 86
Anexo 15 87
Anexo 16 88
Anexo 17 89
Anexo 18 90

Anexo 19 91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Ventajas y desventajas de PCM orgánicos e inorgánicos [4][6]. 14
Tabla II. Clasificación de PCM de acuerdo con su rango de temperatura [4][5]..... 15
Tabla III. Parametrización de variables. 24
Tabla IV. Cuadro de Operacionalización de Variables. 24
Tabla V. Listado de materiales usados para la elaboración y experimentación de los paneles. 25
Tabla VI Numero de probetas y ensayos. 27
Tabla VII Descripción de instrumentación. 28
Tabla VIII Resumen de la capacidad másica que soporta cada encapsulamiento. 33
Tabla IX Propiedades de los PCM seleccionados para las pruebas experimentales [4][8][12][13][17]. 37
Tabla X Cálculos de inercia térmica de los PCM. 38
Tabla XI Tabla de datos obtenidos a partir de la experimentación. 39
Tabla XII Resultados de los calores calculados en las diferentes etapas del PCM en pasar de su estado líquido ha sólido. 39
Tabla XIII Datos obtenidos a partir de la experimentación con los PCM encapsulados en placas rectangulares de cristal. 46
Tabla XIV Resultados de los calores calculados en las diferentes etapas del PCM en pasar de su estado líquido ha sólido. 47
Tabla XV Datos obtenidos a partir de la experimentación con los PCM encapsulados en placas rectangulares de cristal. 54
Tabla XVI Resultados cálculos de transferencia de calor en las diferentes etapas del PCM en pasar de su estado líquido ha sólido. 54
Tabla XVII Resultados de los calores calculados del PCM. 55
Tabla XVIII Cálculos de incertidumbre de temperatura. 60
Tabla XIX Resultados de la comparación de los distintos tipos de encapsulamiento usados en la experimentación. 61
Tabla XX Cuadro comparativo de la duración de la meseta térmica del PCM. 62
Tabla XXI Inercia térmica de la Parafina RT8 [14]. 64
Tabla XXII Inercia térmica de la parafina usada en la experimentación. 64

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Comportamiento térmico del PCM encapsulado: curvas de enfriamiento y termografías[1]. 2
Fig. 2 Esquema de absorción de calor de un PCM [1]. 2
Fig. 3 Calor latente vs conductividad térmica de PCM en fase solida [1]. 3
Fig. 4 Comparación de PCM [1]. 4
Fig. 5 Diagrama de calor almacenado vs temperatura [3]. 6
Fig. 6 Métodos asociados al uso de PCM [1]. 8
Fig. 7 Aplicaciones energéticas del almacenamiento térmico de PCM [1]. 8
Fig. 8 Clasificación de TES y PCM [4]. 11
Fig. 9 Ejemplo de PCM orgánico. 12
Fig. 10 Ejemplo de PCM inorgánico (cloruro de sodio). 13
Fig. 11 Categorización de diferentes métodos de incorporación de PCM en materiales de construcción y sus consideraciones técnicas asociadas [6]. 16
Fig. 12 Diferentes geometrías para encapsulación de PCM (a) esférica (b) tubular (c) cilíndrica y (d) rectangular [7]. 17
Fig. 13 Teoría del calor [11]. 23
Fig. 14 Modelación de encapsulamiento en un tubo de ensayo. 31
Fig. 15 Modelación de encapsulamiento en placas de vidrio. 32
Fig. 16 Modelación de encapsulamiento en envase circular de plástico. 32
Fig. 17 Diagrama de flujo para el proceso del proyecto experimental. 34
Fig. 18. Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos cilíndricos de la glicerina (Temperatura de fusión= 38-55 °C). ... 40
Fig. 19. Curva de enfriamiento del antes de la fase de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 55 °C) 40
Fig. 20. Curva de enfriamiento del después de la de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 38 °C) 41
Fig. 21. Termografías de la glicerina encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 98,4 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 55°C) 41
Fig. 22. Termografías de la glicerina encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 33,1 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 22,1 °C) 41

Fig. 23 Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos cilíndricos de la manteca vegetal (Temperatura de fusión= 30-40 °C) 42
Fig. 24. Curva de enfriamiento del PCM antes de la de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 40 °C) 42
Fig. 25. Curva de enfriamiento del PCM después de la de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 30 °C) 43
Fig. 26. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 71,1 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 51,6 °C) 43
Fig. 27. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 28,2 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 18,9 °C) 43
Fig. 28 Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos cilíndricos de la parafina (Temperatura de fusión= 46-68 °C). 44
Fig. 29 Curva de enfriamiento del PCM antes de la de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 68 °C). 44
Fig. 30 Curva de enfriamiento del PCM después de la de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 46 °C) 45
Fig. 31. Termografías de la parafina encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 79,5 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 70,9 °C) 45
Fig. 32. Termografías de la parafina encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 44,4 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 25,9 °C) 45
Fig. 33. Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos rectangulares de la glicerina (Temperatura de fusión= 38-55 °C). 48
Fig. 34. Curva de enfriamiento del PCM antes de la de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 55 °C) 48
Fig. 35. Curva de enfriamiento del PCM después de la fusión (Temperatura de fin de la fusión= 38 °C) 49
Fig. 36. Termografías de la glicerina encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 79.4 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 55,1 °C) 49
Fig. 37. Termografías de la glicerina encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 37,9 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 26,3 °C) 49

Fig. 38 Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos rectangulares de la manteca vegetal (Temperatura de fusión= 30-40 °C) 50
Fig. 39. Curva de enfriamiento del PCM antes la fusión (Temperatura de inicio de fusión= 40 °C) 50
Fig. 40. Curva de enfriamiento del PCM después la fusión (Temperatura de fin de la fusión= 30 °C) 51
Fig. 41. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 72,4 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 39,6 °C) 51
Fig. 42. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 31,6 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 20,1 °C) 51
Fig. 43. Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos rectangulares de la parafina (Temperatura de fusión= 46-68 °C). 52
Fig. 44. Curva de enfriamiento del PCM antes de la fase de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 68 °C). 52
Fig. 45. Curva de enfriamiento del PCM después de la fase de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 46 °C). 53
Fig. 46. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 74,3 °C) (Temperatura de inicio de fusión=70,7 °C) 53
Fig. 47. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 46,4 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 26,4 °C) 53
Fig. 48 Curva de enfriamiento del PCM antes de la fase de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 68 °C). 55
Fig. 49 Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos circulares de la parafina (Temperatura de fusión= 68-46 °C). 56
Fig. 50 Curva de enfriamiento del PCM después de la fase de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 46 °C). 56
Fig. 51 Termografías de la parafina encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 100 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 68,4 °C). 57
Fig. 52 Termografías de la parafina encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 44,4 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 25,9 °C). 57
Fig. 53 Curva de Liberación Energía de la parafina 58
Fig. 54 Curva de Fracción líquida de la parafina. 58

Fig. 55 Grafica de enfriamiento de la Parafina RT8 [14]. 65
Fig. 56 Grafica de enfriamiento de la Parafina usada en la experimentación..... 66

RESUMEN EJECUTIVO

El estudio se enfocó en analizar el comportamiento térmico de paneles experimentales con parafina encapsulada, con el fin de evaluar su aporte al almacenamiento y liberación de energía durante ciclos de calentamiento y enfriamiento. El material se calentó desde 100 °C en un ambiente de 23 °C, registrándose un rango de fusión entre 46 y 68 °C. Antes de iniciar el cambio de fase, la parafina se mantuvo estable durante unos 120 segundos; la etapa de fusión duró cerca de 360 segundos y el enfriamiento completo aproximadamente 1880 segundos, sumando un total de 2360 segundos por ciclo térmico.

El análisis de transferencia de calor mostró variaciones claras entre etapas: 46,52 W en estado líquido, 33,78 W durante la fusión y 1,08 W en estado sólido, lo que evidencia un aumento de la resistencia térmica conforme avanza la solidificación. Del mismo modo, los valores de calor fueron de 4,23 J en estado líquido, 7,6 J durante la fusión y 2,48 J en sólido, reflejando el aporte del calor latente y la meseta térmica observada en las mediciones.

En general, la parafina encapsulada demostró un desempeño favorable como medio de almacenamiento térmico, destacando su capacidad para estabilizar la temperatura y retardar las variaciones térmicas. Se recomienda continuar con estudios que incluyan mejoras en la conductividad y técnicas de encapsulado para optimizar su eficiencia en futuras aplicaciones.

PALABRAS CLAVE: PCM, ALMACENAMIENTO TÉRMICO, CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, EFICIENCIA ENERGÉTICA, CLIMATIZACIÓN PASIVA, TRANSFERENCIA DE CALOR, CALOR LATENTE, CAMBIO DE FASE, PANELES ENCAPSULADOS, COMPORTAMIENTO TÉRMICO.

ABSTRACT

The study focused on analyzing the thermal behavior of experimental panels with encapsulated paraffin, in order to evaluate their contribution to energy storage and release during heating and cooling cycles. The experimental work was carried out through charge and discharge cycles of PCM-based specimens, which were heated and then allowed to cool in order to analyze their behavior during heat release.

The material was cooled from 100 °C to an ambient temperature of 23 °C, with a melting range recorded between 46 and 68 °C. Prior to the phase change, the paraffin remained stable for approximately 120 seconds; the melting stage lasted around 360 seconds, and complete cooling took approximately 1,880 seconds, resulting in a total thermal cycle time of 2360 seconds.

The heat transfer analysis revealed variations across different stages: 46,52 W in the liquid state, 33.78 W during the melting process, and 1.08 W in the solid state, indicating an increase in thermal resistance as solidification progressed. Similarly, the heat values were 4.23 J in the liquid state, 7.6 J during melting, and 2.48 J in the solid state, reflecting the contribution of latent heat and the thermal plateau observed in the measurements.

Overall, the encapsulated paraffin demonstrated favorable performance as a thermal energy storage medium, highlighting its ability to stabilize temperature and delay thermal variations. Further studies are recommended to incorporate improvements in thermal conductivity and encapsulation techniques to optimize its efficiency for future applications.

KEYWORDS: PCM, THERMAL STORAGE, THERMAL CONDUCTIVITY, ENERGY EFFICIENCY, PASSIVE COOLING, HEAT TRANSFER, LATENT HEAT, PHASE CHANGE, ENCAPSULATED PANELS, THERMAL BEHAVIOR.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

Se han encontrado diferentes estudios acerca de los materiales con cambio de fase en el almacenamiento de energía, sus propiedades termo físicas y sus aplicaciones, lo que ha permitido tener un amplio conocimiento en cuanto a los tipos de PCM existente y sus características térmicas propias dependiendo del tipo de PCM que este sea, haciendo así que esta investigación sea de provecho para la experimentación.

1.1.1 Materiales con cambio de fase

El estudio de los PCM no es algo nuevo, pero se ha amplificado en los últimos años debido a que es una tecnología que permite almacenar y manejar la energía térmica almacenada en el mismo, esto debido a sus propiedades para de retener o liberar el calor. Durante este proceso de carga y descarga el PCM puede experimentar cambios en su masa o volumen. Los materiales con cambio de fase han despertado gran interés en el ámbito de la ingeniería por esta razón los estudios se han intensificado en los últimos años [1].

Indiferentemente del área en el que se ocupen estos materiales tiene la capacidad de almacenar calor latente, de cierta manera también es un amortiguador de cargas térmicas y en comparación con otras tecnologías el uso de estos es relativamente más económico [1].

Los PCM son materiales que pasan de un estado inicial sólido a un final líquido cuando se trata de un calentamiento y viceversa cuando el mismo se está enfriando, se sabe que siempre en la fase de fusión es donde más calor o energía se entrega por este motivo la fusión y la solidificación son procesos clave en el aprovechamiento térmico. En la figura 1 podemos observar un diagrama del cambio de fase del agua haciendo una transición de sólido a líquido. En la zona de fusión, se almacena una gran cantidad de energía térmica mediante calor latente. En cambio, en la figura 2 se mira un esquema simple de como el PCM recepta y libera el calor [1].

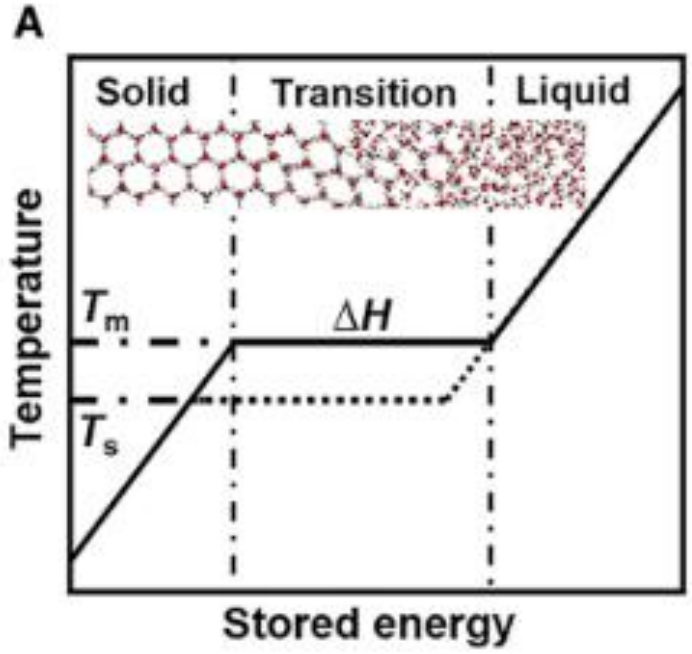


Fig. 1 Comportamiento térmico del PCM encapsulado: curvas de enfriamiento y termografías [1].

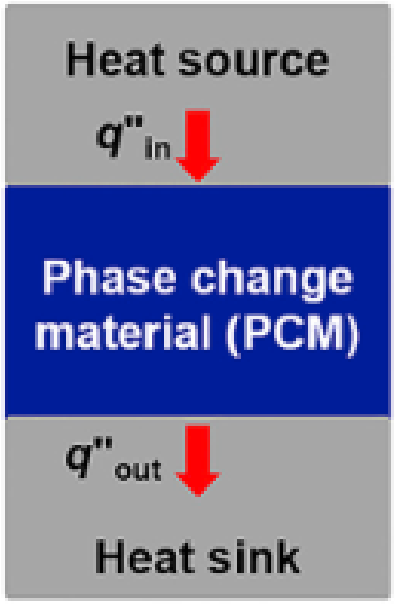


Fig. 2 Esquema de absorción de calor de un PCM [1].

1.1.2 Propiedades de los PCM

Dentro de los materiales con cambio de fase encontramos distintos tipos dependiendo su composición y origen, estos pueden ser orgánicos, hidratos, sales fundidas y aleaciones metálicas. Si hablamos almacenamiento de térmico una de sus propiedades más importante es la temperatura de fusión del material y su conductividad térmica.

La temperatura de fusión permite determinar el rango de efectividad del material, mientras que el calor latente nos permite estudiar la energía que se almacena para luego ser liberada. Por otro lado, la conductividad térmica se encarga de controlar la velocidad de carga o descarga del PCM [1].

Como podemos observar en la figura 4 se muestra un diagrama de calor latente vs conductividad térmica de distintos materiales sólidos. Los materiales metálicos poseen una temperatura de fusión superior a la de los materiales orgánicos, siendo así que estos sean los que posean una mejor capacidad volumétrica y conductividad térmica. Por esto los materiales metálicos son los más ideales para ser utilizados en aplicaciones que requieren temperaturas muy altas y un elevado flujo de calor [1].

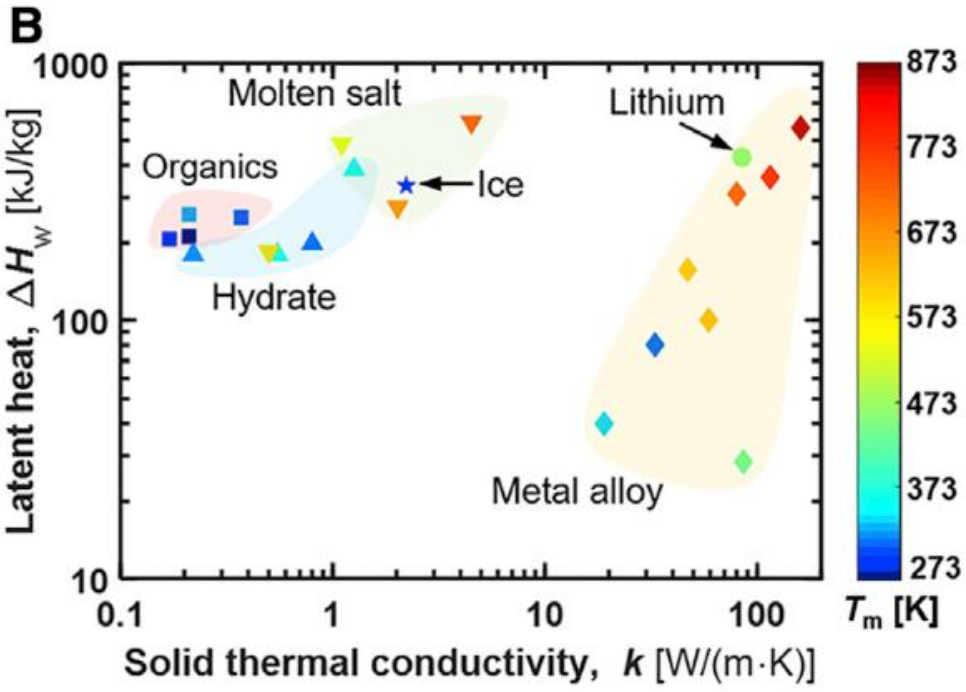


Fig. 3 Calor latente vs conductividad térmica de PCM en fase solida [1].

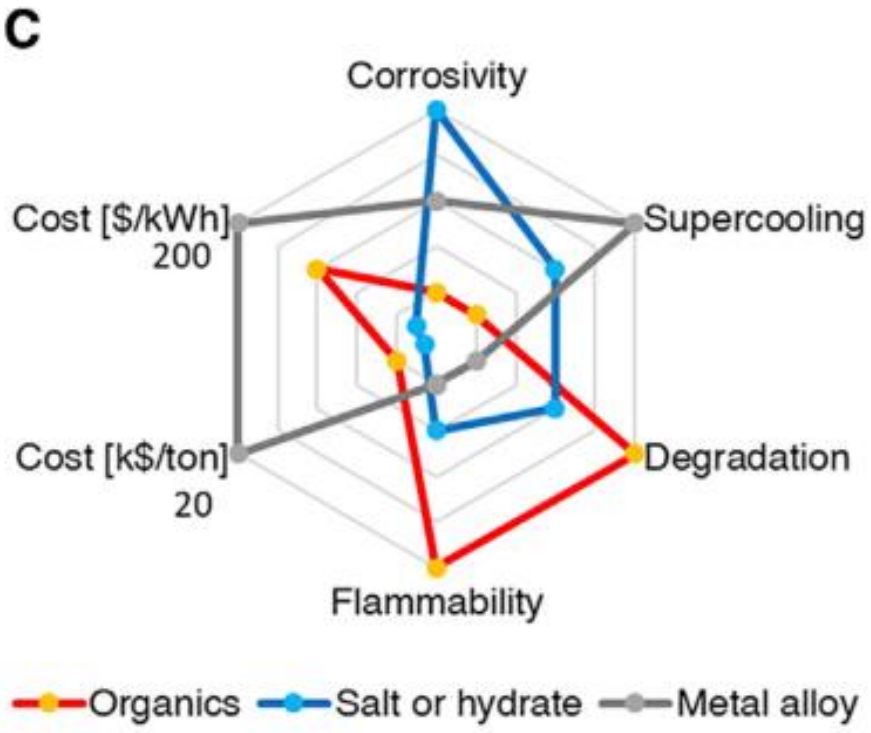


Fig. 4 Comparación de PCM [1].

El valor de un PCM es muy importante a la hora de hacer una selección, pero este depende mucho de las características y propiedades que posee el mismo, así como podemos observar en la Figura 5 se muestra una comparación entre diferentes tipos de compuestos. Los PCM orgánicos suelen presentar muy poco sobre enfriamiento, sin embargo, con el paso del tiempo pueden degradarse y además son materiales inflamables, lo que implica cierto riesgo al momento de estar expuestos a altas temperaturas. Por otro lado, las sales resultan más económicas, pero una desventaja es que pueden ser corrosivas. Debido a esto se añaden cierto tipo de compuestos para mejorar las propiedades de los PCM y así subiendo el costo de estos [1].

Los materiales metálicos son más estables térmicamente, su desventaja es que su precio es mucho más alto que materiales de origen orgánico y sales. Por esto es importante comprender las limitaciones, propiedades y características que cada PCM tiene para así poder optimizar el uso del material y hacer una selección adecuada a la utilización y condiciones a las que van a estar expuestos estos. Esto ha sido un reto en el campo del almacenamiento térmico, por lo tanto, se han buscado estrategias para reducir los costos de los materiales empleando mezclas de materiales [1].

1.1.3 Almacenamiento térmico

Los materiales con cambio de fase son una de las alternativas más convincentes a la hora de hablar de almacenamiento térmico. Estudios realizador previamente aseguran que alrededor de un 90% de la energía primaria de todo el mundo se pierde en forma de calor. Los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) permiten aprovechar esta energía almacenándola dentro de los PCM en forma de calor latente o sensible para luego ser usada en aplicaciones industriales o en la construcción ayudando al confort térmico y a la eficiencia energética de cualquier sistema TES [2].

Actualmente encontramos tres maneras distintas de almacenar la energía térmica:

- **Calor sensible:** se basa en la capacidad térmica específica de cada material, de esta forma almacena la energía y su temperatura sufre cambios con respecto al tiempo.
- **Calor latente:** cuando hablamos de calor latente hay que entender que este es un tipo de calor que sé que se da o se recibe cuando en este caso el PCM sufre un cambio en su estado físico.
- **Almacenamiento termoquímico:** este es aún más eficiente energéticamente que el almacenamiento de calor latente.

En la figura 6A expuesta a continuación se visualiza una gráfica de almacenamiento térmico $\left(\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^3}}\right)$ de distintos materiales en un rango de temperatura de -10 a 10 °C, demostrando así que los materiales de cambio de fase pueden almacenar entre 2,5 y 6 veces más energía que el agua. De igual forma, en la Figura 6B podemos ver una comparación en almacenamiento de calor termoquímico con un sistema de en lecho de roca. Aquí se aprecia que el material al estar expuesto a hidratación este puede liberar hasta 25 veces más energía que un sistema que capta la energía en forma de calor latente. Este proceso con materiales termoquímicos requiere temperaturas superiores de hasta 120 °C para que el hidrato de sal pueda deshidratarse. Por esto y por su alta capacidad de almacenamiento energético, los materiales termoquímicos representan una opción viable para el almacenamiento de energía térmica a largo plazo, incluso a escala estacional [3].

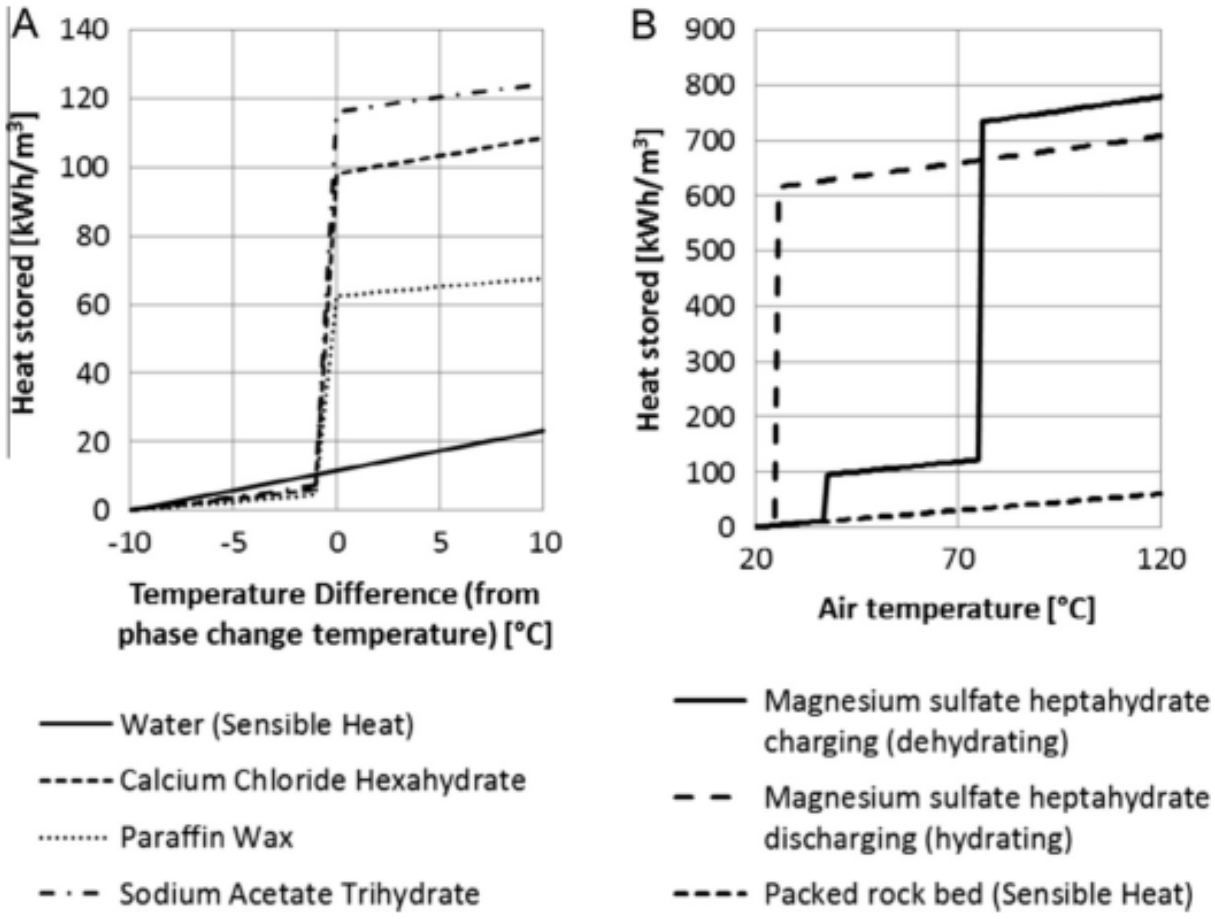


Fig. 5 Diagrama de calor almacenado vs temperatura [3].

De esta manera el almacenamiento de energía en forma de calor latente es muy utilizado en la industria para reducir perdidas de calor sensible durante ciclos de calentamiento y enfriamiento. Esta tecnología es muy utilizada en área de alimentos y bebidas y en procesos industriales de secado. Para que un sistema TES sea eficiente se necesita que los materiales con cambio de fase tengan un alto calor de fusión, ser estables al momento de fundirse y ser químicamente inertes en su recipiente donde se encuentre encapsulados. Un punto importante que se debe tener en cuenta al momento de tener un sistema de almacenamiento térmico es tratar de minimizar el subenfriamiento para aprovechar en toda su capacidad térmica al PCM, para mejorar esto se emplean distintas técnicas en las geometrías de sus encapsulamientos [3].

1.1.4 Aplicaciones de PCM

Los usos de los materiales con cambio de fase son muy amplios estos se relacionan con todos los campos de la energía, como:

- la energía solar
- la recuperación de calor en procesos industriales
- la regulación de picos en la demanda eléctrica
- usos en textiles
- medicina
- gas natural licuado
- agricultura en invernaderos
- edificaciones
- en el sector aeroespacial

Diversos investigadores alrededor del mundo han estudiado estos componentes y como implementarlos en la ingeniería y de esta manera encontrando materiales orgánicos, inorgánicos y eutécticas que favorezca a la aplicación que se vaya a dar a un sistema de almacenamiento térmico [4].

En el área de la construcción se ha dado un amplio uso como confort térmico siendo así el almacenamiento térmico pasivo de energía, mismo que es usado en paredes, techos, suelos y ventanas. La literatura señala que combinar pruebas experimentales a escala real con simulaciones numéricas es una alternativa sólida y efectiva de analizar el comportamiento térmico de estos sistemas. Además, diversos estudios coinciden en que la microencapsulación es el método de encapsulado que con mayor frecuencia se emplea en aplicaciones de refrigeración pasiva [4].

En consecuencia, los sistemas TES requirieren la participación de varios campos de la ingeniera, siendo una muy importante la ingeniería de materiales, el diseño de dispositivos y la integración de PCM dentro de un sistema energético especifico. Así como se observa en la figura 7 se muestra los distintos métodos de experimentación y análisis de un sistema TES dependiendo la escala o magnitud a la que se le quiere usar. Es de gran ayuda comprender la magnitud a la que se necesita aplicar el sistema de almacenamiento térmico para poder diseñarlo de la manera más efectiva y con una selección de PCM adecuada [1].

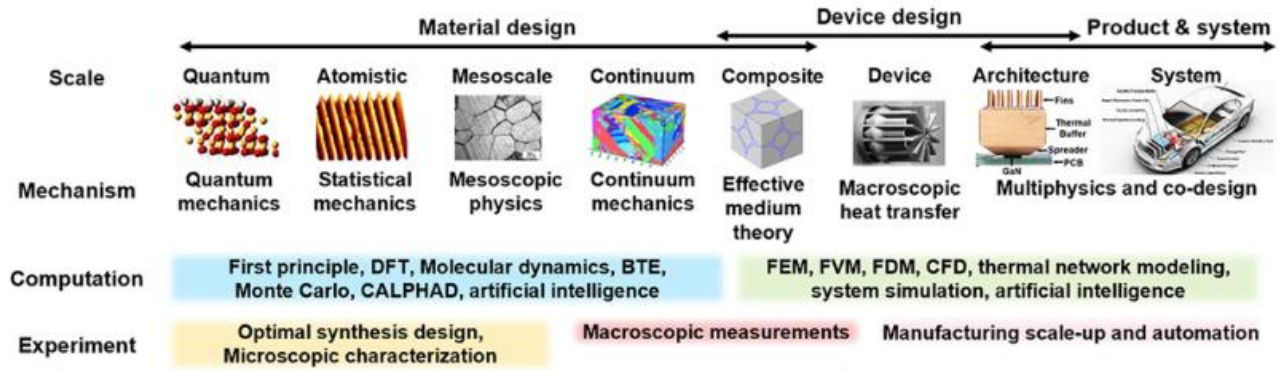


Fig. 6 Métodos asociados al uso de PCM [1].

Cabe destacar que el almacenamiento térmico con PCM tiene una gran variedad de usos actualmente, una de sus aplicaciones a pequeña escala son en dispositivos electrónicos mientras que una aplicación a gran escala es como ya se mencionó anteriormente en edificaciones, de tal forma que la figura 8 nos muestra rangos de potencia y temperatura para aplicaciones de almacenamiento térmico PCM, junto con los PCM correspondientes, donde se puede seleccionar el PCM adecuado para la temperatura y aplicación que va a tener el mismo [1].

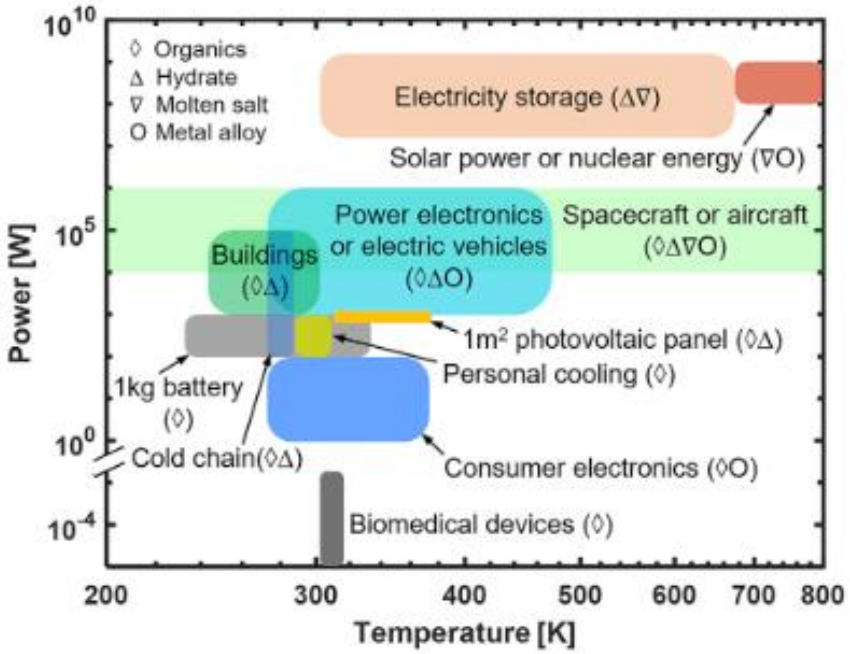


Fig. 7 Aplicaciones energéticas del almacenamiento térmico de PCM [1].

1.2 Planteamiento del problema

El aumento de la demanda energética a la par de la necesidad de mejorar la eficiencia energética ha llevado al desarrollo de sistema de energía térmica, de esta manera los materiales con cambio

de fase se presentan como una opción viable debido a sus capacidades de almacenar y liberar energía. Uno de los principales problemas a la hora de trabajar con materiales de cambio de fase es la selección de este y de sus características como la conductividad e inercia térmicas que afectan directamente a la distribución de energía y a la eficiencia del sistema. A pesar de que existe una amplia literatura, aun se siente la ausencia de información experimental detallada de este tema que relacionen las propiedades experimentales con la literatura y lo experimental delimitando así es estudio del análisis experimental de los materiales con cambio de fase [2].

1.3 Justificación

El panorama energético cada vez está más complicado a nivel global se sabe que una gran parte de la energía primaria se pierde en el ambiente para ser más preciso cerca de un 90% de esta energía se desperdicia a diario , haciendo así que se busquen métodos no muy favorables para la obtención de energía y sustituir estas pérdidas. Esto y la gran dependencia actual que se tiene en los combustibles fósiles que es la de mayor demanda mundial ha generado una crisis energética que afecta directamente a procesos productivos y desarrollo [2].

Debido a esto se ha impulsado al estudio y desarrollo de nuevas tecnologías energéticas para no solo aprovechar estas pérdidas sino también repotenciar sistemas, siendo así el almacenamiento térmico de energía con PCM una gran opción de no solo ayudar con la demanda energética sino también de mitigar y ayudar con los efectos del cambio climático [4].

De modo que los materiales con cambio de fase surgen como una alternativa fresca y eficiente para aprovechar el calor tanto para sistemas de calefacción como para sistemas de refrigeración, debido a sus propiedades termo físicas los PCM nos permiten almacenar y liberar energía en forma de calor durante el proceso de cambio de fase, así como cualquier otra alternativa esta tiene sus desventajas como por ejemplo la baja conductividad térmica de ciertos materiales y la posibilidad de que existan fugas del material, por esto se han estudiado diferentes técnicas de encapsulamiento del PCM mejorando su estabilidad [4].

Por esta razón ya sea en la industria de producción o en la edificación se ha tomado la decisión de usar esta tecnología de forma más amplia y a mayor escala para poder disminuir perdidas de energía residual, mejorando así el aprovechamiento energético y disminuyendo en costos de energía. De tal manera se ha convertido en una vía de mejora para los sistemas de energía

haciendo más sostenibles y ayudando a reducir la demanda y picos energéticos que estos pueden llegar a tener [4].

Debido a que es una tecnología no muy conocida sufre de la carencia de información o datos que ayuden a la selección ya sea de los materiales adecuados para el PCM como para los distintos encapsulamientos, así afectando a la eficiencia del sistema de almacenamiento de energía térmica [6].

1.4 Objetivos

En el siguiente apartado se detallan los objetivos a cumplir para el desarrollo del proyecto.

1.4.1 Objetivo general

Analizar las propiedades termo físicas en paneles experimentales con PCM y su efecto sobre el almacenamiento de energía térmica (TES).

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar y analizar las propiedades termodinámicas y de transferencia de calor de los materiales de cambio de fase (PCM).
- Identificar propiedades termo físicas clave que influyen en el comportamiento térmico de los paneles con material de cambio de fase (PCM).
- Evaluar el cambio de temperaturas, la transferencia de calor del PCM y la energía interna almacenada comparando los resultados obtenidos con modelos teóricos y normativas de eficiencia energética.

1.5 Fundamentación teórica

Es importante destacar los puntos teóricos que permiten analizar con más precisión las propiedades termofísicas de los materiales de cambio de fase y su comportamiento en los sistemas de almacenamiento térmico. Estos dos conceptos sobre definición y clasificación de PCM ayudan en la clasificación de estos. De igual forma, como los principios de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) que corresponden a las interacciones con materiales. En los sistemas térmicos, el rendimiento se ve influido en gran medida por los mecanismos de transferencia de calor. Estos conceptos son importantes para el diagnóstico y la mejora de la eficiencia energética de los paneles experimentales [5].

1.5.1 PCM

Los PCM son materiales que aprovechan el calor para manejar la temperatura en un rango, esto gracias al proceso de cambio de fase. El análisis y estudio de los materiales con cambio de fase son importantes para comprender como sus propiedades termofísicas se relacionan al igual que su desempeño en un sistema TES. Por lo tanto, a continuación, en la figura 9 se observa cómo se clasifican los PCM según su forma en la que este almacena y transfiere el calor. Por esta razón es que, al hablar de materiales con cambio de fase, un punto muy importante para comprender como estos obtiene y seden calor, es la transferencia de calor. Finalmente, las propiedades como la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la entalpía de fusión son importantes para evaluar el rendimiento térmico y la eficiencia energética de los paneles experimentales [4].

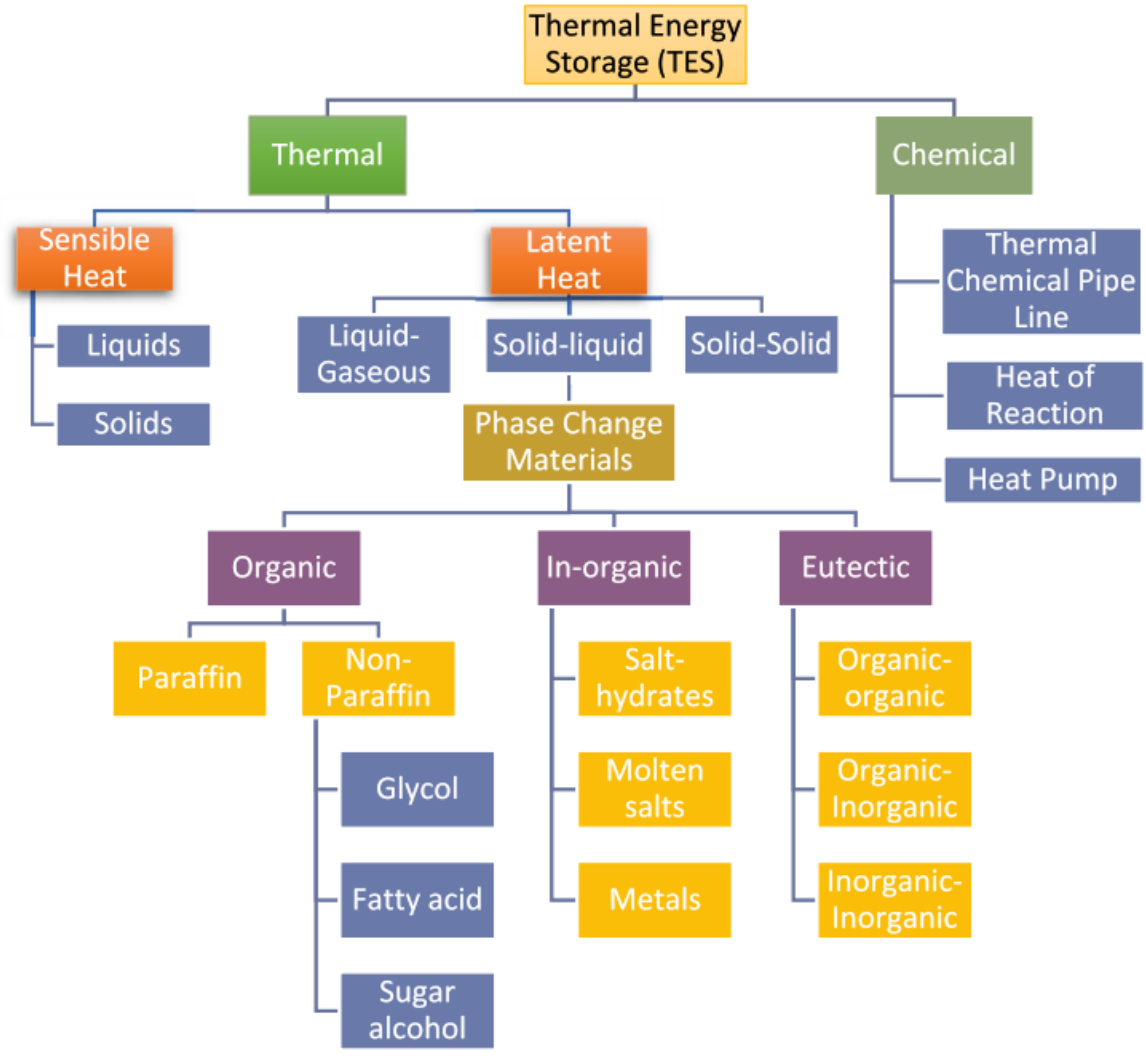


Fig. 8 Clasificación de TES y PCM [4].

- **PCM orgánicos**

Los PCM orgánicos se pueden dividir en parafínicos (siendo la cera de parafina el PCM más usado) y no parafínicos (ácidos grasos, esteres de ácidos grasos, ácidos glicólicos, alcoholes, etc.) [5]. Los PCM no parafínicos se pueden obtener a partir de materias de origen biológico (grasas animales y aceites vegetales). Estos materiales son sostenibles, biodegradables, no tóxicos y menos inflamables. Sin embargo, sus principales inconvenientes son que son más corrosivos que la parafina y tienen un costo más elevado [5].

Además, presentan estabilidad térmica y en comparación con PCM inorgánicos son menos corrosivos, lo que evita problemas de degradación durante su uso. Su fusión congruente permite transiciones de fase repetitivas sin segregación, y poseen un alto calor latente, buena nucleación, bajo subenfriamiento y mínima variación de volumen. Del mismo modo son compatibles con muchos materiales de construcción, una desventaja es que posee limitada capacidad de almacenamiento de energía y no es buen conductor térmico, además de ser materiales altamente inflamables [5].

Los PCM orgánicos son baratos y fáciles de conseguir, por lo que son versátiles para diferentes tipos de aplicaciones. La capacidad de los materiales de cambio de fase para captar y almacenar calor con energía interna y después liberarlo con el tiempo, los hacen muy apropiados para su uso en gestión térmica de edificios, transportes o proceso industriales. Igualmente, al ser materiales de procedencia orgánica, pueden derivar de fuentes renovables, lo que les confiere un carácter más sostenible en comparación con otros PCM. Su incorporación en nuevas tecnologías como climatización pasiva y almacenamiento en microescala abre posibilidades para mejorar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental en diferentes sectores [5].



Fig. 9 PCM orgánico.

- **PCM inorgánicos**

Los materiales inorgánicos utilizados como PCM se dividen en dos categorías principales:

Sales hidratadas: han sido objeto de análisis debido a su capacidad de almacenamiento térmico, por su cambio de fase implica un proceso de deshidratación.
Metales: esta categoría de materiales con cambio de fase es en la que menos se han hecho investigaciones o experimentaciones, pero se puede destacar su punto de fusión que es considerablemente más alto al de los demás.

Entre las propiedades más destacadas de los PCM inorgánicos se encuentran su alta conductividad térmica, su eficiencia en la acumulación de energía, la mínima variación de volumen durante la transición de fase y su carácter no inflamable [9].

Unos puntos en contra de estos materiales es que presentan una fusión no uniforme, son corrosivos con materiales metálicos y en algunos casos llegan a ser tóxicos. Por último, su costo suele ser mayor al de otros materiales [5].



Fig. 10 PCM inorgánico [6].

- **Ventajas y desventajas de los PCM orgánicos e inorgánicos**

Existen PCM idóneos para cada aplicación y encapsulamiento por esto es muy importante que se analicen las ventajas y desventajas que cada grupo de estos posee. Puesto que cada uno trabaja a condiciones distintas, de acuerdo con esto y a sus propiedades su costo también puede variar en función a las características propias de cada PCM [7].

Por esta razón a continuación en la tabla 1 se detalla las ventajas y desventajas de los PCM de carácter orgánico e inorgánico.

Tabla I Ventajas y desventajas de PCM orgánicos e inorgánicos [4][6].

Tipo de PCM	Ventajas	Desventajas
PCM Orgánico	Amplio rango de temperatura en su cambio de fase	Alta inflamabilidad
	Alta estabilidad térmica sin degradación durante el ciclo de fase	Baja densidad, lo que puede afectar el rendimiento en algunos sistemas
	Inerte químicamente, lo que lo hace seguro para diversos entornos	Poca variabilidad en su volumen durante la transición de fase.
	No es corrosivo, asegurando durabilidad en muchos sistemas	Conductividad térmica relativamente baja
	El proceso de fusión es congruente, lo que evita la segregación de fases	
	Gran capacidad para almacenar calor latente	
	Buenas propiedades de nucleación	
	Baja capacidad de subenfriamiento de la fase líquida	
	Buenas propiedades de nucleación	
	Alto calor latente	
	Bajo costo y reciclabilidad	

Tipo de PCM	Ventajas	Desventajas
PCM Inorgánico	Alta eficiencia energética debido a una gran entalpía de fusión	Alta toxicidad, lo que requiere precauciones especiales en su manejo
	Baja variación de volumen durante la transición de fase	Su compatibilidad con materiales de construcción es más limitada.
	No inflamable, lo que reduce riesgos en aplicaciones de alto riesgo	Coste de fabricación más elevado
	Muy alto calor latente, lo que mejora la capacidad de almacenamiento térmico	Alta conductividad térmica, lo que puede dificultar su control de temperatura
		Puede ser corrosivo dependiendo del entorno
		Fusión incongruente
		Segregación de fases
		Mala nucleación
		Sobre enfriamiento de la fase líquida

1.5.2 Rangos de temperatura para la generación de energía de los PCM

Tabla II Clasificación de PCM de acuerdo con su rango de temperatura [4][5].

TEMPERATURA	RANGO	PCM Utilizado
Baja	-20 °C a 5 °C	Compuestos orgánicos e hidratos de sal
Medio-Baja	5 °C a 40 °C	Compuestos orgánicos e hidratos de sal
Media	40 °C a 80 °C	Compuestos orgánicos como las parafinas y los ácidos grasos
Alta	80 °C a 200 °C	Compuestos orgánicos con un rendimiento aceptable, mientras que la sal fundida sigue dominando el sector TES debido a su vida útil y beneficios económicos.

1.5.3 Tipos de encapsulación PCM según el tamaño

Los materiales de cambio de fase para poder manejarlos y transportarlos de una manera más eficiente requieren técnicas de encapsulamiento, además esto mejora su estabilidad, manejabilidad y eficiencia al momento de transferir su energía. Actualmente los encapsulamientos se dividen según su tamaño. Por facilidad de estudio se hará énfasis en el macro encapsulamiento.

Segun el tamaño, el PCM encapsulado se clasifica de la siguiente manera:

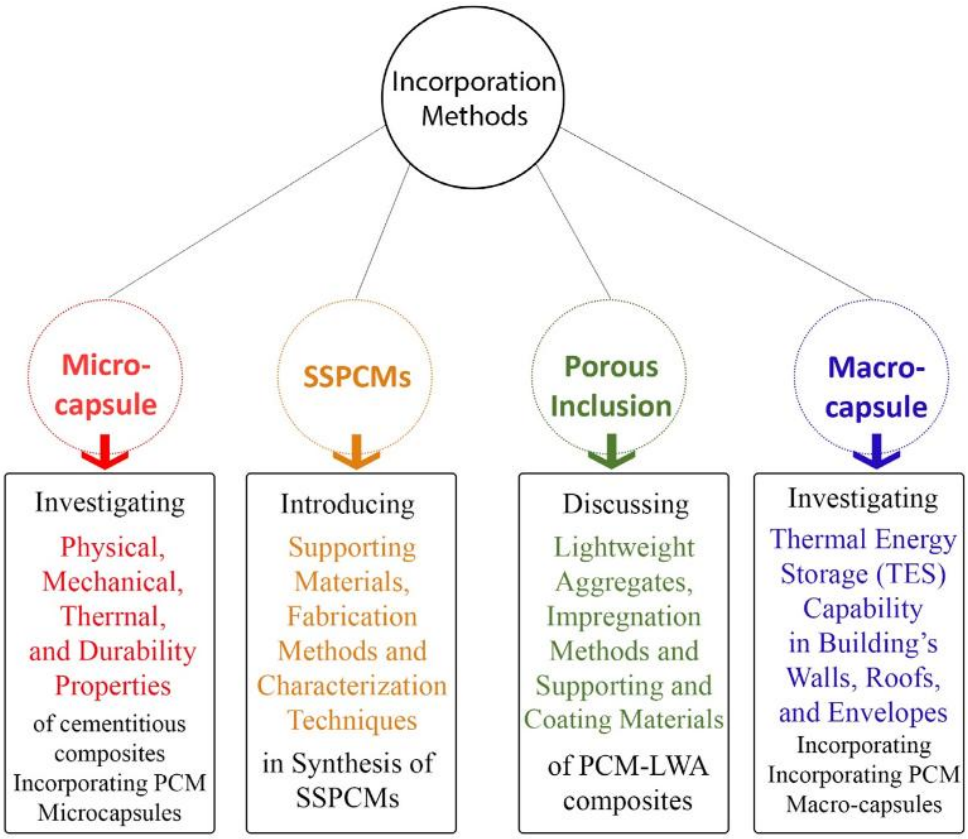


Fig. 11 *Categorización de diferentes métodos de incorporación de PCM en materiales de construcción y sus consideraciones técnicas asociadas [6].*

Macro encapsulamiento

El encapsular un PCM es muy importante para prevenir futuras fugas del material y facilitar su mantenimiento. Debido a su facilidad en la experimentación se ha hecho un énfasis mayormente en el macro encapsulamiento de PCM, debido a que es mucho más sencillo manejar estos materiales a esta escala que cuando se trata de un micro encapsulamiento. El macro encapsulamiento no es nada más que el introducir en un contenedor de gran tamaño de

distinta geometría el PCM, mayormente la forma del encapsulamiento suele ser: placas planas, esferas, cilindros, etc. [6].

La encapsulación es la clave para aumentar el rendimiento de los sistemas de almacenamiento térmico en paneles experimentales. Esto se debe a que se busca el almacenamiento de calor, especialmente en calefacción solar. Para los sistemas TES, la elección de un método de encapsulación, y el control sobre el espesor que tendrá el material de recubrimiento, son factores que pueden resultar determinantes en los procesos de carga y descarga térmica. Un grosor correcto de la capa asegura la resistencia estructural de la cápsula sin afectar la transferencia de calor y sin disminuir la capacidad de almacenamiento. Un revestimiento excesivamente delgado puede impactar sobre la integridad estructural, mientras que uno demasiado grueso puede comprometer la eficiencia térmica y mermar la cantidad de PCM contenido, reduciendo así la capacidad de almacenamiento térmico. Para optimizar el rendimiento térmico y la durabilidad de los sistemas de almacenamiento energético, el diseño del recubrimiento debe tener un equilibrio [7]. A pesar de sus beneficios, el macro encapsulamiento puede presentar desafíos, como la resistencia térmica adicional impuesta por la cápsula y el costo de los materiales de recubrimiento. Sin embargo, sigue siendo una opción clave para la implementación efectiva de los PCM en diversas aplicaciones térmicas [6].

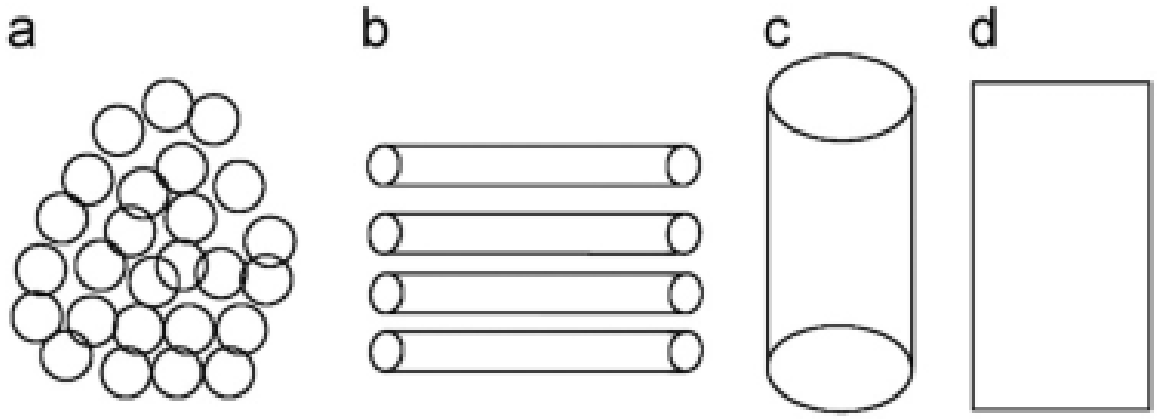


Fig. 12 Diferentes geometrías para encapsulación de PCM (a) esférica (b) tubular (c) cilíndrica y (d) rectangular [7].

1.5.4 Capacidad de almacenamiento térmico (TES)

La capacidad de un sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) se refiere a la habilidad del sistema para almacenar calor, ya sea en forma de calor sensible mediante el calentamiento de un material adecuado o como calor latente a través del uso de materiales de

cambio de fase (PCM). Esta energía térmica almacenada puede ser aprovechada posteriormente o liberada de manera controlada en forma de calor, según las necesidades del sistema [2].

1.5.5 Propiedades termofísicas de los PCM

Para poder hablar del rendimiento térmico y la estabilidad es necesario comprender las propiedades termofísicas que influyen en estos procesos. Entre otras, son estas propiedades las más importantes debido a que son las que interviene en gran parte, la capacidad de estos para poder absorber y liberar calor. La Conductividad térmica (k), la Densidad (ρ) y la Capacidad Calorífica (Cp) son las más importantes. En este caso, la inercia térmica es la propiedad que identifica un material que resiste los cambios de temperatura, por lo que le confiere a un material que tiene un rendimiento en un sistema de almacenamiento térmico. La conductividad térmica (k), la masa (ρ) y el calor específico (Cp) se comportan con su entorno durante los procesos de carga y descarga de energía. Se abordará esto más en la siguiente sección, sobre la importancia de la inercia térmica en su comportamiento [3].

- **Energía térmica**

La energía térmica hace referencia a la energía asociada al movimiento que realizan las partículas dentro de un sistema, la cual se puede apreciar mediante el intercambio de calor cuando existe una diferencia de temperaturas. La magnitud de esta está directamente relacionada con la masa, temperatura y propiedades termofísicas propias del material. La energía térmica se almacena o libera de dos maneras distintas, en forma de calor sensible o calor latente [4].

Calor sensible: es aquel que produce sus variaciones de energía sin el cambio de fase del material, es decir en un sistema de almacenamiento de energía térmica el calor sensible es aquel que se basa en la capacidad térmica propia del material [3].

Calor latente: se entiende como el calor que se intercambia durante el cambio de fase del material, ya sea este en solidificación o fusión, sin una gran variación de su temperatura [3].

- **Inercia térmica**

La inercia térmica hace referencia a la cualidad de un material que se opone a la variación o a la manipulación de su temperatura cuando se le lleva a un determinado estado térmico. Esta

propiedad es propia de los participantes de los sistemas de almacenamiento de energía térmica [8].

Un material con alta inercia térmica será capaz de almacenar y liberar calor de manera más eficiente su temperatura cambiará más lentamente en respuesta a los procesos de carga y descarga de energía térmica. Los materiales de cambio de fase están directamente relacionados con la inercia térmica, mismos que aumentan significativamente esta capacidad gracias a su propiedad de almacenar grandes cantidades de energía en forma de calor latente durante el proceso de cambio de fase y de solidificación [6].

- **Tasa de transferencia de calor**

La tasa de transferencia de calor es un parámetro fundamental en el análisis térmico de materiales; representa la velocidad con la que el calor fluye a través de un medio en respuesta a una diferencia de temperatura. En el ámbito de los materiales de cambio de fase (PCM), este valor sirve para evaluar la capacidad de este material de absorber o liberar calor cuando este material se funde o se solidifica. La tasa a la que un material puede trasmitir calor es considerada como su conductividad térmica. Esta tasa depende de la conductividad térmica del material, el área a través de la cual fluye el calor, la longitud del trayecto de conducción y la diferencia de temperatura aplicada. Un diseño con mayor eficiencia tiende a que algunos gastos sean más accesibles. Un menor costo de la carga térmica puede informar de otros puntos de interés [8].

- **Conductividad térmica**

Esta es una de las propiedades más importantes para tener en cuenta en el estudio de los materiales con cambio de fase, esta es la encargada de medir la cantidad de energía que un cuerpo poder transferir [8].

La conductividad térmica varía ampliamente entre diferentes materiales. Por ejemplo, el cobre tiene una conductividad térmica de aproximadamente 401 $\left(\frac{W}{m*°C}\right)$ lo que lo convierte en un excelente conductor del calor, mientras que materiales aislantes como la espuma de poliestireno tienen valores inferiores a 0.03 $\left(\frac{W}{m*°C}\right)$ [8]. La velocidad con la que una sustancia recibe y entrega energía térmica depende de la temperatura del cuerpo y de su conductividad térmica. También condiciona el diseño de sistema de almacenaje y condiciones de funcionamiento. De

forma general, los PCM que presentan alta energía y densidad, tienden a tener bajas conductividades térmicas, en cambio, con alta capacidad calorífica; lo que se traduce en baja difusividad térmica. Muchos de ellos tienen baja conductividad térmica, por lo que se han desarrollado estrategias para mejorarla a partir de la utilización de aditivos conductores térmicos (grafito expandido, nanotubos de carbono, óxidos metálicos) o dentro del diseño de estructuras porosas o encapsulación en aditivos de alta conductividad [8].

Es importante que se mejore cada vez la conductividad térmica del PCM para así mejorar su aplicación en sistemas TES para que así mejore su transferencia de calor haciéndola más rápida y uniforme. Esto mejora su rendimiento en la climatización, en sistemas renovables energéticos y la recuperación de pérdidas de calor en edificios y casa. Como alternativa para optimizar la transferencia de calor de estos materiales se han desarrollado estrategias como;

- La adición de materiales
- Técnicas de encapsulamiento
- Trabajar con materiales de soporte de alta conductividad térmica

Estas soluciones buscan equilibrar la capacidad de almacenamiento energético con una transferencia de calor más eficiente, optimizando su desempeño en distintos sistemas térmicos [11].

- **Densidad en PCM**

La densidad es una propiedad física que determina cuánta masa hay en un nivel de espacio ocupado por un material. La densidad de un material puede cambiar según su tipo y estado físico. Esto es así porque los cambios de fase alteran la disposición de las moléculas y, por ende, el volumen que ocupa la misma masa. La densidad de los PCM es de gran importancia y se busca que sea lo más alta posible. Así, los materiales ocupan menos volumen. Esto resulta crucial en aplicaciones donde el espacio disponible es limitado, como en sistemas de almacenamiento térmico compactos o en la integración con estructuras de construcción [9].

Los PCM tienen determinada densidad según el estado; sólido, líquido, etc. Cuando están a temperatura ambiente, los PCM están en estado sólido. Así, esto hace que haya una mayor densidad porque sus moléculas están bien distribuidas. No obstante, al fundirse y pasar al estado líquido, su densidad desciende por expansión térmica. Este cambio en volumen podrá

generar problemas en aplicaciones que requieren estabilidad estructural, por lo que se han desarrollado estrategias de encapsulación o confinamiento que previenen la pérdida de material y mejoran la eficiencia del sistema. [9].

Para optimizar el almacenamiento térmico, es importante seleccionar PCM con una densidad adecuada que maximice la cantidad de energía almacenada por unidad de volumen. En algunos casos, los PCM se combinan con materiales de soporte de alta densidad, como matrices porosas o compuestos híbridos, para mejorar su estabilidad sin comprometer su capacidad de almacenamiento térmico [9].

- **Calor específico**

El calor específico (cp) es una propiedad termofísica de los materiales que indica la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura de una unidad de masa de una sustancia en un grado de temperatura [8]. Se mide en unidades como $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}}$ y es un parámetro fundamental en la transferencia de calor misma que influye directamente en la capacidad de almacenamiento y disipación de energía térmica [9].

Cabe destacar que el cp de los PCM varía según su estado y dependen mucho de la temperatura a la que se encuentra el material, influyendo así al almacenamiento de energía y la transferencia de calor. Debido a esto es de gran importancia conocer el cp del material usado para el sistema de almacenamiento de energía térmico para así optimizarlo [8]. Adema el uso de PCM permiten trabajar con calor latente o calor sensible, siendo estos dos muy importantes a la hora de almacenar o ceder la energía térmica [8].

El TES se lleva a cabo mediante estos dos mecanismos. En el almacenamiento sensible, se aprovecha el calor específico de materiales como el agua, la tierra o sólidos convencionales, mientras que, en el almacenamiento latente, se utiliza la capacidad de cambio de fase de materiales como la parafina y las sales hidratadas, lo que permite una mayor densidad energética en menor volumen [10].

Debido a que los materiales con cambio de fase sufren variaciones de su estado físico el calor especifico propio de cada uno también varía dependiendo si se encuentra en estado sólido o líquido, lo que afecta directamente con la eficiencia térmica del PCM. Normalmente el calor especifico de un material en estado líquido suele ser mayor al de la misma materia en estado

sólido. Debido a estas variaciones en el calor especifico se ve afectada la absorción y la liberación del calor, esta variable casi nunca permanece constante puesto que también varía en función de la temperatura [10].

Comparado con materiales convencionales, los PCM pueden tener un calor específico más bajo que sustancias como el agua (aproximadamente 4.18 $\frac{kJ}{kg*K}$), pero compensan esta diferencia con su capacidad de almacenamiento latente. Por ejemplo, las parafinas y sales hidratadas suelen presentar valores de calor específico entre 1.5 y 2.5 $\frac{kJ}{kg*K}$ en estado sólido y entre 2 y 3 $\frac{kJ}{kg*K}$ en estado líquido, dependiendo de la composición del material [10].

Por esto para diseñar un TES es importante saber que la variación del calor especifico puede afectar directamente al funcionamiento de este, haciendo así que su rendimiento a la hora de transferir el calor se vea afectado, como solución a estos problemas se ha optado por estudiar la incorporación de materiales que hagan la función de aditivos que mejoren la conductividad térmica [10].

1.5.6 Transferencia de calor en PCM

El trasvase de calor es un método clave en la termodinámica, algo que se define como una variación de energía térmica a través del calor debido a diferencias de temperaturas entre sistemas. El calor es energía que fluye entre un sistema y los alrededores de un cuerpo debido a existir una diferencia de temperaturas [8].

El estudio y control de la transferencia de calor permite optimizar tecnologías energéticas que existen y crear otras nuevas. En lo relacionado a las energías renovables, este principio se enfatiza en intercambiadores de calor, almacenamiento solar y refrigeración, aire acondicionado, bomba de calor y energía geotérmica. Un caso de esto es la captación solar pasiva en el cual la radiación solar se transfiere a un fluido (agua) para calentarlo, aprovechándose luego en agua caliente sanitaria o calefacción [11]. La captura de calor en calderas y en procesos industriales son útiles para evitar el desperdicio energético y mejorar la eficiencia térmica.

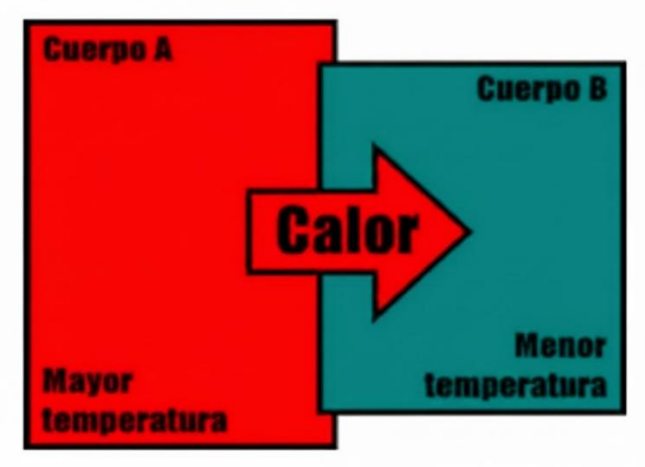


Fig. 13 Teoría del calor [11].

La investigación de nuevos materiales para el almacenamiento térmico es de suma importancia porque a medida que aumenta el costo de la electricidad y requieren un mayor consumo de energía, los materiales de cambio de fase han demostrado ser útiles. Estos atributos los hacen perfectos para usar donde estabilizar temperaturas, aumentar eficiencia energética y optimizar transferencia de calor en diversos sistemas térmicos sean necesarios. Se dice que el rendimiento de los PCM en un sistema térmico depende de la interacción de estas tres modalidades de transferencia de calor y de las estrategias que se empleen. En esta línea, la investigación actual estudia la mejora de la conductividad térmica de los PCM, se desarrollan nuevas técnicas de encapsulación, y se estudian combinaciones con tecnologías complementarias, con el objetivo de mejorar su uso y aplicación en almacenamiento de energía térmica y en procesado energético [8], [11].

1.5.7 Distribución de temperatura

La distribución de temperatura en un medio depende de las condiciones en las superficies, y la descripción completa de un problema de transferencia de calor debe incluir las condiciones térmicas en las superficies limítrofes del mismo [8]. En un panel con PCM, esta distribución no es uniforme debido a la zona de transición térmica donde ocurre el cambio de fase, permitiendo la absorción y liberación de calor sin variaciones bruscas de temperatura. Sin embargo, la baja conductividad térmica de muchos PCM puede generar gradientes térmicos dentro del panel, afectando su rendimiento [8] ,[11].

Por ende, la el PCM en estado sólido es mejor conductor térmico, no obstante, cuando el material se encuentra líquido este distribuye el calor de mejor manera, afectando así al proceso

de fusión del material debido a que la temperatura no se mantiene uniforma en todo el PCM. Esto ha llevado al diseño de encapsulados que favorezcan la distribución de energía [5].

Para tener un sistema donde se pueda aprovechar de la mejor manera tanto el almacenamiento como la transferencia del calor se debe utilizar la geometría adecuada en el encapsulamiento, mejorando así este problema de distribución de energía térmica [5].

1.6 Hipótesis

Las propiedades termofísicas de los materiales de cambio de fase (PCM) no dependen únicamente del material en sí, sino que también están condicionadas por el entorno en el que operan, el material del encapsulado y la forma de las probetas utilizadas en los ensayos. Estos aspectos influyen directamente en la manera en que el PCM almacena y libera la energía térmica, lo que permite observar y analizar su comportamiento durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento.

1.7 Señalamiento de las variables de la hipótesis

Tabla III Parametrización de variables.

Descripción de variables	
Variables independientes	**Descripción**
Propiedades termofísicas de PCM y configuración del encapsulamiento.	Comprende el conjunto de propiedades termofísicas propias del material al igual que las condiciones geométricas y del material del encapsulamiento.
Variable Dependiente	**Descripción con valores típicos**
Capacidad de almacenamiento de energía térmica	Capacidad de almacenar energía térmica, esta describe el comportamiento del PCM en el momento de almacenar y liberar energía.

1.7.1 Operacionalización de variables

Tabla IV Cuadro de operacionalización de variables.

Cuadro de Operacionalización de Variables		
Variable Independiente:	Propiedades termofísicas de PCM y configuración del encapsulamiento.	
Indicadores	**Definición Conceptual**	**Método de Medición**
Tipo de PCM	Material de cambio de fase seleccionado para el almacenamiento de energía	Selección de material y observación experimental.

	térmica, caracterizado por su punto de fusión y propiedades termofísicas.	
Material del encapsulado	Material que contiene el PCM y que influye en la transferencia de calor y en la estabilidad mecánica del sistema.	Identificación directa del material del recipiente y revisión de sus propiedades térmicas reportadas.
Geometría del encapsulado	Forma y dimensiones del encapsulamiento que determinan el área de intercambio térmico y la resistencia térmica del sistema.	Inspección física de la probeta y medición dimensional con instrumentos básicos (regla o calibrador).
Variable Dependiente:	Capacidad de almacenamiento de energía térmica	

Indicadores	**Definición Conceptual**	**Unidad de Medida**	**Método de Medición**
Eficiencia en la transferencia de calor	Calor transferido respecto al calor total disponible.	W, J, %	Comparación entre el calor transferido y el disponible
Distribución de temperatura	Variación de temperatura durante el proceso térmico.	°C (grados Celsius)	Medición de temperatura en diferentes tiempos

CAPÍTULO II

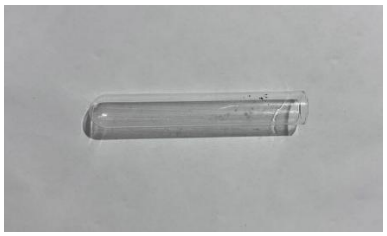
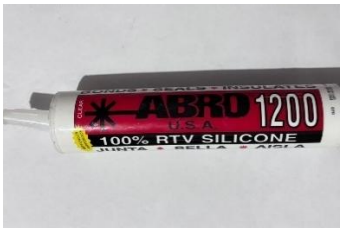
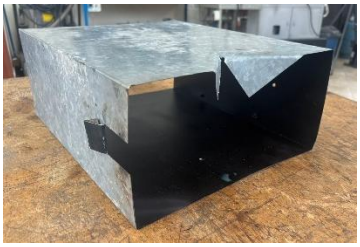
METODOLOGÍA

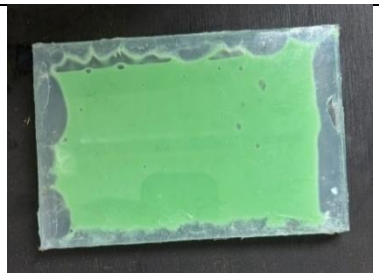
Este capítulo describe el enfoque metodológico utilizado para llevar a cabo el análisis de las propiedades termo físicas de paneles experimentales con material de cambio de fase (PCM) y su efecto en el almacenamiento térmico. La metodología se estructura de acuerdo con los objetivos planteados en la investigación y busca garantizar la validez, confiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

2.1 Materiales para la elaboración de los paneles experimentales y encapsulados de PCM

Tabla V Listado de materiales usados para la elaboración y experimentación de los paneles.

Nombre	**Descripción**	**Representación Grafica**
Parafina	Material de cambio de fase principal debido a su alta entalpía de fusión y estabilidad térmica.	

Nombre	Descripción	Representación Grafica
Manteca vegetal	Alternativa orgánica al PCM para evaluar diferencias en almacenamiento térmico	
Glicerina solida	PCM adicional de origen orgánico, seleccionada por su comportamiento térmico en transiciones de fase.	
Tubos de ensayo	Elementos de encapsulamiento de los PCM, permitiendo su manipulación y ensayo controlado.	
Aglomerado	Material base del panel experimental sobre el cual se integran los PCM encapsulados.	
Silicona industrial	Utilizada para fabricar los tapones que sellan los encapsulamientos de ensayo, evitando fugas durante el proceso térmico.	
Ducto de aire	Concentra el calor	

Nombre	Descripción	Representación Grafica
Placas de cristal	Para realizar paneles rectangulares	
Envase circular	Panel circular de plástico	

2.2 Diseño experimental

El diseño experimental de este estudio es de carácter experimental orientado al analizar comportamientos térmicos de los PCM encapsulados y siendo sometidos a ciclos de calentamiento y enfriamiento y analizar su capacidad de ceder energía. De tal manera que se realizaron distintas probetas de cada material y con distintos tipos de encapsulamiento.

Numero de ciclos

Se realizaron de 2 a 3 ensayos por cada tipo de probeta con el fin de obtener más información en la obtención de los datos de la experimentación, de estos ensayos se escogieron los que mejores resultados se obtuvieron.

Tabla VI Numero de probetas y ensayos.

PCM	Tipo de probeta	Material del encapsulado	Número de probetas	Número de ciclos térmicos por probeta
Glicerina sólida	Tubo de ensayo	Cristal	5	1
	Rectangular	Cristal	2	1
Manteca vegetal	Tubo de ensayo	Cristal	5	1
	Rectangular	Cristal	2	1
Parafina	Tubo de ensayo	Cristal	5	1
	Rectangular	Cristal	2	1
	Circular	Plástico	2	1

2.3 Instrumentación

La tabla acotada a continuación muestra los equipos o materiales que fueron usados a la hora de medir y recolectar datos.

Tabla VII Descripción de instrumentación.

Equipo / Material	Función principal	Uso en la experimentación
Cámara térmica	Medición de temperatura además de la visualización de las diferentes zonas térmicas del panel	Recolección de datos, visualizar variaciones de temperatura de la probeta y así realizar una gráfica tiempo vs temperatura
Fuente de calor	Suministro de energía térmica	Calentamiento de las probetas de PCM para llegar a derretir el material
Encapsulado	Contenedor del PCM	Contenedor del PCM y variable de comportamiento en su material y geometría
Cronometro	Medir el tiempo entre termografía	Se midió el tiempo que se tardó en tomar cada termografía.

2.4 Calibración

Antes de comenzar los respectivos ensayos se calibraron y verificaron el instrumento de medición y de generación de calor, evaluando tanto en su correcto funcionamiento como en precisión.

Para la verificación de la fidelidad de la cámara termográfica se midió al mismo tiempo el PCM con la cámara termográfica y un pirómetro y había un error de ±2 °C en la medición de la temperatura del PCM . La variación de la temperatura del PCM puede ser debido a la zona donde se enfocó el medidor del pirómetro o de la cámara termográfica.

2.5 Condiciones de ensayo

Temperatura final del PCM

Mediante la medición de diferentes probetas se estableció que la temperatura a la que llegan parcialmente a su enfriamiento las probetas es en un rango entre 21 y 26 °C.

Condiciones iniciales de cada probeta

Antes de cada experimentación cada probeta se pesó y trató de que independientemente del tipo de encapsulamiento todos contengan la misma cantidad de PCM. Al momento de la experimentación cada encapsulamiento se encontraba aislada de cualquier fuente de energía

térmica externa, es decir esta se encontraba en temperatura ambiente. De esta manera garantizando la igualdad a la hora de realizar los ensayos de cada probeta.

Fuente de calor

El suministro de calor se aplicó de manera seguida asegurando que cada probeta y material recibiera de la misma manera la energía térmica.

Condiciones de enfriamiento

En la última etapa de la experimentación todos los materiales estuvieron bajo las mismas condiciones, de tal manera que una vez que el material se fundido, la probeta fue retirada de la fuente de calor y se dejó enfriar a temperatura ambiente.

Ubicación

El análisis y la experimentación se los llevara a cabo en los laboratorios de la Facultad de Mecánica.

2.6 Métodos

Para la elaboración de este trabajo experimental se utilizarán los siguientes métodos:

2.6.1 Método cuantitativo

El enfoque cuantitativo permite analizar los datos obtenidos mediante técnicas estadísticas y herramientas numéricas, con el fin de identificar patrones, correlaciones y comportamientos térmicos de los PCM. Este método posibilita una evaluación objetiva y medible del rendimiento de los paneles, mediante variables como el calor almacenado, la conductividad térmica, la eficiencia del sistema y el tiempo de liberación de energía.

2.6.2 Método Comparativo

En el desarrollo de este trabajo experimental es de importancia usar un método comparativo para poder tener una medida de comparación entre los distintos materiales usados en esta aplicación al igual que las distintas geometrías de encapsulamiento

2.6.3 Método explicativo

Mediante este método se logra explicar la relación que las propiedades termo físicas tienen directamente con el PCM al igual que el análisis de cada material y encapsulamiento.

2.6.4 Método bibliográfico

Este método se centra en la investigación y revisión de artículos, libros y fichas técnicas que nos ayuden con el desarrollo y comprensión del uso, aplicaciones y uso de estrategias para mejorar el almacenamiento de energía térmica mediante el uso de PCM.

2.7 Criterios de selección de PCM

- **Temperatura de fusión adecuada**

Es importante elegir materiales que sean de fácil adquisición que su costo no sea elevado y más que todo que se encuentren dentro del parámetro de experimentación adecuados, así como es el rango de temperatura.

- **Inercia térmica**

La inercia térmica es la propiedad de un material que le permite **resistir cambios rápidos de temperatura**, almacenando calor durante los periodos de exceso térmico y liberándolo cuando la temperatura disminuye.

- **Disponibilidad y bajo costo**

Se eligió materiales que sean de fácil adquisición y que su costo no sea demasiado elevado para poder realizar varios encapsulamientos

- **No toxicidad y facilidad de manipulación**

Se seleccionaron materiales no tóxicos y seguros para manipular en un entorno de laboratorio o experimental, lo cual permite realizar pruebas sin necesidad de equipos de protección especiales o medidas extremas de seguridad.

2.8 Características de los PCM seleccionados

Con base en los criterios de selección previamente descritos, se determinaron tres materiales de cambio de fase (PCM) adecuados para el presente estudio. La elección de estos materiales respondió a sus propiedades termo físicas y su viabilidad para la aplicación experimental propuesta.

2.9 Modelación de los encapsulamientos

Se modelo el encapsulamiento deseado con la ayuda del software SolidWorks para poder tener una comparación real de la masa que cada encapsulamiento debería contener, teniendo así un porcentaje de llenado de cada material con respecto a la masa pesada y a la que nos muestra el software.

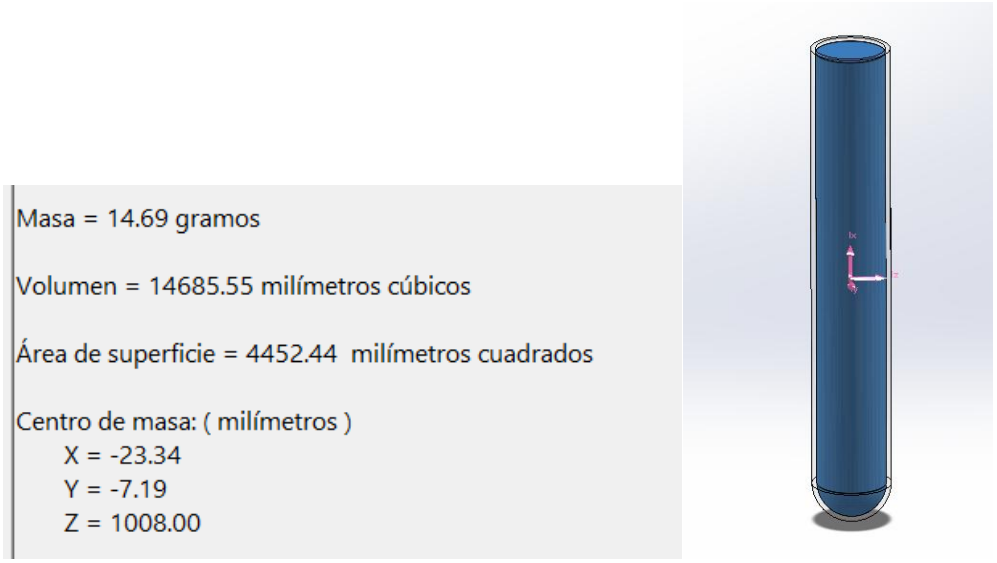


Fig. 14 Modelación de encapsulamiento en un tubo de ensayo.

Masa = 32.56 gramos

Volumen = 32558.40 milímetros cúbicos

Área de superficie = 20525.60 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)
X = -1.79
Y = -0.57
Z = 1004.70

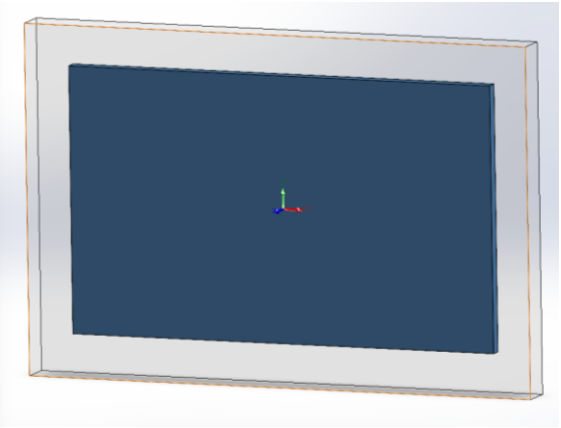


Fig. 15 Modelación de encapsulamiento en placas de vidrio.

Masa = 67.26 gramos

Volumen = 67263.42 milímetros cúbicos

Área de superficie = 14395.39 milímetros cuadrados

Centro de masa: (milímetros)
X = -13.60
Y = 3.46
Z = 1007.00

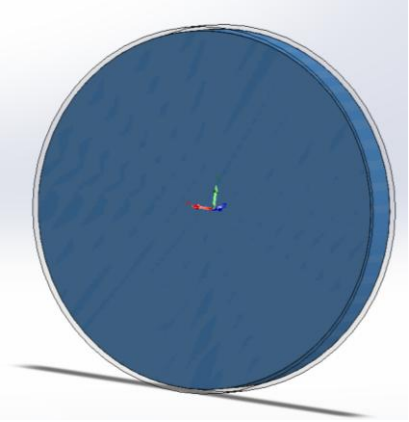
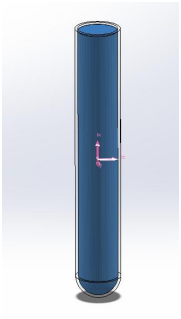
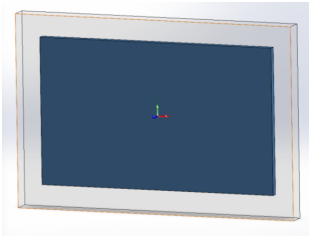
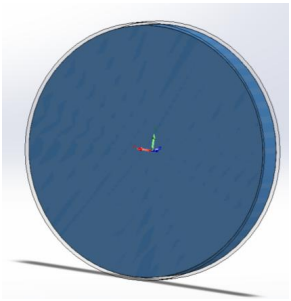


Fig. 16 Modelación de encapsulamiento en envase circular de plástico.

Tabla VIII Resumen de la capacidad másica que soporta cada encapsulamiento.

Encapsulamiento	**Capacidad másica del encapsulado (g)**	**Masa pesada en la experimentación (g)**	**Modelado**
Cilíndrico	14,69	14,00	
Rectangular	32,56	30,00	
Circunferencia	67,26	64,00	

2.10 Proceso del proyecto

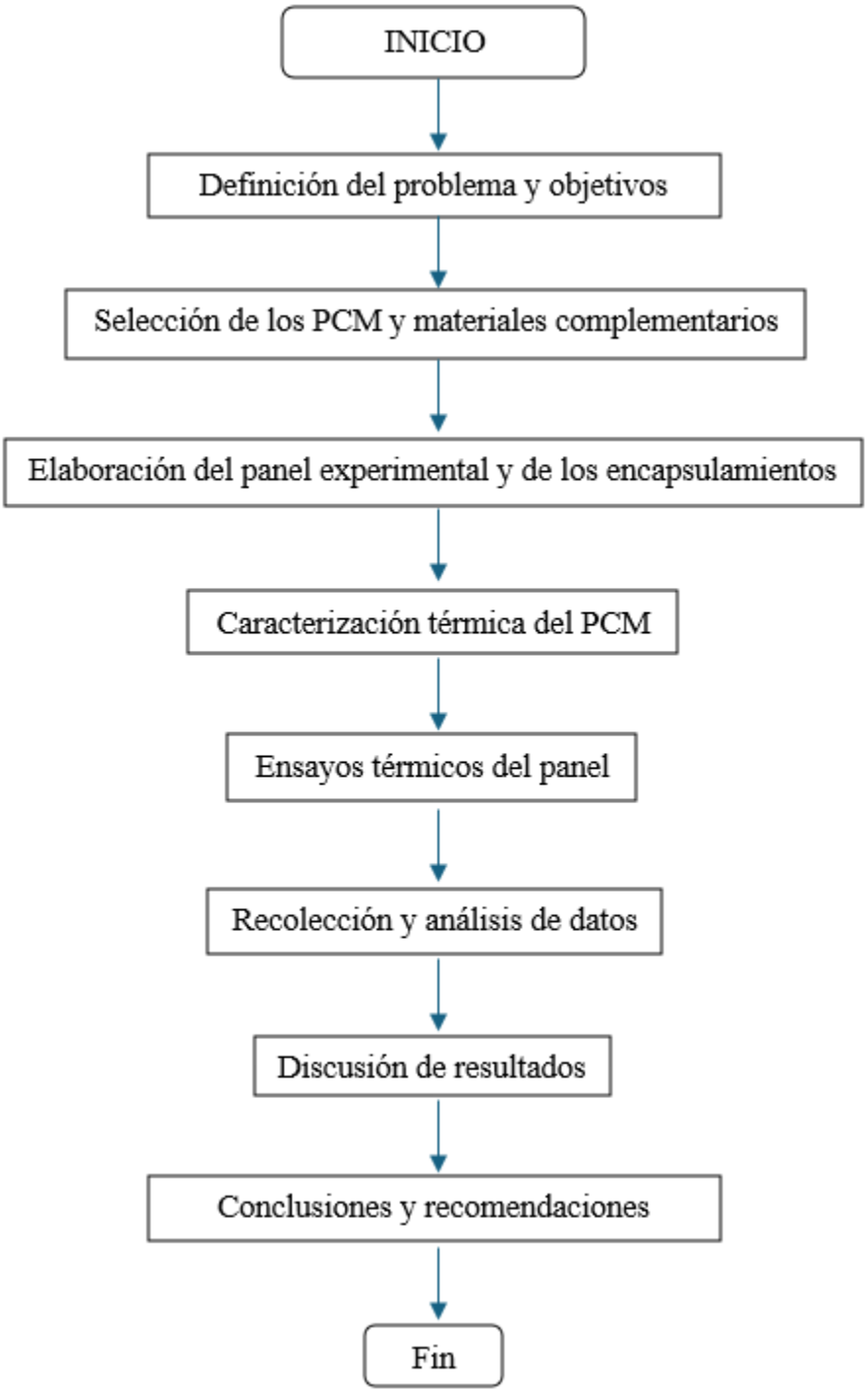


Fig. 17 Diagrama de flujo para el proceso del proyecto experimental.

2.11 Cálculos

Con el fin de integrar las propiedades termo físicas fundamentales a la experimentación. Se ha aplicado la inercia térmica ecuación que incluye la conductividad térmica, la densidad y la capacidad calorífica específica, con esto obtenemos un valor para poder comprender como es el comportamiento del PCM frente a las distintas condiciones de temperatura. Por esto este análisis es necesario para caracterizar el rendimiento térmico del material dentro del panel y comparar su capacidad de almacenamiento y transferencia de energía con otros compuestos.

1. **Inercia térmica**

   - **Ecuación para sólidos y líquidos**

$$\text{Inercia térmica} = \sqrt{\mathrm{k} * \mathrm{p} * \mathrm{c_p}} \qquad \textit{Ec. 2.1}$$

Donde:

- inercia térmica $\left(\frac{J}{m^2 * K * s^{\frac{1}{2}}}\right)$
- k: conductividad térmica $\left(\frac{W}{m*K}\right)$
- ρ: densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$
- cp: calor especifico $\left(\frac{J}{kg*K}\right)$

2. **Tasa de transferencia de calor**

   - **Ecuación en el cambio de fase**

$$\mathrm{Q} = \mathrm{m} * \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{t}} \qquad \textit{Ec. 2.2}$$

Donde:

- Q: transferencia de calor (W)
- m: masa del PCM (kg)
- L: calor latente de fusión $\left(\frac{J}{kg}\right)$
- t: tiempo en el que ocurre el cambio de fase (s)

   - **Ecuación para sólidos y líquidos**

$$Q = m * Cp * \frac{\Delta T}{t} \qquad \textit{Ec. 2.3}$$

Donde:

- Q: tasa de transferencia de calor (W)
- m: masa del PCM (kg)
- Cp: calor específico $\left(\frac{J}{kg*K}\right)$
- T: tiempo del proceso de calentamiento (K)
- t: tiempo en el que ocurre el cambio de fase (s)

3. Calor

$$q = m * Cp * (T_i - T_f) \qquad \textit{Ec. 2.4}$$

Donde:

- q: calor (J)
- m: masa del PCM (kg)
- Cp: calor específico $\left(\frac{J}{kg*K}\right)$
- T_i: temperatura inicial (K)
- T_f: temperatura final (K)

Energía liberada

$$E(t) = C_p * (T_i + T_{i+1}) \qquad \textit{Ec. 2.5}$$

Donde:

- $E(t)$: energía liberada $\left(\frac{J}{kg}\right)$
- Cp: calor específico $\left(\frac{J}{kg*K}\right)$
- T: temperatura (K)

4. Fracción líquida de PCM

$$f = \frac{E(t) - E_{pcm_{min}}}{E_{pcm_{max}} - E_{pcm_{min}}} \quad \textit{Ec. 2.6}$$

Donde:

- f: fracción líquida de PCM
- $E(t)$: energía liberada
- $E_{pcm_{min}}$: energía liberada inicial
- $E_{pcm_{max}}$: energía liberada final

2.11.1 Propiedades

Tabla IX Propiedades de los PCM seleccionados para las pruebas experimentales [4][8][12][13][13]

Propiedades de PCM						
PCM	**Estado**	**Punto de fusión** $(°C)$	**Conductividad térmica** $\left(\frac{W}{m*K}\right)$	**Densidad** $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	**Cp** $\left(\frac{kJ}{kg*K}\right)$	**Calor latente** $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$
Glicerina sólida	Líquido	38-55	0,3	1260	2,32	200,6
	Fusión				-	
	Sólido				2	
Manteca vegetal	Líquido	30-40	0,2	870	2,95	210
	Fusión				-	
	Sólido				1,63	
Parafina	Líquido	46-68	0,2	850	2,3	190
	Fusión				-	
	Sólido				2	

2.11.2 Cálculos de Inercia térmica para los PCM

Tabla X Cálculos de inercia térmica de los PCM.

Inercia térmica de los PCM usados en la experimentación		
PCM	**Estado**	**Inercia térmica** $\left(\frac{J}{m^2 * K * s^{\frac{1}{2}}}\right)$
Glicerina sólida	Líquido	29,61
	Sólido	27,50
Manteca vegetal	Líquido	16,84
	Sólido	22,66
Parafina	Líquido	19,77
	Sólido	18,44

2.11.3 Cálculos de la tasa de transferencia de calor para los PCM encapsulados en cilindros de cristal, con los datos obtenidos en pruebas experimentales.

Condición experimental

Para la primera experimentación se realizaron ensayos utilizando tubos de ensayo como sistema de encapsulación inicial de los materiales de cambio de fase (parafina, glicerina sólida y manteca vegetal). En un primer procedimiento, los tubos se expusieron a un calentador a gas con el fin de inducir el proceso de fusión de los PCM. Posteriormente, con el objetivo de optimizar la transferencia térmica y obtener un calentamiento más homogéneo, se implementó un ducto pintado de color negro en el cual se introdujeron los tubos de ensayo, permitiendo así una absorción más eficiente. Una vez alcanzada la transición de fase y observada la fusión completa de los materiales, los tubos fueron retirados cuidadosamente para la toma de termografías mediante cámara térmica.

Tabla XI Tabla de datos obtenidos a partir de la experimentación.

Datos obtenidos de la experimentación con los PCM										
PCM	**Masa (g)**	**Rangos de temperatura de fusión**	**Temperatura inicial (°C)**	**Temperatura final (°C)**	**ΔT de enfriamiento en estado líquido (K)**	**ΔT de enfriamiento en estado sólido (K)**	**Tiempo antes de la fusión (s)**	**Tiempo de fusión (s)**	**Tiempo de enfriamiento completo**	**Tiempo total (s)**
Glicerina solida	15	38-55	98,4	22,1	43,4	15,9	558	388	1606	2552
Manteca vegetal	13	30-40	71,1	18,9	31,1	11,1	176	744	2824	4026
Parafina	15	46-68	79,5	25,8	11,5	20,2	22	184	1320	1526

Tabla XII Resultados de los calores calculados en las diferentes etapas del PCM en pasar de su estado líquido ha sólido.

Cálculos la tasa de transferencia de calor de los materiales PCM		
PCM	**Estado**	**Tasa de transferencia de calor (W)**
Glicerina sólida	Líquido	2,68
	Fusión	7,73
	Sólido	0,30
Manteca vegetal	Líquido	2,55
	Fusión	4,23
	Sólido	0,13
Parafina	Líquido	18,03
	Fusión	15,49
	Sólido	0,46

2.11.4 Comportamiento térmico del PCM encapsulado en cilindros de cristal: curvas de enfriamiento y termografías.

Estos aspectos se denotan en las figuras acotadas a continuación:

Glicerina

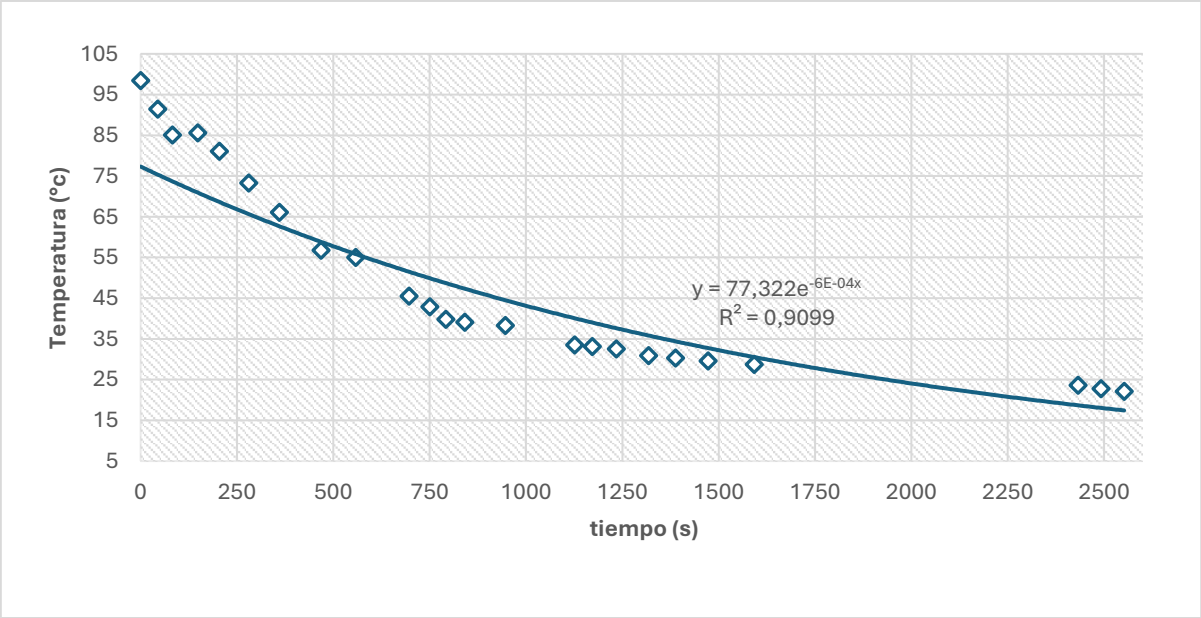


Fig. 18. Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos cilíndricos de la glicerina (Temperatura de fusión= 38-55 °C).

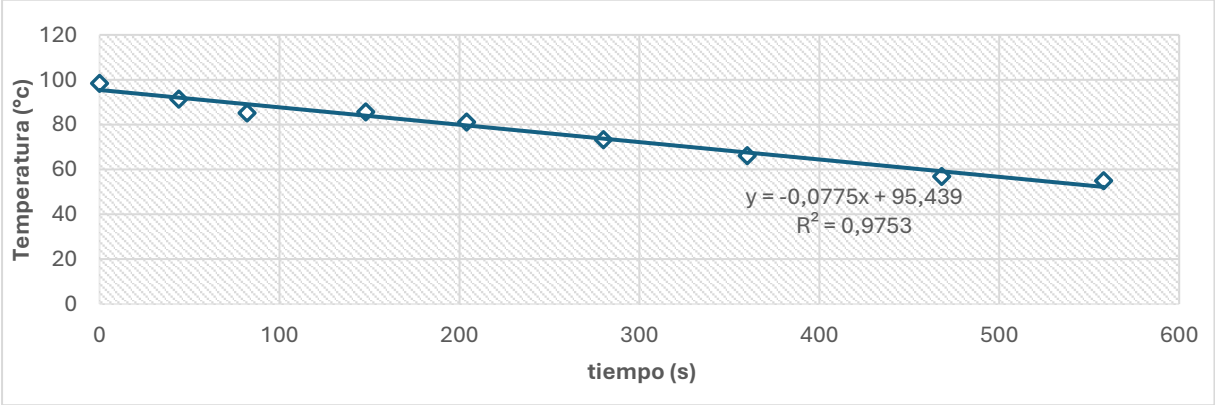


Fig. 19. Curva de enfriamiento del antes de la fase de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 55 °C)

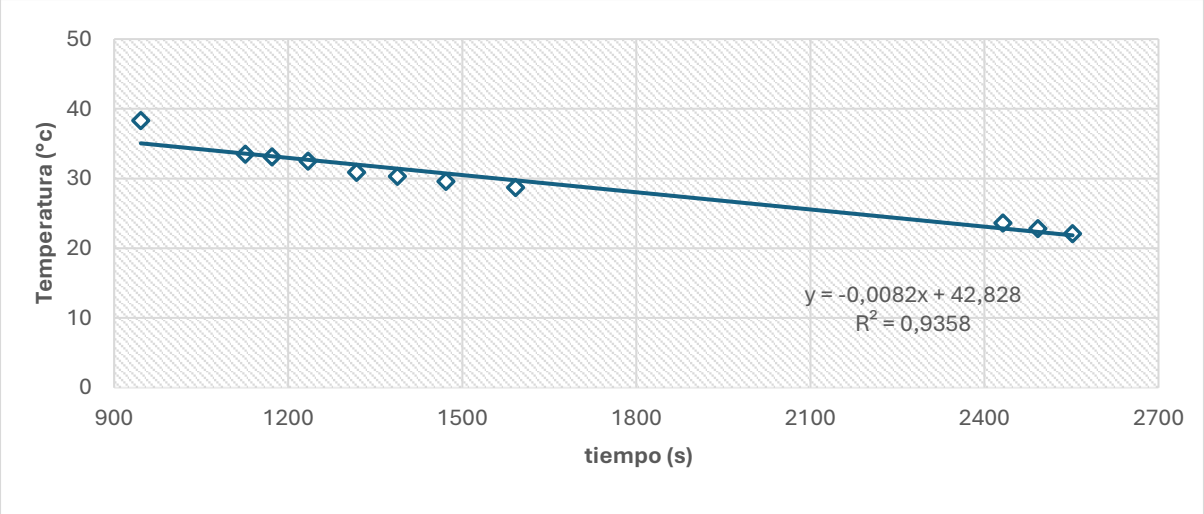


Fig. 20. Curva de enfriamiento del después de la de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 38 °C)

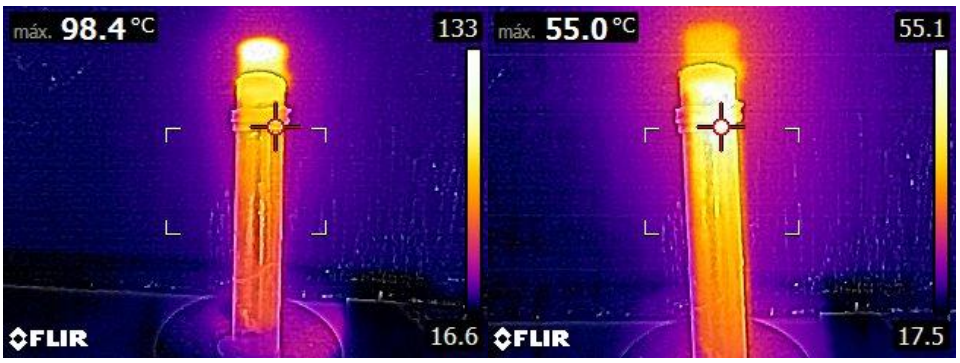


Fig. 21. Termografías de la glicerina encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 98,4 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 55°C)

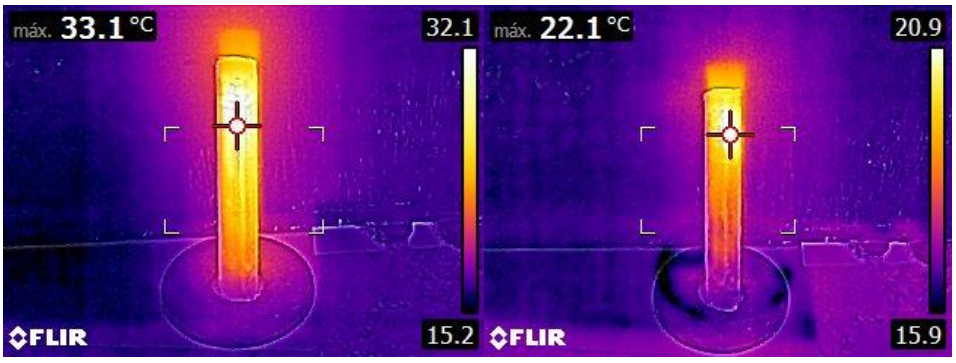


Fig. 22. Termografías de la glicerina encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 33,1 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 22,1 °C)

Manteca vegetal

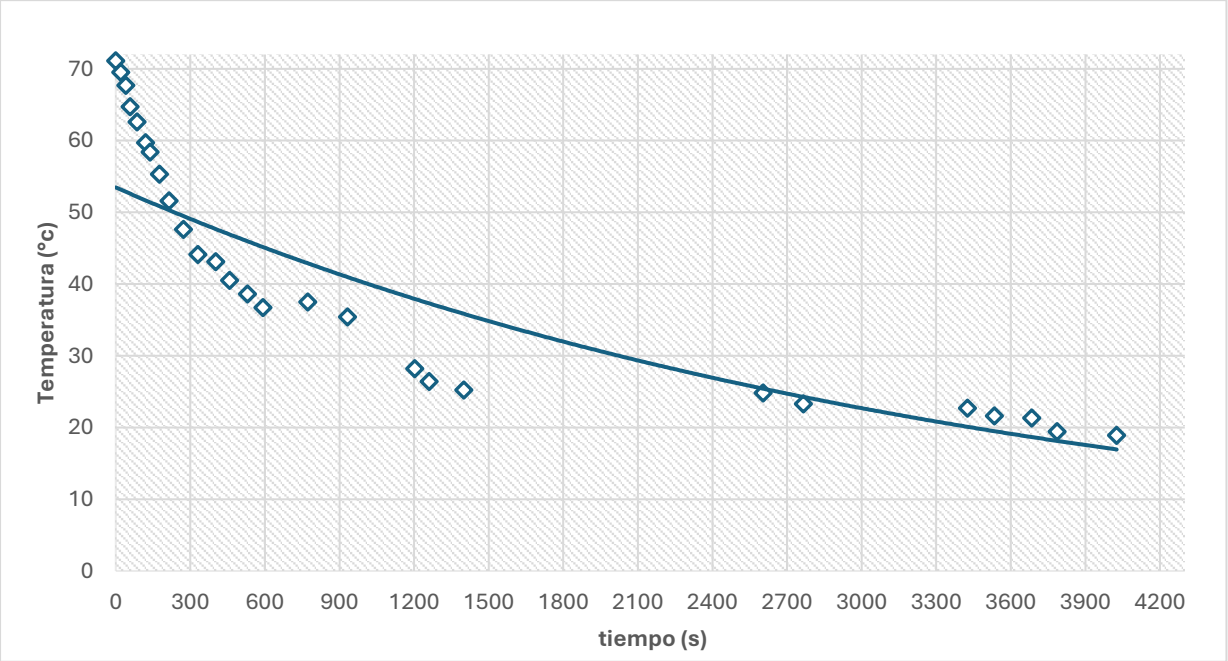


Fig. 23 Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos cilíndricos de la manteca vegetal (Temperatura de fusión= 30-40 °C)

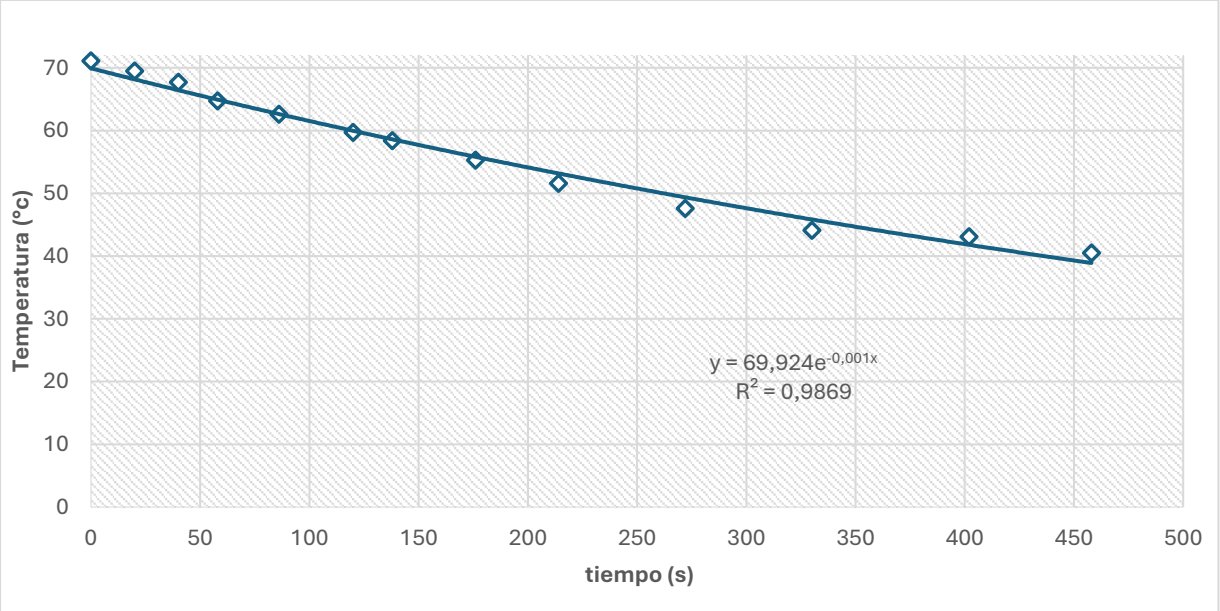


Fig. 24. Curva de enfriamiento del PCM antes de la de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 40 °C)

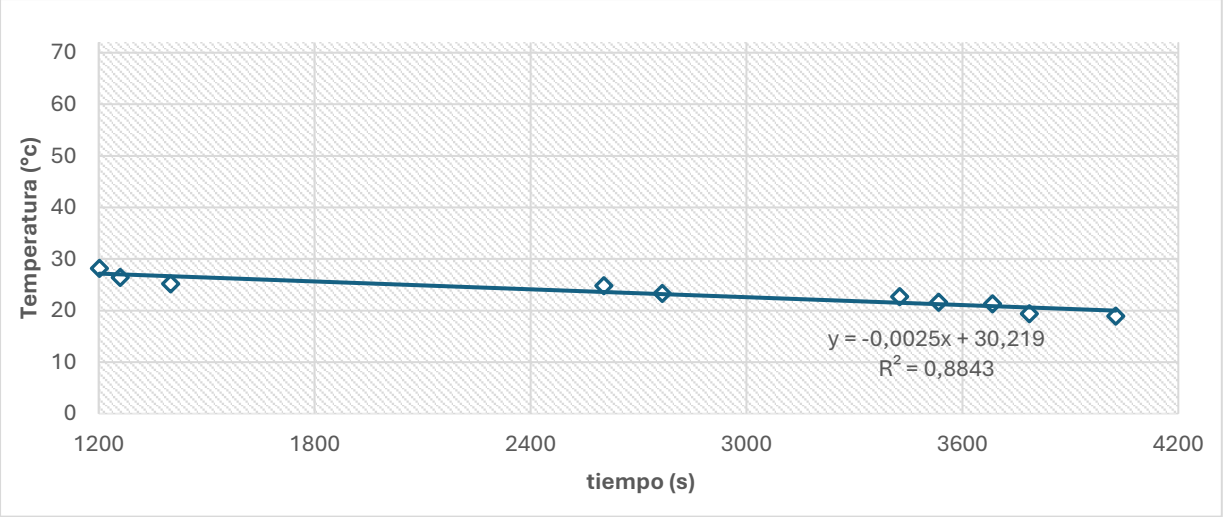


Fig. 25. Curva de enfriamiento del PCM después de la de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 30 °C)

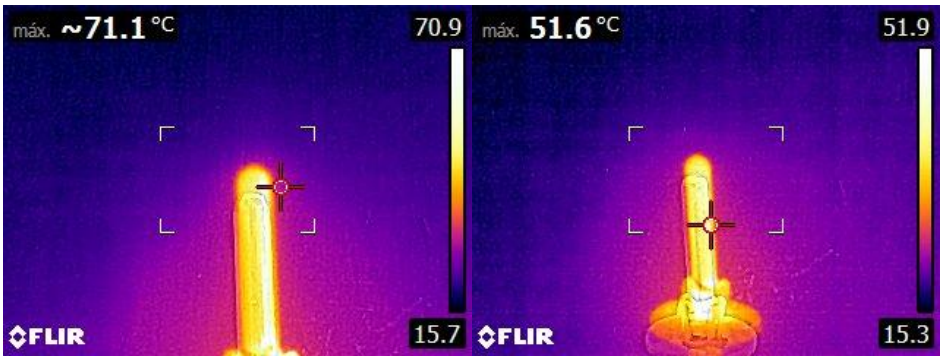


Fig. 26. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 71,1 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 51,6 °C)

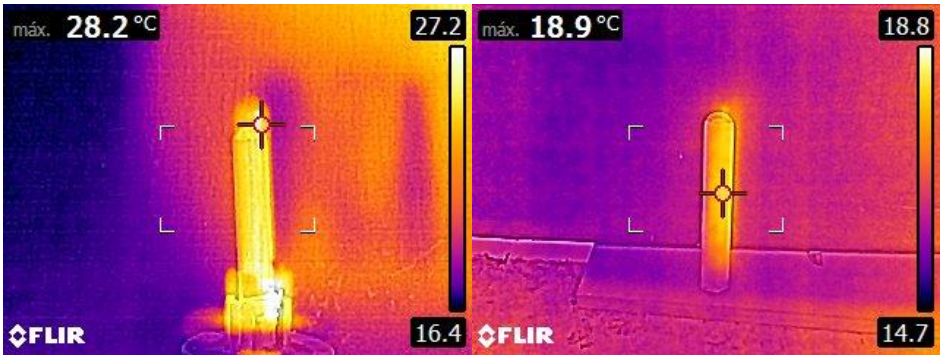


Fig. 27. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 28,2 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 18,9 °C)

Parafina

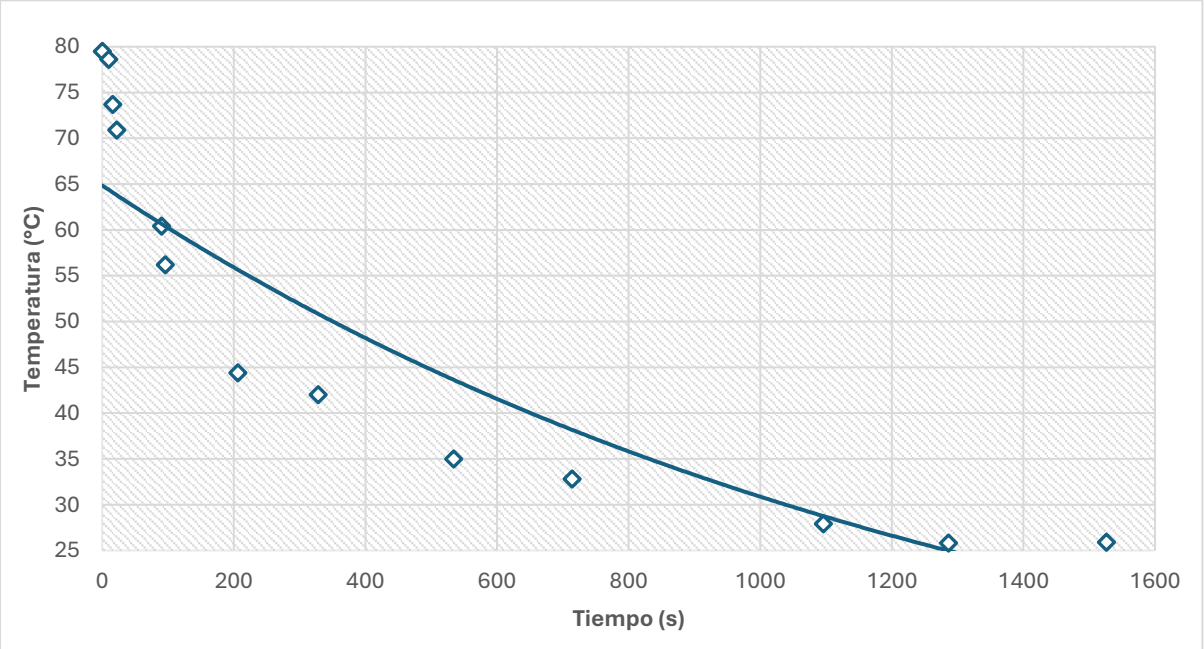


Fig. 28 Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos cilíndricos de la parafina (Temperatura de fusión= 46-68 °C).

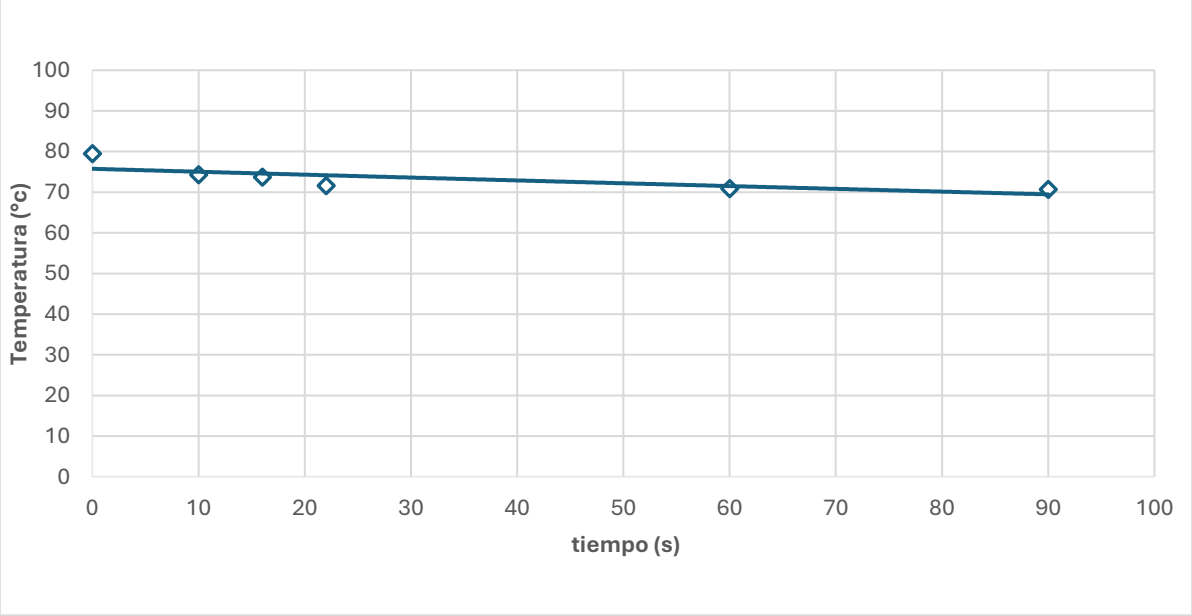


Fig. 29 Curva de enfriamiento del PCM antes de la de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 68 °C).

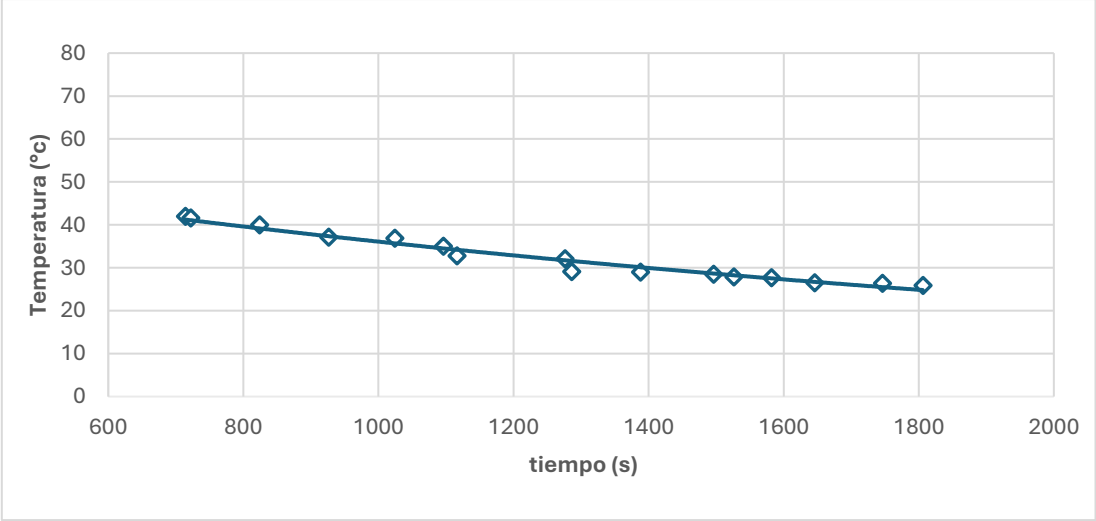


Fig. 30 Curva de enfriamiento del PCM después de la de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 46 °C)

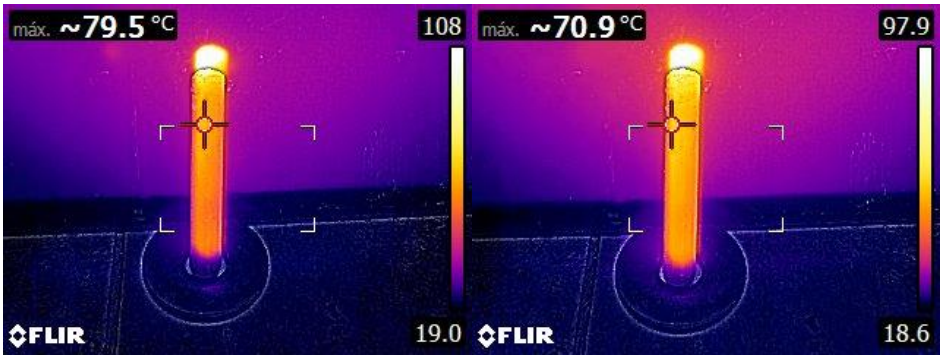


Fig. 31. Termografías de la parafina encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 79,5 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 70,9 °C)

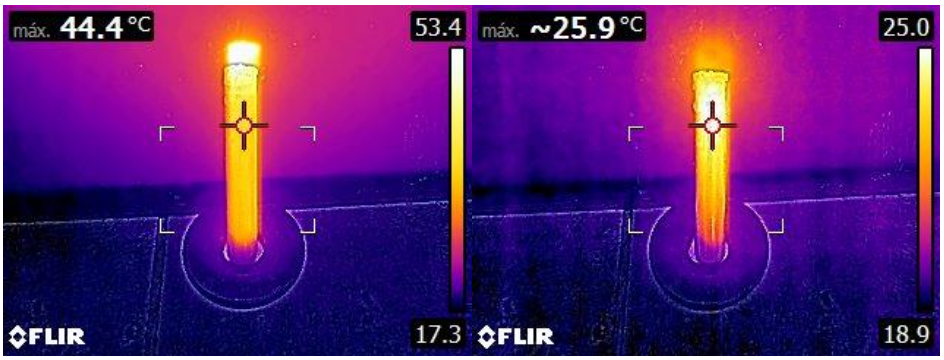


Fig. 32. Termografías de la parafina encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 44,4 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 25,9 °C)

2.11.5 Cálculos de la tasa de transferencia de calor para los PCM encapsulados en placas rectangulares de cristal, con los datos obtenidos en pruebas experimentales.

Condición experimental

En la segunda fase de la experimentación se modificó el sistema de encapsulación, empleando dos placas de cristal rectangulares entre las cuales se colocó el material de cambio de fase (PCM). Esta decisión respondió a la necesidad de disponer de una mayor superficie de observación. En los ensayos preliminares con tubos de ensayo el área de visualización resultó limitada para apreciar con claridad las variaciones de temperatura durante la transición de fase.

Tabla XIII Datos obtenidos a partir de la experimentación con los PCM encapsulados en placas rectangulares de cristal.

Datos obtenidos de la experimentación con los PCM									
PCM	**Rangos de temperatura de fusión**	**Temperatura inicial (°C)**	**Temperatura ambiente (°C)**	**ΔT de enfriamiento en estado líquido (K)**	**ΔT de enfriamiento en estado sólido (K)**	**Tiempo antes de la fusión (s)**	**Tiempo de fusión (s)**	**Tiempo de enfriamiento completo (s)**	**Tiempo total (s)**
Glicerina solida	38-55	79,4	26,3	24,4	11,7	558	842	764	2164
Manteca vegetal	30-40	72,4	20,1	32,4	9,9	600	578	2076	3254
Parafina	46-68	74,3	26,4	6,3	19,6	96	542	1240	1878

Tabla XIV Resultados de los calores calculados en las diferentes etapas del PCM en pasar de su estado líquido ha sólido.

Cálculos la tasa de transferencia de calor de los materiales PCM		
PCM	**Estado**	**Tasa de transferencia de calor (W)**
Glicerina solida	Líquido	3,02
	Fusión	7,15
	Sólido	0,92
Manteca vegetal	Líquido	4,78
	Fusión	10,90
	Sólido	0,23
Parafina	Líquido	7,25
	Fusión	9,86
	Sólido	0,95

2.11.6 Comportamiento térmico del PCM encapsulados en placas rectangulares de cristal: curvas de enfriamiento y termografías.

Estos aspectos se denotan en las siguientes tablas acotadas a continuación:

Glicerina

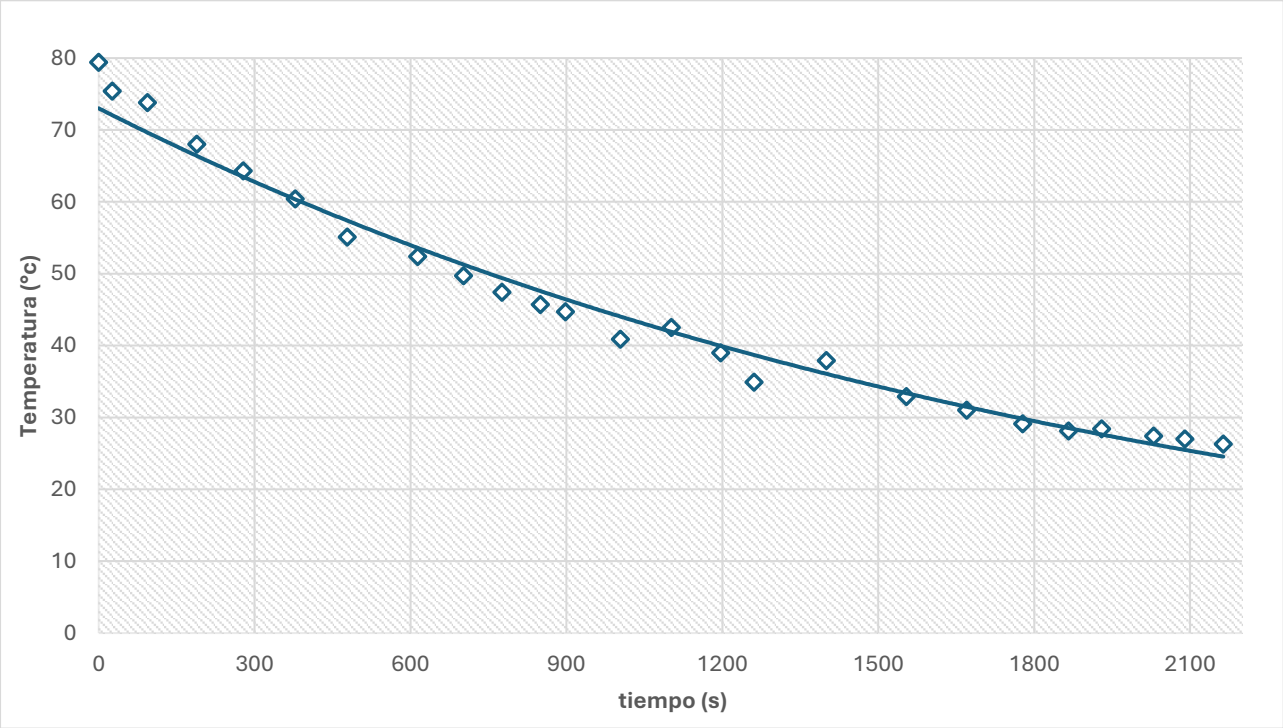


Fig. 33. Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos rectangulares de la glicerina (Temperatura de fusión= 38-55 °C).

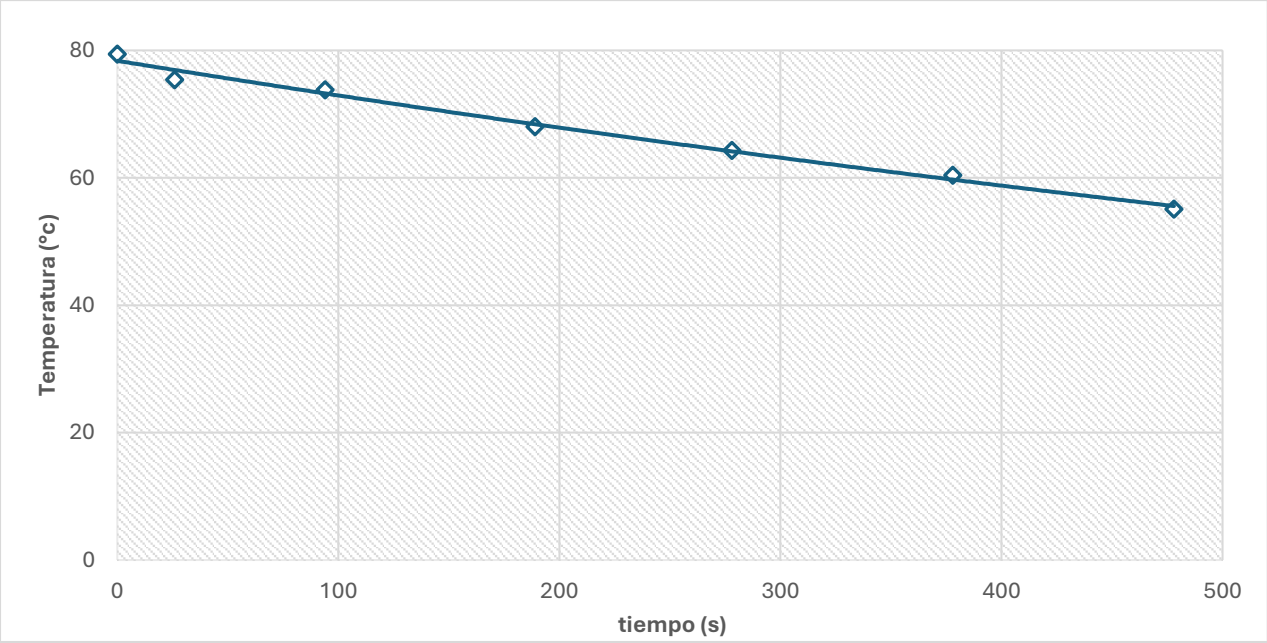


Fig. 34. Curva de enfriamiento del PCM antes de la de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 55 °C)

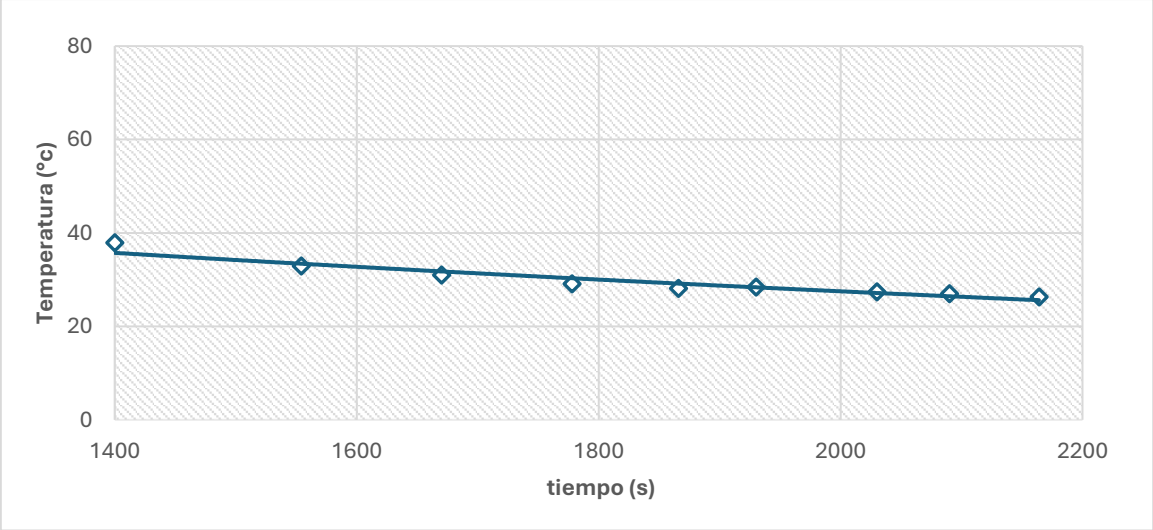


Fig. 35. Curva de enfriamiento del PCM después de la fusión (Temperatura de fin de la fusión= 38 °C)

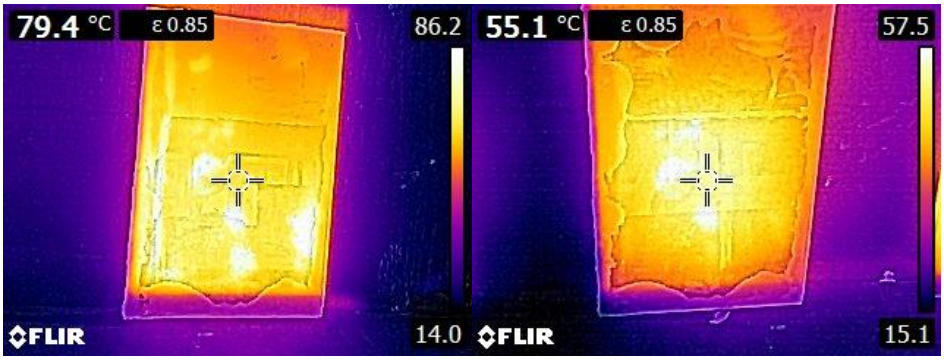


Fig. 36. Termografías de la glicerina encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 79.4 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 55,1 °C)

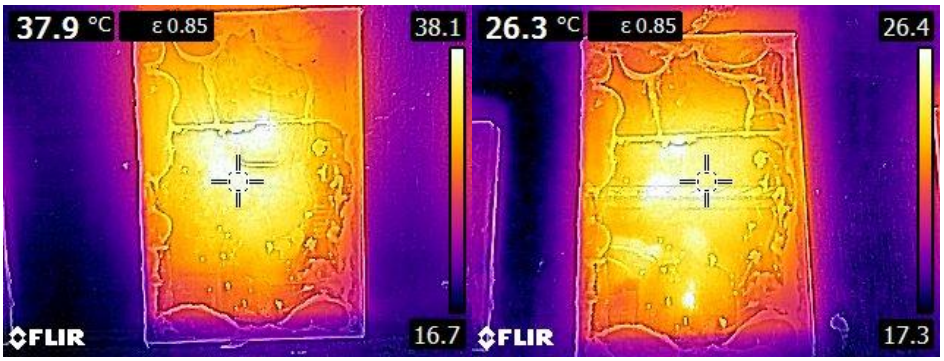


Fig. 37. Termografías de la glicerina encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 37,9 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 26,3 °C)

Manteca vegetal

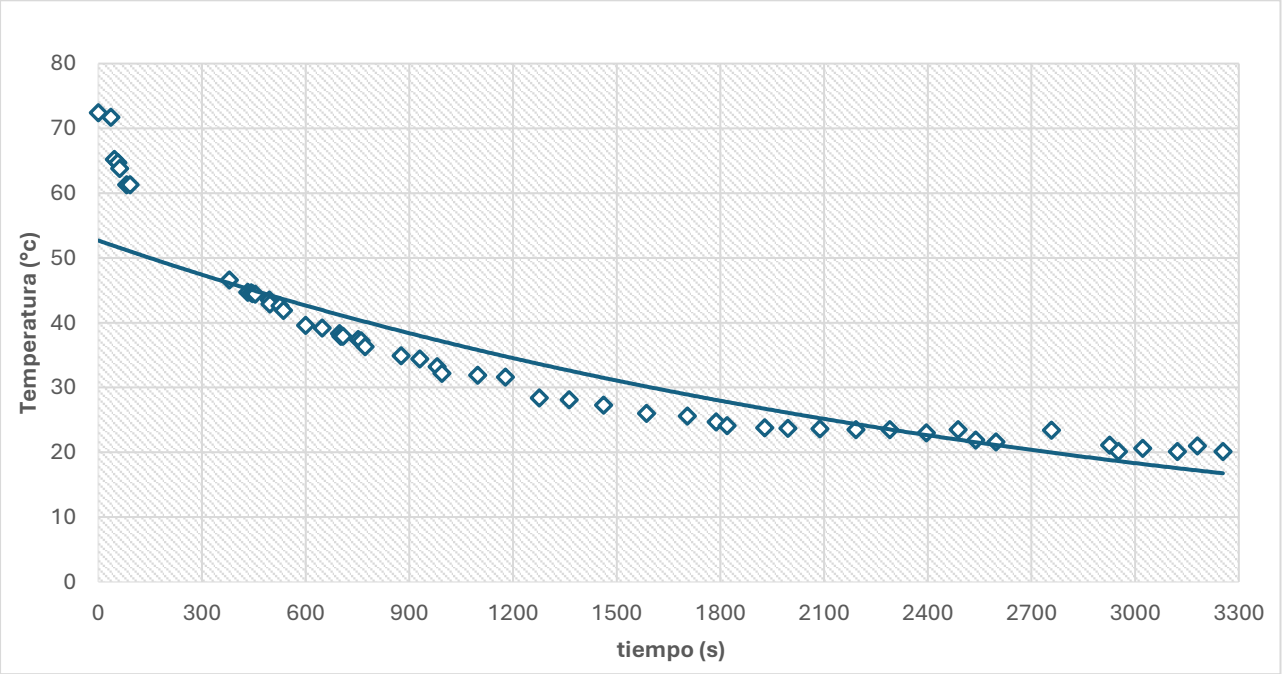


Fig. 38 Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos rectangulares de la manteca vegetal (Temperatura de fusión= 30-40 °C)

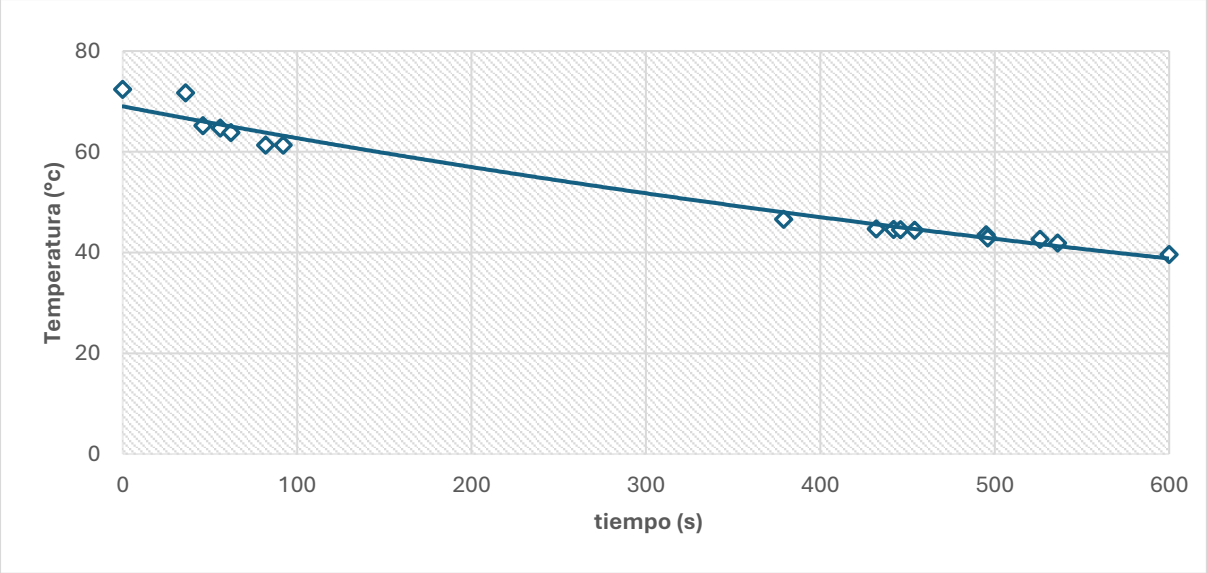


Fig. 39. Curva de enfriamiento del PCM antes la fusión (Temperatura de inicio de fusión= 40 °C)

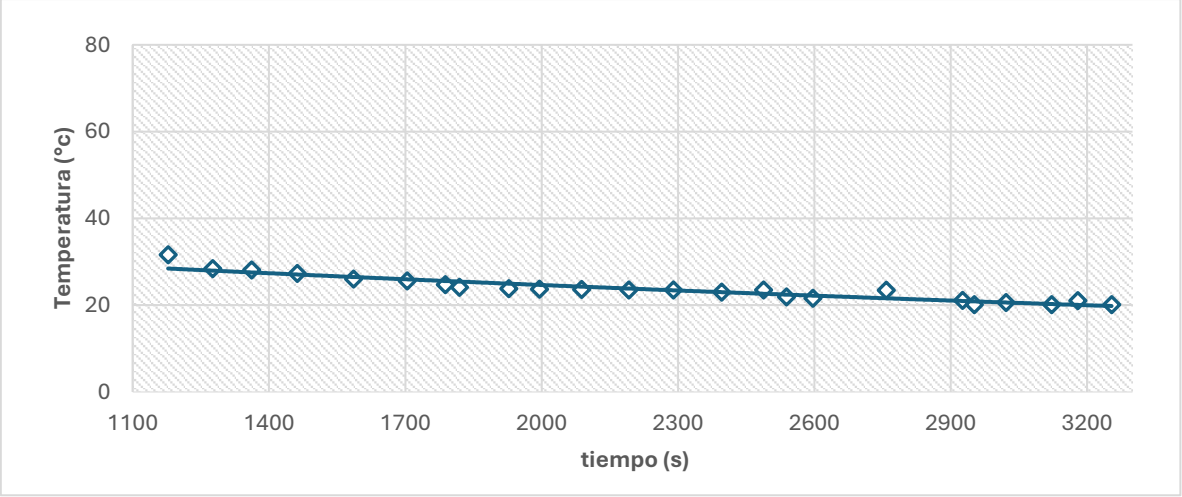


Fig. 40. Curva de enfriamiento del PCM después la fusión (Temperatura de fin de la fusión= 30 °C)

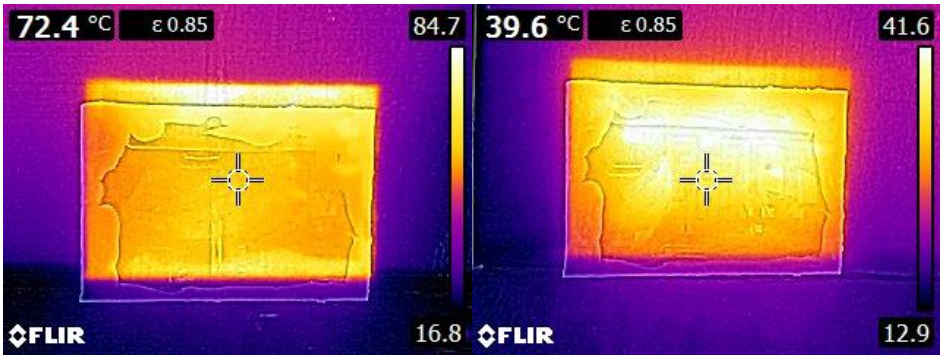


Fig. 41. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 72,4 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 39,6 °C)

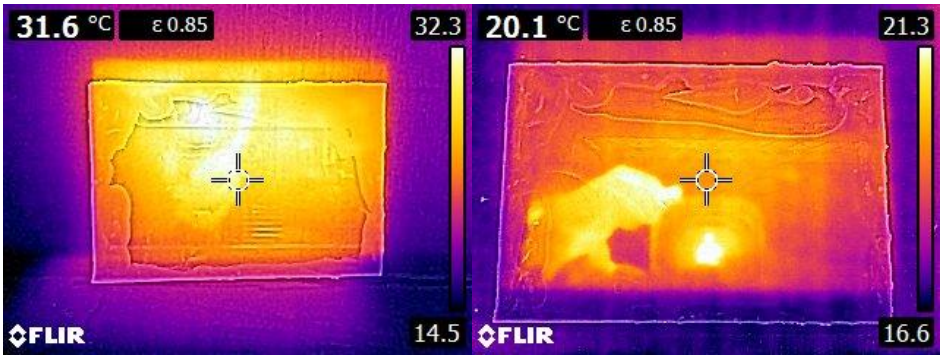


Fig. 42. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 31,6 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 20,1 °C)

Parafina

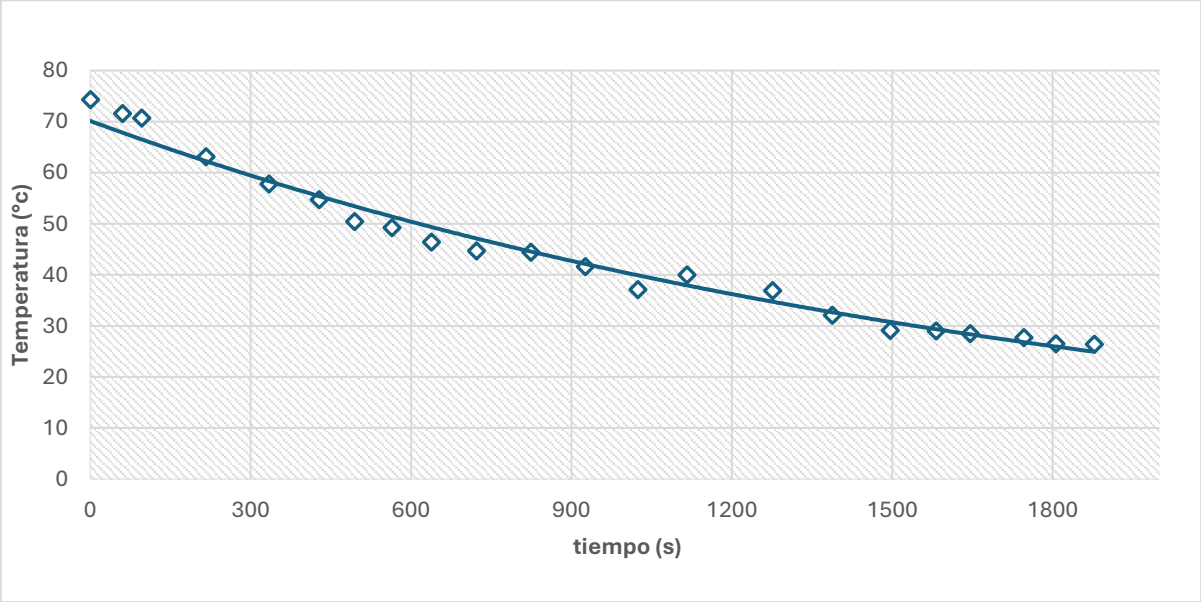


Fig. 43. Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos rectangulares de la parafina (Temperatura de fusión= 46-68 °C).

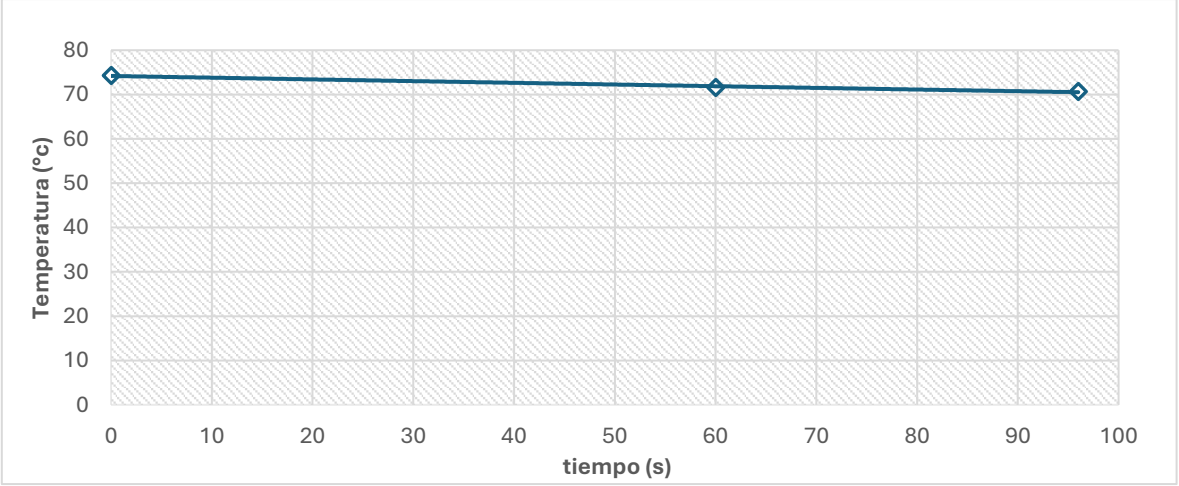


Fig. 44. Curva de enfriamiento del PCM antes de la fase de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 68 °C).

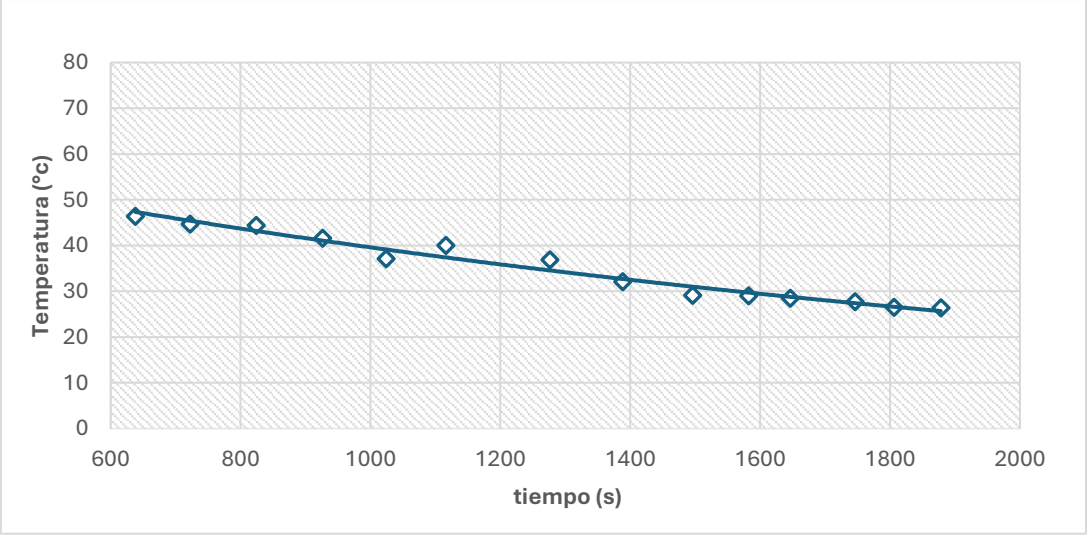


Fig. 45. Curva de enfriamiento del PCM después de la fase de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 46 °C).

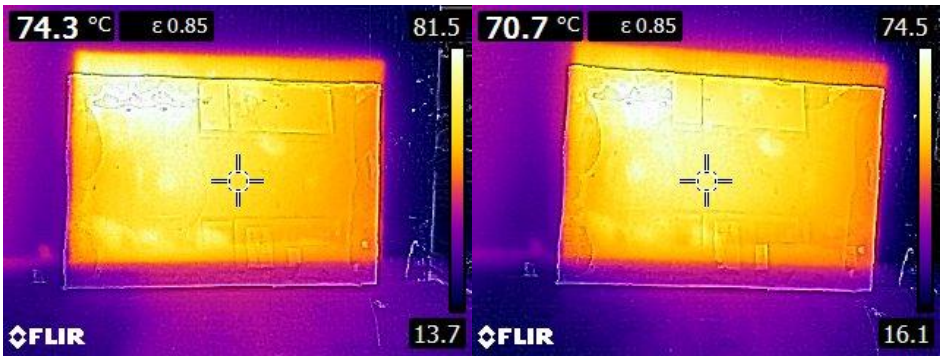


Fig. 46. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 74,3 °C) (Temperatura de inicio de fusión=70,7 °C)

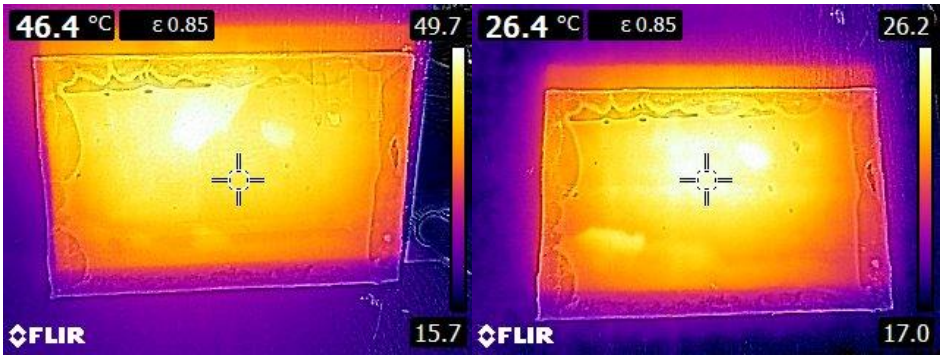


Fig. 47. Termografías de la manteca encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 46,4 °C) (Temperatura final de enfriamiento= 26,4 °C)

2.11.7 Cálculos para el PCM encapsulados en recipiente circular de plástico, con los datos obtenidos en pruebas experimentales.

Condición experimental

En la última experimentación se emplearon envases acrílicos de geometría circular como medio de encapsulación de los materiales de cambio de fase (PCM). La elección de este diseño respondió a la necesidad de optimizar la observación termográfica. La ausencia de esquinas, a diferencia de la encapsulación rectangular, favorece una distribución térmica más uniforme y una mejor visualización de los gradientes de temperatura en las imágenes obtenidas.

Tabla XV Datos obtenidos a partir de la experimentación con los PCM encapsulados en envases circulares.

Datos obtenidos de la experimentación con los PCM									
PCM	**Rangos de temperatura de fusión**	**Temperatura inicial (°C)**	**Temperatura ambiente (°C)**	**ΔT de enfriamiento en estado líquido (K)**	**ΔT de enfriamiento en estado sólido (K)**	**Tiempo antes de la fusión (s)**	**Tiempo de fusión (s)**	**Tiempo de enfriamiento completo (s)**	**Tiempo total (s)**
Parafina	68-46	100	30,1	31,6	15,9	100	360	1880	2360

Tabla XVI Resultados cálculos de transferencia de calor en las diferentes etapas del PCM en pasar de su estado líquido ha sólido.

Cálculos de la tasa de transferencia de calor de la parafina		
PCM	**Estado**	**Tasa de transferencia de calor (W)**
Parafina	Líquido	46,52
	Fusión	33,78
	Sólido	1,08

Tabla XVII Resultados de los calores calculados del PCM.

Cálculos de calor de la parafina		
PCM	**Estado**	**Calor (J)**
Parafina	Líquido	4,23
	Fusión	7,6
	Sólido	2,48

2.11.8 Comportamiento térmico del PCM encapsulado en envase circular de plástico: curvas de enfriamiento y termografías.

En las figuras 26,27 y 28 se observan las curvas de enfriamiento del PCM desde el estado líquido, el cambio de y en el estado sólido respectivamente.

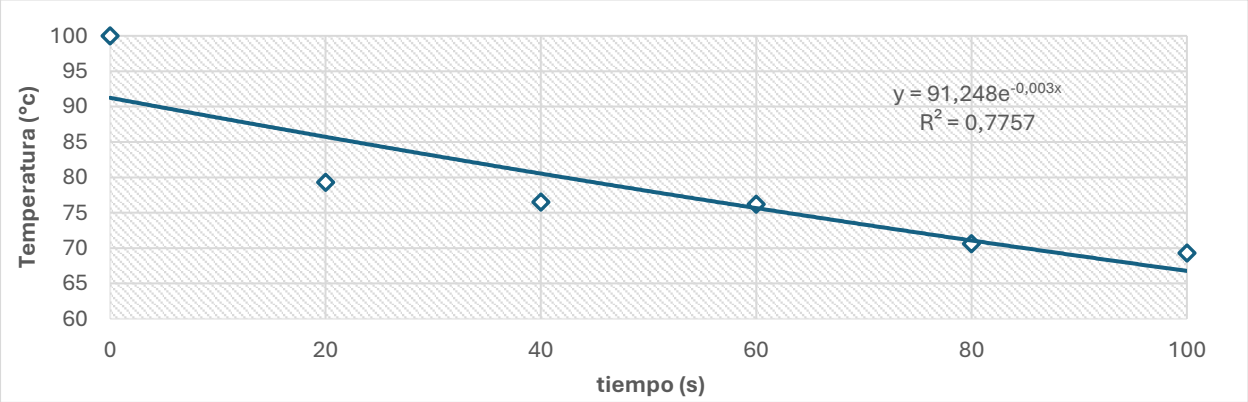


Fig. 48 Curva de enfriamiento del PCM antes de la fase de fusión (Temperatura de inicio de fusión= 68 °C).

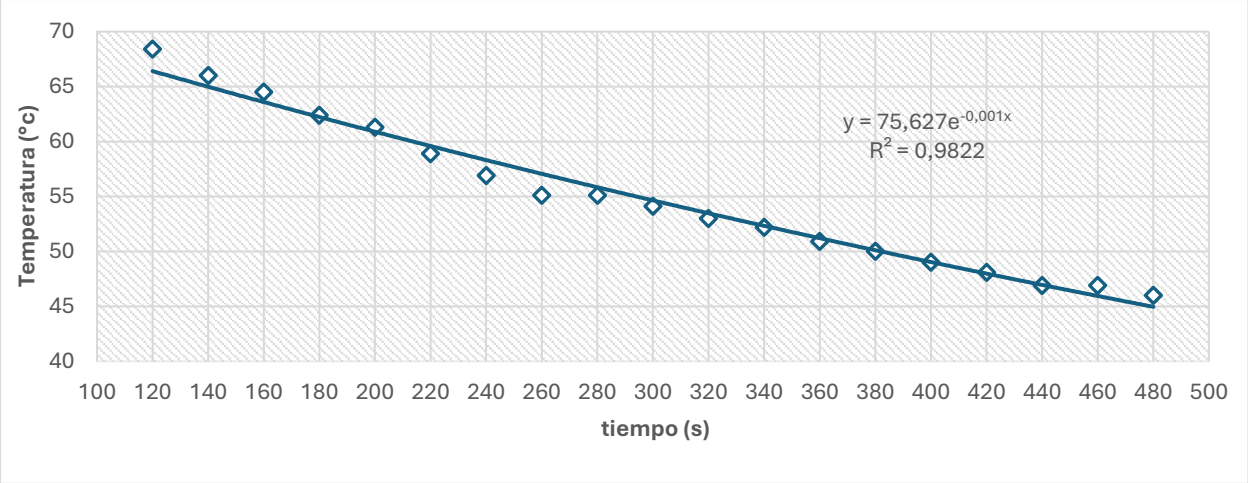


Fig. 49 Curva de enfriamiento obtenida de las mediciones termográficas de los encapsulamientos circulares de la parafina (Temperatura de fusión= 68-46 °C).

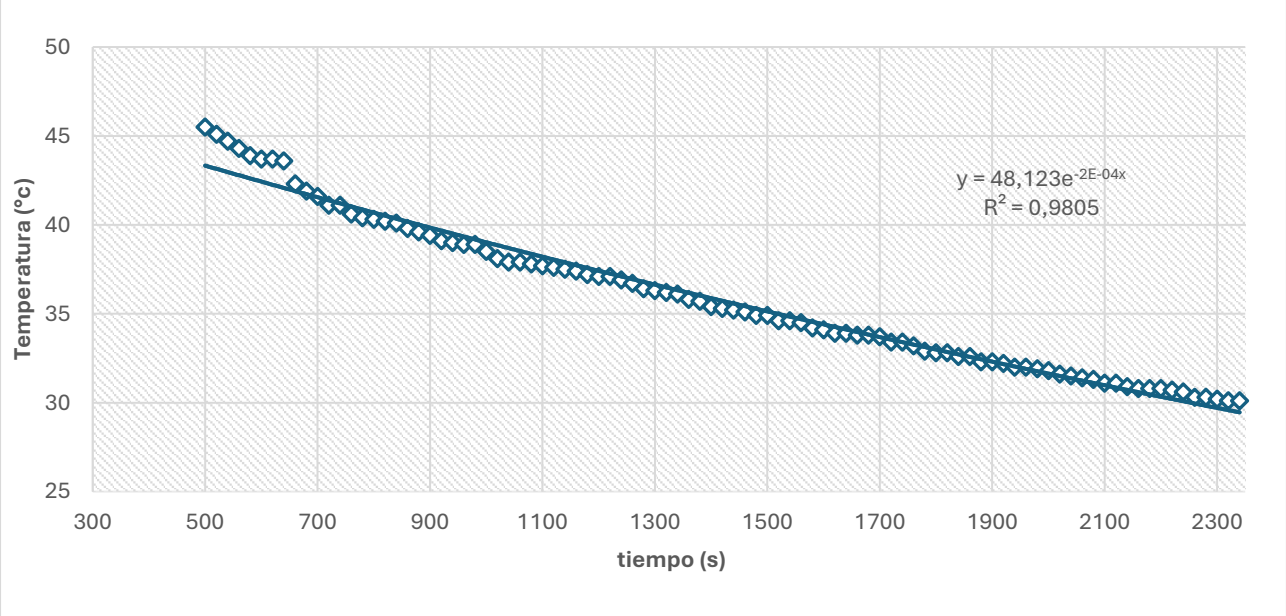


Fig. 50 Curva de enfriamiento del PCM después de la fase de fusión (Temperatura de fin de la fusión= 46 °C).

En las termografías obtenidas en esta experimentación podemos observar mediate la paleta de colores las diferentes zonas de temperatura que el PCM tiene al momento de enfriarse

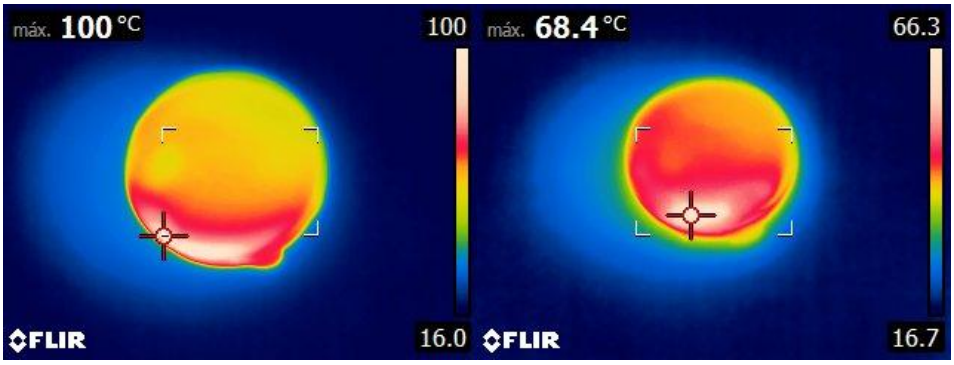


Fig. 51 Termografías de la parafina encapsulada (Temperatura inicial de enfriamiento= 100 °C) (Temperatura de inicio de fusión= 68,4 °C).

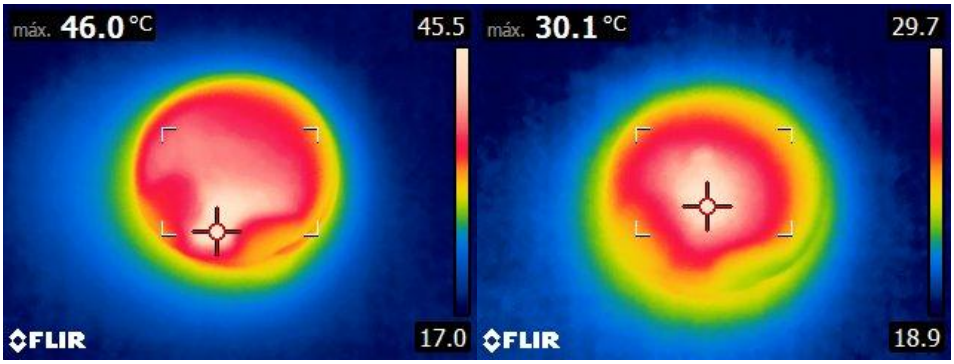


Fig. 52 Termografías de la parafina encapsulada (Temperatura fin de la fusión= 46, °C) (Temperatura final de enfriamiento= 30,1 °C).

Además, en esta experimentación se realizaron curvas de la energía que le restaba por liberar al PCM y de la fracción líquida del mismo como se pueden observar en las figuras 52 y 53 respectivamente.

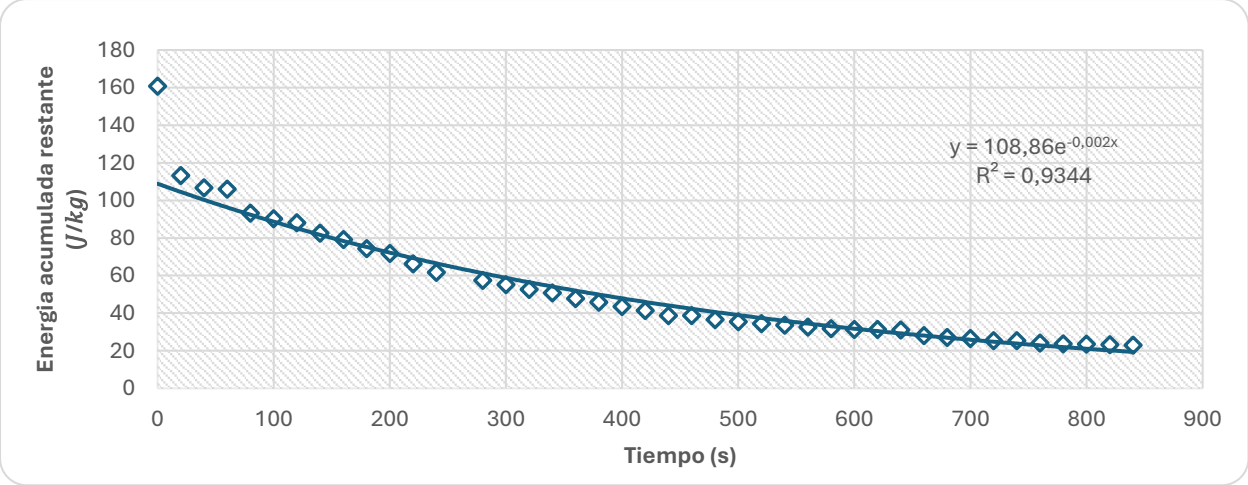


Fig. 53 Curva de Liberación Energía de la parafina

La figura 54 muestra el comportamiento de la energía acumulada restante en la parafina durante el proceso de enfriamiento. La tendencia exponencial decreciente ($y = 108{,}86e^{-0{,}002x}$) con un coeficiente de determinación $R^2 = 0{,}9344$ evidencia un alto ajuste del modelo a los datos experimentales, lo que indica una liberación de energía térmica bien definida a lo largo del tiempo.

Como primera observación se tienes que la curva desciende rápidamente en los primeros 200 segundos lo que se interpreta como la solidificación del PCM zona donde existe mayor transferencia de calor latente. En la siguiente zona de la curva se observa una curva de menor pendiente lo que significa que existe una menor liberación de calor al ambiente

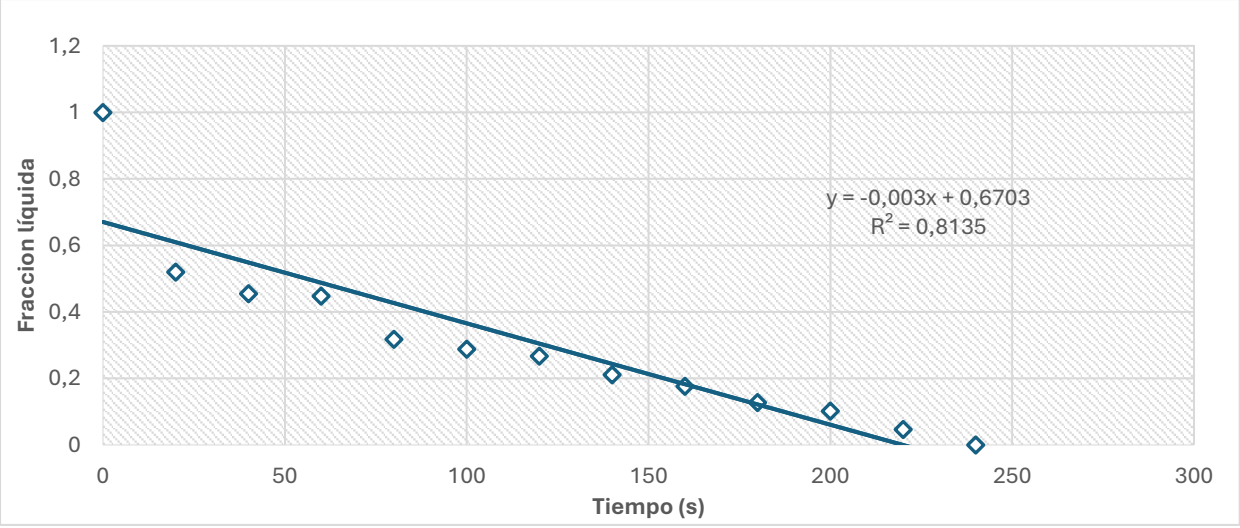


Fig. 54 Curva de Fracción líquida de la parafina.

La figura 55 presenta la evolución de la fracción líquida de la parafina en función del tiempo durante el proceso de solidificación. La relación lineal ($y = -0{,}003x + 0{,}6703$) con $R^2 = 0{,}8135$ indica una disminución casi lineal de la fracción líquida, mostrando que el material transita de estado líquido a sólido de forma progresiva y uniforme.

En los primeros instantes del proceso, la fracción líquida disminuye de manera más marcada, reflejando una alta tasa de solidificación inicial, que coincide con la zona de mayor pendiente observada en la curva de liberación de energía. A medida que avanza el tiempo, la fracción líquida tiende a cero, indicando la finalización de la transición de fase y la estabilización térmica del material.

El valor de $R^2 = 0{,}8135$ no muestra que existieron gradientes de energía a la hora del enfriamiento de igual manera la transferencia de calor del PCM no fue uniforme ya sea debido a la conductividad térmica del envase de encapsulado o a la del material en su interior.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos al evaluar paneles con materiales de cambio de fase (PCM) como parafina, manteca vegetal y glicerina sólida. Se analizaron su capacidad de absorber, almacenar y liberar energía térmica bajo condiciones controladas. Los resultados mostraron diferencias significativas en el comportamiento térmico de cada PCM, destacándose algunos por su mayor estabilidad en los ciclos de fusión y solidificación.

3.1.1 Cálculos de incertidumbre

Los análisis presentes se han acompañado de un análisis de incertidumbre direccionados a los equipos de medición. Temperatura fue registrada mediante una cámara termográfica y un pirómetro infrarrojo, con incertidumbres estimadas de ±2 °C y ±1–2 °C, respectivamente. Estos valores son valores típicos de error en estos instrumentos de medida.

Este análisis se realizó con un propósito comparativo.

Tabla XVIII Cálculos de incertidumbre de temperatura.

$T_{inicial}$	T_{final}	t_{total}	$Error$	ΔT	$u\Delta T$
100	23	2360	±2	77	2,83

Según la ley de propagación de incertidumbres ISO/IEC Guide 98-3 (GUM), se calculó el valor de la incertidumbre para el resultado de transferencia de calor.

La diferencia de temperaturas entre el inicio y el final del ensayo fue de 77 °C, con una incertidumbre asociada de ±2.8 °C, calculada mediante propagación de errores. Dado que la tasa de transferencia de calor depende principalmente de la diferencia de temperatura, se estimó una incertidumbre relativa aproximada del 4%. Este nivel de error se considera aceptable para el análisis del comportamiento térmico y la comparación de las distintas etapas del ciclo térmico del PCM.

3.1.2 Discusión de resultados

Durante los ensayos de enfriamiento realizados para los tres materiales de cambio de fase: manteca vegetal, parafina y glicerina sólida, se obtuvieron distintos resultados de cálculos y curvas donde se analizó como PCM final la parafina.

A partir de los resultados obtenidos en la experimentación, búsqueda de literatura y cálculos se comparó los resultados con artículos donde trabajasen con la parafina como PCM, de esta manera se compara con un ensayo donde se haya utilizado un material similar.

3.1.2.1 Tasa de transferencia de calor de los materiales PCM

En esta sección se analizan los resultados obtenidos para la tasa de transferencia de calor de la parafina, considerando sus tres estados térmicos: líquido, fusión y sólido. Los valores fueron obtenidos a partir de los datos experimentales de temperatura y tiempo durante el proceso de enfriamiento.

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla XIX Resultados de la comparación de los distintos tipos de encapsulamiento usados en la experimentación.

PCM	Estado	Cilindro (W)	Placa (W)	Circular (W)	Comparación
Parafina	Líquido	18,03	7,25	46,52	Mayor transferencia en circular
	Fusión	15,49	9,86	33,780	Mayor transferencia en circular
	Sólido	0,46	0,95	1,08	Mayor transferencia en circular

3.1.2.2 Comportamiento térmico

Durante el proceso de enfriamiento de los materiales de cambio de fase encapsulados en cilindros, placas rectangulares de cristal y en envase rectangular de plástico, se observó claramente la presencia de mesetas térmicas asociadas a la solidificación de los PCM. Estas mesetas se identifican en las curvas de temperatura frente al tiempo como tramos donde la

temperatura se mantiene relativamente constante, mientras el material libera su calor latente de cambio de fase. Lo que muestra que este fenómeno es consistente con los principios termodinámicos del cambio de fase, en los que, durante la solidificación, la energía interna del material disminuye sin que ello se refleje de inmediato en una variación significativa de temperatura, debido a la liberación controlada del calor latente de fusión. La duración de esta meseta térmica está directamente relacionada con la capacidad del material para almacenar o liberar energía térmica.

A continuación, se presentan los tiempos de meseta térmica (solidificación) identificados en los ensayos experimentales:

Tabla XX Cuadro comparativo de la duración de la meseta térmica del PCM.

PCM	Tipo de encapsulado	Duración de la meseta térmica (s)	Comentario
Parafina	Cilíndrico	190	Meseta más corta: fusión rápida, probablemente por mejor contacto térmico y menor resistencia térmica entre el PCM y la pared del encapsulado; favorece ciclos rápidos de carga/descarga.
	Placas rectangulares	578	Meseta térmica más larga
	Circular	360	A diferencia de la anteriores este posee una meseta térmica moderada por debajo de la meseta del encapsulamiento de placas rectangulares pero superior al cilíndrico.

3.1.2.3 Liberación de energía y fracción líquida del PCM

La comparación entre ambas curvas permite evidenciar la correspondencia entre la liberación de energía y la evolución de la fracción líquida. Durante la etapa inicial, la energía acumulada disminuye rápidamente mientras la fracción líquida se reduce significativamente, indicando

que la mayor parte del calor liberado corresponde al calor latente de solidificación. En etapas posteriores, la energía liberada disminuye de forma más lenta, asociada al calor sensible del material ya solidificado.

Por lo que se pude decir que los resultados obtenidos con parafina como PCM, fueron aceptables y este material es adecuado para realizar más pruebas por sus propiedades termo físicas y su forma controlada de transferir el calor al ambiente. Debido a que no sufre cambios significativos en la etapa de fusión es un material adecuado para aplicaciones que necesiten de la liberación de energía constante durante un rango de tiempo amplio.

3.1.2.4 Discusión crítica y comparación con estudios similares.

Los resultados obtenidos muestran que la parafina encapsulada presenta un comportamiento térmico típico de los materiales de cambio de fase, evidenciado por la aparición de una meseta térmica durante el proceso de fusión. Esta etapa está directamente relacionada con el almacenamiento de calor latente y permitió mantener la temperatura del sistema prácticamente constante durante un intervalo apreciable, lo que confirma el potencial de este material como medio de almacenamiento de energía térmica.

Durante la etapa de solidificación se observó una disminución progresiva en la tasa de transferencia de calor, lo cual puede explicarse por el aumento de la resistencia térmica del material y por su baja conductividad térmica, una característica ampliamente documentada en la literatura. Investigaciones previas sobre parafina encapsulada reportan rangos de fusión similares y un comportamiento comparable durante los ciclos de carga y descarga térmica, lo que respalda la consistencia de los resultados obtenidos en este estudio.

Sin embargo, se identificaron diferencias en los tiempos de enfriamiento al compararlos con estudios realizados bajo condiciones más controladas. Estas variaciones pueden estar asociadas a factores como las condiciones ambientales del ensayo y el tipo de encapsulado empleado, lo que pone de manifiesto la influencia del entorno experimental en el desempeño térmico del PCM.

A pesar de las limitaciones relacionadas con la baja conductividad térmica del material y con la incertidumbre propia de los instrumentos de medición, los resultados obtenidos permiten concluir que la parafina encapsulada representa una alternativa viable para aplicaciones de

almacenamiento de energía térmica. En este sentido, se considera pertinente continuar con investigaciones que incorporen mejoras en la transferencia de calor, mediante el uso de aditivos conductores y técnicas de encapsulación más avanzadas, con el fin de optimizar su rendimiento en futuras aplicaciones.

Comparación de inercia térmica entre PCM

Se observa que los materiales orgánicos como la parafina RT8 presentan valores de inercia moderados, mientras que el acetato de sodio, perteneciente al grupo de los inorgánicos, muestra los valores más altos.

Tabla XXI Inercia térmica de la Parafina RT8 [11].

PCM de referencia			
PCM	**Grupo PCM**	**Estado**	**Inercia térmica** $\left(\frac{J}{m^2*K*s^{\frac{1}{2}}}\right)$
Parafina RT8	Orgánico	Líquido	17,55
		Sólido	17,89

En contraste, los materiales estudiados en esta experimentación alcanzan inercia térmica dentro de un rango competitivo. Destaca la parafina, que exhibe un comportamiento térmico similar al material de referencia, especialmente durante la fusión. Esto sugiere que los PCM seleccionados, a pesar de ser de bajo costo y fácil acceso, poseen un desempeño térmico aceptable, lo cual los hace viables para aplicaciones de climatización pasiva y almacenamiento térmico.

Tabla XXII Inercia térmica de la parafina usada en la experimentación.

Inercia térmica del PCM usados en la experimentación		
PCM	**Estado**	**Inercia térmica** $\left(\frac{J}{m^2*K*s^{\frac{1}{2}}}\right)$
Parafina	Líquido	19,77
	Sólido	18,44

Como se observa en el análisis la parafina utilizada en los experimentos tiene una inercia térmica más que consistente con la de la parafina comercial RT8, la inercia térmica de la parafina experimental (19,77 $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}}}$) es levemente mayor que la de la RT8 (17,89 $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}}}$); en estado líquido, la parafina experimental tiene una inercia térmica superior (18,44 $\left(\frac{J}{m^2 * K * s^{\frac{1}{2}}}\right)$ frente a 17,89 $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m^2 \cdot K \cdot s^{1/2}}}$Esto nos sugiere que a medida que la parafina se funda, nuestro experimental retiene más energía térmica, lo que podría favorecer la estabilidad de la térmica y mejorar el almacenamiento de calor del panel. La tendencia observada, con una ligera disminución de la inercia térmica del sólido al líquido, es coherente con el comportamiento esperado de los materiales de cambio de fase (PCM).

Análisis comparativo de las curvas de enfriamiento

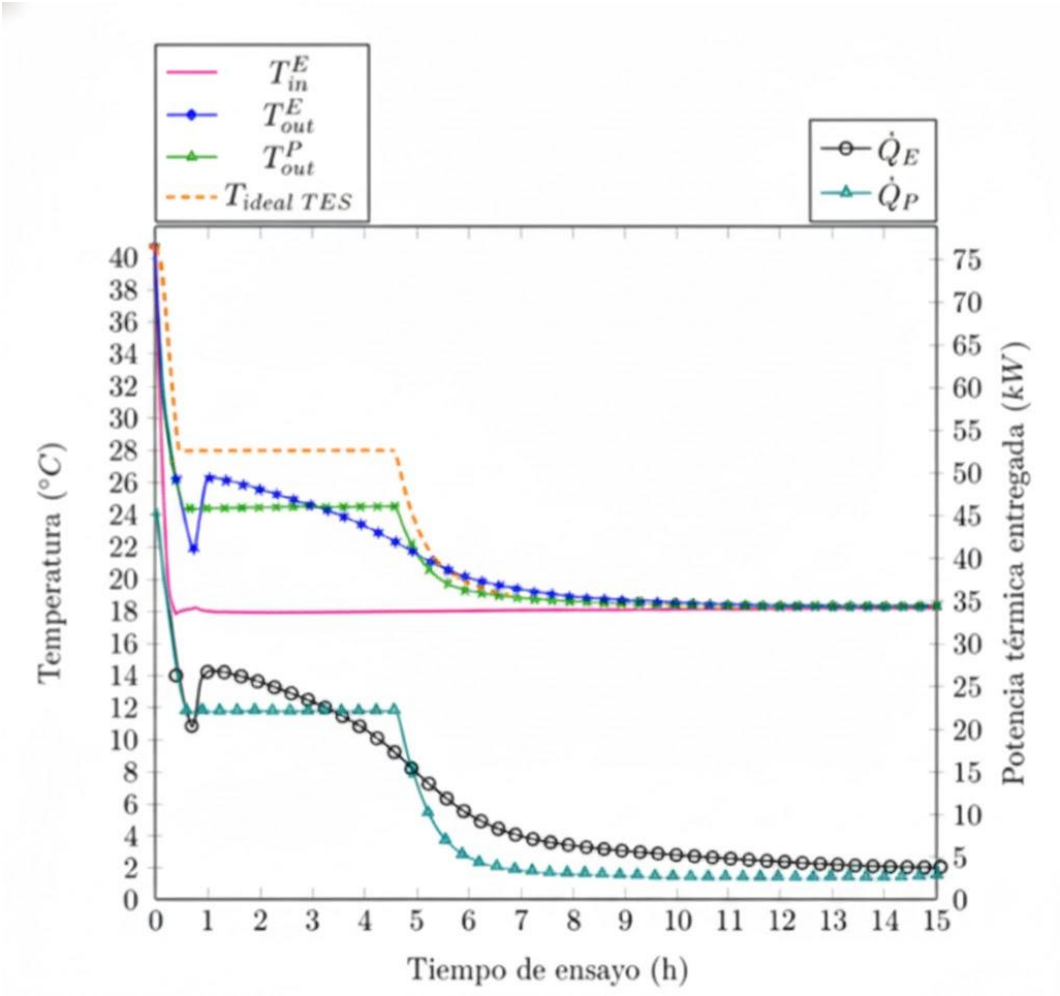


Fig. 55 Grafica de enfriamiento de la Parafina RT8 [11]

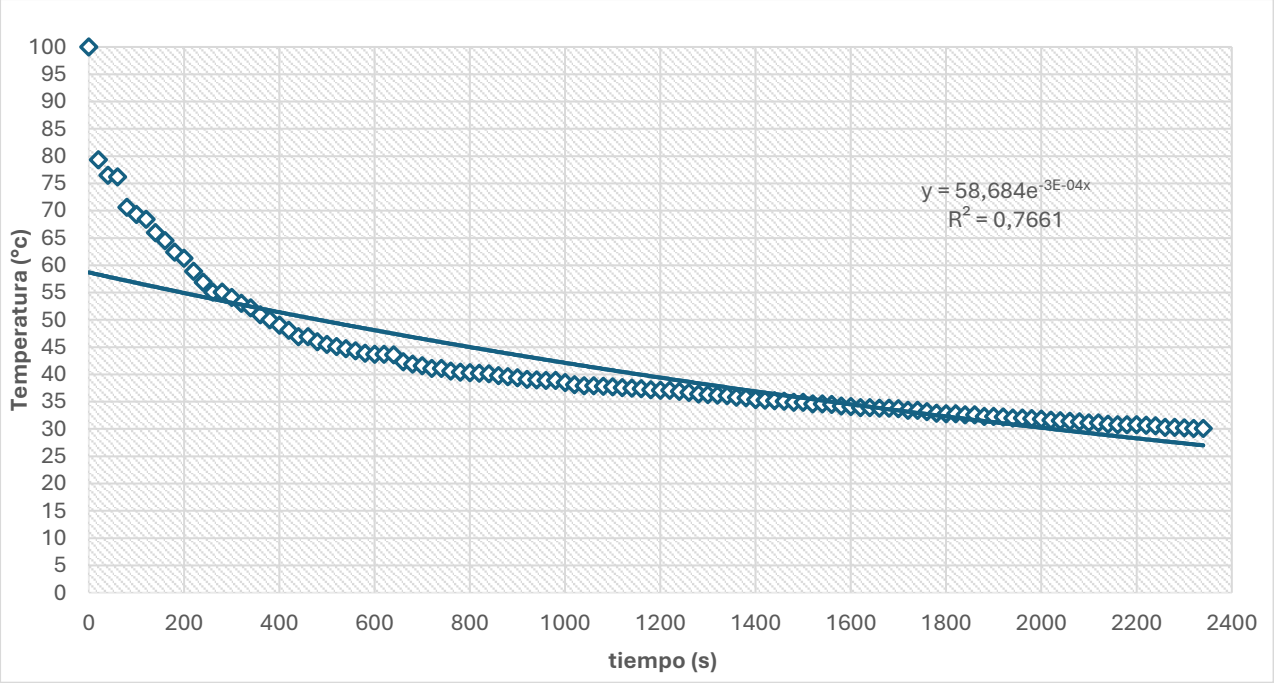


Fig. 56 Grafica de enfriamiento de la Parafina usada en la experimentación.

Se analizo las curvas de la figura 56 y 57 correspondientes a ensayos con parafina RT8 y a la parafina de uso comercial y fácil adquisición correspondientemente, donde estas dos curvas están determinadas por dos variables que son el tiempo de enfriamiento y la temperatura y dicho tiempo.

Como podemos ver en la curva de la figura 56 se observa una caída inicial de temperatura seguida de una meseta bien definida, característica de la liberación de calor latente durante el proceso de solidificación. La presencia clara de esta meseta sugiere que la RT8 posee un rango de transición de fase estrecho y un comportamiento térmico más homogéneo, asociado a su mayor pureza y a la formulación controlada del material. Esto implica que la energía latente se libera de forma más estable y sostenida, generando una región casi isoterma que evidencia una transición de fase más marcada. Por otra parte, se pude ver en la figura 57 que al iniciar el enfriamiento la curva tiene mayor pendiente en menor tiempo, lo que indica que la parafina utilizada aquí posee un rango de temperatura de fusión más amplio al de la parafina de la literatura

Cabe recalcar que estas diferencias en resultados entre ambas parafinas se deben a propiedades diferentes del material, condiciones de trabajo, método y tipo de encapsulamiento. Lo que

genera una notoria diferencia en las curvas, pero siempre respetando las etapas por las que cada PCM pasa, pasando así de un estado líquido, a un cambio de fase y por último solidificándose.

3.1.2.5 Validación de la hipótesis

Hipótesis

Las propiedades termofísicas de los materiales de cambio de fase no dependen únicamente del material, sino que también están condicionadas por el entorno en el que operan, el material del encapsulado y la forma de las probetas utilizadas en los ensayos. Estos aspectos influyen directamente en la manera en que el PCM almacena y libera la energía térmica, lo que permite observar y analizar su comportamiento durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento.

Verificación de hipótesis

Los resultados obtenidos permiten validar la hipótesis. Durante los ensayos se identificó un rango de fusión entre 46 y 68 °C, acompañado de una meseta térmica bien definida, lo que evidencia la influencia del encapsulado y de las condiciones del entorno en el almacenamiento de calor latente.

De igual manera se observa diferencias en la tasa de transferencia de la tasa de calor en las diferentes etapas del ciclo térmico alcanzando valores aproximados de 46,52 W en estado líquido, 33,78 W durante la fusión y 1,08 W en estado sólido. Estas variaciones cuantificables reflejan el cambio en la resistencia térmica del sistema y confirman que el encapsulado y la geometría de las probetas influyen directamente en la liberación de la energía térmica.

De igual manera, los valores de calor transferido, que fueron de 4,23 J en estado líquido, 7,6 J durante la fusión y 2,48 J en estado sólido, permiten comprobar que el mayor aporte energético se produce durante el cambio de fase, validando experimentalmente la relación entre las propiedades termofísicas del PCM y su capacidad de almacenamiento térmico.

La hipótesis se valida a partir de la comparación de temperaturas, tiempos y tasas de transferencia de calor obtenidas en la experimentación, las cuales evidencian la relación del encapsulado, el material y el entorno.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Dentro de las propiedades termofísicas relacionadas con el almacenamiento y la liberación de energía térmica, la inercia térmica resulta un aspecto clave, ya que a partir de este parámetro se puede orientar de mejor manera la selección del material a emplear. En este estudio, la parafina presentó valores de inercia térmica de 19,77 $\left(\frac{J}{m^2*K*s^{\frac{1}{2}}}\right)$ en estado líquido y 18,44 $\left(\frac{J}{m^2*K*s^{\frac{1}{2}}}\right)$ en estado sólido, lo que muestra un comportamiento térmico estable a lo largo del proceso de cambio de fase. Estos valores permiten considerar a la parafina como un material adecuado para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica, con un desempeño comparable al de parafinas utilizadas específicamente para este tipo de aplicaciones.
- El estudio realizado sobre la parafina permitió confirmar que sus propiedades termo físicas influyen directamente en su capacidad para almacenar energía. El rango de fusión obtenido experimentalmente (46–68 °C) coincidió con lo esperado para este tipo de PCM, evidenciando una estabilidad térmica adecuada y un comportamiento consistente durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento.
- Del análisis comparativo de las distintas etapas del PCM se comprobó que el calor latente juega un papel determinante en la eficiencia del almacenamiento térmico. El incremento del calor requerido durante la fusión, en contraste con los valores obtenidos en estado líquido y sólido, refleja la importancia de esta propiedad para aplicaciones que buscan aprovechar cambios de fase.
- En el caso del encapsulado circular, la forma y el tamaño influyeron en la velocidad de enfriamiento. Se observó que el PCM tardó más tiempo en liberar el calor latente en esta geometría, lo que sugiere que los encapsulados con menor área de intercambio pueden retardar la transferencia térmica y modificar la duración de cada etapa del proceso.
- Se observo que el PCM transfiere gran parte de su calor en la fusión, teniendo un valor de 33,78 W. Dándose esto durante un tiempo de aproximadamente 360 segundos.
- Los cálculos mostraron que la mayor cantidad de energía intercambiada por la parafina ensayada ocurre durante la fase de fusión, donde el calor liberado alcanza 7,6 J**,** valor que

supera en casi un 80 **%** al registrado en estado líquido (4,23 J) y triplica al del estado sólido (2,48 J). Esta diferencia confirma que el proceso de cambio de fase es la etapa que más energía demanda y libera, lo que respalda el uso de la parafina como un PCM eficiente para almacenar y amortiguar variaciones térmicas alrededor de su punto de fusión.

4.2. Recomendaciones

- Es importante tener una precisión en las medidas que el encapsulamiento tiene para así interpretar de mejor forma la termografía.
- Trabajar en un ambiente controlado para así poder disminuir perdidas y obtener mediciones más exactas.
- Realizar varias pruebas de carga y descarga de la misma probeta para determinar si existen cambios de masa o se pierden propiedades de transferencia de calor.
- Experimentar con materiales que posean una mayor conductividad térmica para así mejorar el desempeño del PCM.
- Realizar pruebas con aditivos para el PCM que mejoren sus características y comparar los resultados.
- Realizar simulaciones CFD y análisis de fluidos mediante softwares especializados.

4.3. Bibliografía

[1] T. Yang, W. P. King, and N. Miljkovic, “Phase change material-based thermal energy storage,” Aug. 18, 2021, Cell Press. doi: 10.1016/j.xcrp.2021.100540.

[2] D. Lilley, A. K. Menon, S. Kaur, S. Lubner, and R. S. Prasher, “Phase change materials for thermal energy storage: A perspective on linking phonon physics to performance,” J Appl Phys, vol. 130, no. 22, Dec. 2021, doi: 10.1063/5.0069342.

[3] J. Pereira da Cunha and P. Eames, “Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials - A review,” Sep. 01, 2016, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.097.

[4] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, and C. Castelain, “Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 119, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2019.109579.

[5] C. V. Podara, I. A. Kartsonakis, and C. A. Charitidis, “Towards phase change materials for thermal energy storage: classification, improvements and applications in the building sector,” Applied Sciences (Switzerland), vol. 11, no. 4, pp. 1–26, Feb. 2021, doi: 10.3390/app11041490.

[6] A. Marani and M. L. Nehdi, “Integrating phase change materials in construction materials: Critical review,” Constr Build Mater, vol. 217, pp. 36–49, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.064.

[7] P. B. Salunkhe and P. S. Shembekar, “A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system,” Oct. 2012. doi: 10.1016/j.rser.2012.05.037.

[8] YUNUS A. ÇENGEL, Transferencia de calor y masa, Tercera. Mexico: García, Zeferino, 2007.

[9] Y. Cui, J. Xie, J. Liu, J. Wang, and S. Chen, “A review on phase change material application in building,” Jun. 01, 2017, SAGE Publications Inc. doi: 10.1177/1687814017700828.

[10] S. Rostami et al., “A review of melting and freezing processes of PCM/nano-PCM and their application in energy storage,” Energy, vol. 211, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118698..

[11] F. J. Barrera-Ríos, S. A. Ramírez-León, E. Sánchez-Ángeles, J. A. Pérez-Trujillo, and A. Cruz-Álvarez, “TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río Mecanismos de Transferencia de Calor Heat Transfer Mechanisms,” Publicación semestral, vol. 8, no. 16, pp. 38–42, 2021, [Online]. Available: https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/tepexi/issue/archive

[12] M. A. Boles and M. Kanoğlu, Termodinámica Yunus A. Çengel. 2019.

[13] A. Sar, A. Bier, A. Karaipekli, C. Alkan, and A. Karadag, “Synthesis, thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters with glycerol as novel solidliquid phase change materials,” Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 94, no. 10, pp. 1711–1715, Oct. 2010, doi: 10.1016/j.solmat.2010.05.033.

[14] B.-T. Juan F., E. Pablo, S. Rafael, A.-I. José A., and M. Antonio, “Modelo simplificado de un depósito de almacenamiento con PCM,” Universidad Politecnica de Cartagena, Mar. 2024. doi: 10.31428/10317/9826.

[15] N. A. Morad, A. A. Mustafa Kamal, F. Panau, and T. W. Yew, “Liquid specific heat capacity estimation for fatty acids, triacylglycerols, and vegetable oils based on their fatty acid composition,” JAOCS, Journal of the American Oil Chemists’ Society, vol. 77, no. 9, pp. 1001–1005, 2000, doi: 10.1007/s11746-000-0158-6.

[16] L. Yang, J. nan Huang, and F. Zhou, “Thermophysical properties and applications of nano-enhanced PCMs: An update review,” Jun. 15, 2020, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.enconman.2020.112876.

[17] Y. B. Tao and Y. L. He, “A review of phase change material and performance enhancement method for latent heat storage system,” Oct. 01, 2018, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2018.05.028.

[18] F. S. BAYRAKTAR and R. KÖSE, “PHASE CHANGE MATERIALS: TYPES, PROPERTIES and APPLICATIONS in BUILDINGS,” Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, vol. 8, no. 1, pp. 190–210, Jun. 2022, doi: 10.34186/klujes.1126167.

[19] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, and C. Castelain, “Energy : Generation and Automation (ICEREGA’18),” 2018. [Online]. Available: https://hal.science/hal-02375775v1 .

[20] Zare, M., & Mikkonen, K. S. (2023). Phase Change Materials for Life Science Applications. In Advanced Functional Materials (Vol. 33, Issue 12). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/adfm.202213455.

[21] Lawag, R. A., & Ali, H. M. (2022). Phase change materials for thermal management and energy storage: A review. *Journal of Energy Storage*, *55*, 105602. https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.105602.

[22] H. M. Ali *et al.*, “Advances in thermal energy storage: Fundamentals and applications,” *Prog Energy Combust Sci*, vol. 100, p. 101109, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.PECS.2023.101109.

[23] G. Sadeghi, “Energy storage on demand: Thermal energy storage development, materials, design, and integration challenges,” *Energy Storage Mater*, vol. 46, pp. 192–222, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.ENSM.2022.01.017.

[24] R. Bharathiraja, T. Ramkumar, M. Selvakumar, and N. Radhika, “Thermal characteristics enhancement of Paraffin Wax Phase Change Material (PCM) for thermal storage applications,” *Renew Energy*, vol. 222, p. 119986, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2024.119986.

ANEXOS

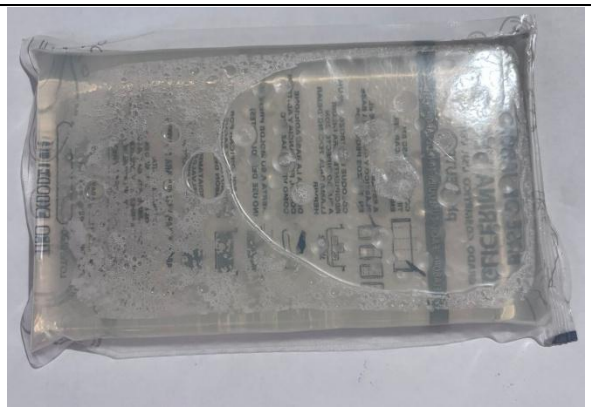
Anexo 1

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td colspan="5">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="5">FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">CARRERA DE MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="7">Características de los PCM</td></tr>
<tr><td>Material PCM:</td><td colspan="6">Parafina</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Características:</td><td>Estado físico</td><td>Temperatura de fusión (°C)</td><td>Conductividad térmica (W/m·K)</td><td>Densidad (kg/m³)</td><td colspan="2">Capacidad calorífica (kJ/kg·K)</td></tr>
<tr><td>Sólido</td><td>46–68 (varía según la mezcla)</td><td>0.2–0.3</td><td>Sólido: 900, Líquido: 770</td><td colspan="2">2.1–2.9</td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones visuales:</td></tr>
<tr><td colspan="7"></td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones: La parafina es un material de fácil adquisición y bajo costo, comúnmente utilizado en aplicaciones térmicas por su elevada capacidad de almacenamiento de calor latente. Su manipulación es sencilla debido a su estabilidad en estado sólido a temperatura ambiente. Presenta buena compatibilidad con encapsulamientos plásticos convencionales. Su punto de fusión moderado lo hace ideal para sistemas de almacenamiento térmico de baja temperatura. No presenta olores fuertes ni reacciones visibles al contacto con el aire.</td></tr>
</table>

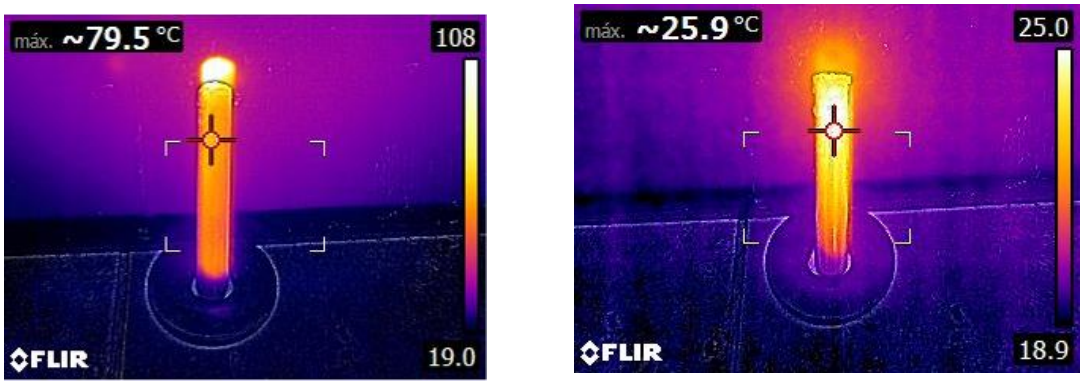
Anexo 2

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td colspan="5">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="5">FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">CARRERA DE MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="7">Características de los PCM</td></tr>
<tr><td>Material PCM:</td><td colspan="6">Manteca Vegetal</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Características:</td><td>Estado físico (a temperatura ambiente)</td><td>Temperatura de fusión (°C)</td><td>Conductividad térmica (W/m·K)</td><td>Densidad (kg/m³)</td><td>Capacidad calorífica (kJ/kg·K)</td></tr>
<tr><td>Semisólido</td><td>33–38 °C</td><td>0,2</td><td>920 (a temperatura ambiente)</td><td>1,9–2,5</td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones visuales:</td></tr>
<tr><td colspan="7"></td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones: La manteca vegetal es un material biodegradable, de origen orgánico con disponibilidad comercial media y costo accesible. Presenta buena estabilidad térmica durante la fusión y solidificación, con una tasa de descarga térmica baja, lo que le permite mantener la temperatura por más tiempo. Su apariencia es homogénea y su manipulación es segura, sin emisión de vapores ni residuos notables. Sin embargo, puede presentar pequeñas filtraciones al estado líquido, por lo que requiere contención adecuada. Compatible con encapsulamientos de baja reactividad.</td></tr>
</table>

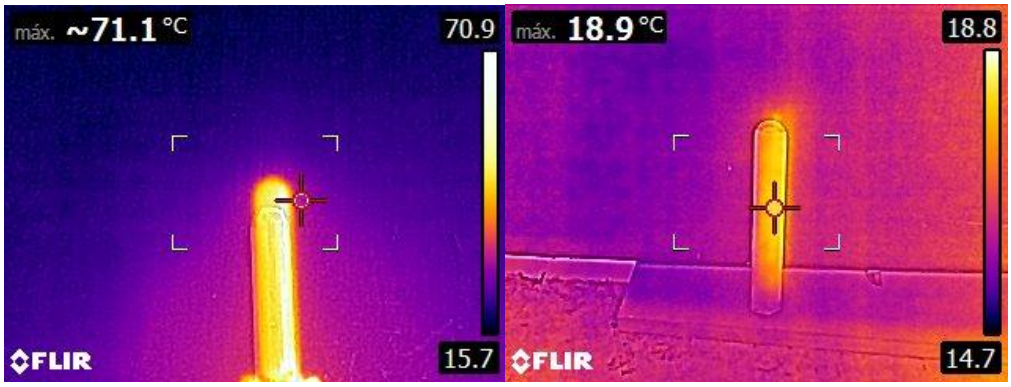
Anexo 3

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td colspan="5">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="5">FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">CARRERA DE MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="7">Características de los PCM</td></tr>
<tr><td>Material PCM:</td><td colspan="6">Glicerina Solida</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Características:</td><td>Estado físico (a temperatura ambiente)</td><td>Temperatura de fusión (°C)</td><td>Conductividad térmica (W/m·K)</td><td>Densidad (kg/m³)</td><td colspan="2">Capacidad calorífica (kJ/kg·K)</td></tr>
<tr><td>Sólido cristalino</td><td>17,8 °C</td><td>0,28–0,30</td><td>Sólido: 1260, Líquido: ~1260</td><td colspan="2">2,4–2,5</td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones visuales:</td></tr>
<tr><td colspan="7"></td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones: Material renovable y biodegradable con alta viscosidad en estado líquido, lo que reduce su movilidad y posibles fugas. Su adquisición es relativamente sencilla, por esto se emplea en diversas industrias. En estado sólido, presenta buena estabilidad física, aunque requiere encapsulamiento resistente a temperaturas elevadas por su amplio rango térmico operativo. No presenta olores ni efectos adversos visibles al manipularlo. Puede presentar pequeñas filtraciones al fundirse.</td></tr>
</table>

Anexo 4

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td colspan="5">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="5">FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">CARRERA DE MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="7">Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en un cilindro de cristal</td></tr>
<tr><td colspan="7">Datos generales del ensayo:</td></tr>
<tr><td>Material PCM:</td><td colspan="6">Parafina</td></tr>
<tr><td>Fecha:</td><td colspan="6">5/5/2025</td></tr>
<tr><td>Responsable:</td><td colspan="6">Joe Toaza</td></tr>
<tr><td>Ubicación:</td><td colspan="6">Laboratorio de la carrera de mecánica</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Características:</td><td>Masa aproximada (g)</td><td>Tiempo de fusión:</td><td>Temperatura final (°C)</td><td>Temperatura inicial (°C)</td><td colspan="2">Tiempo de solidificación:</td></tr>
<tr><td>14</td><td>40</td><td>25,9</td><td>79,2</td><td colspan="2">1526</td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones visuales:</td></tr>
<tr><td colspan="7">
</td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones: En esta la fase de enfriamiento, se observa una distribución de temperatura descendente desde la parte superior hacia la base del tubo, lo que indica que la parafina libera calor de forma progresiva. La parte superior alcanza temperaturas superiores a 79 °C inicialmente, mientras que al finalizar el proceso se estabiliza cerca de 25 °C, con zonas más frías hacia la base (~19 °C). Esto sugiere que el proceso de solidificación ocurre de forma descendente, favorecido por la menor densidad térmica del aire circundante y la baja conductividad térmica del PCM, lo cual retrasa la transferencia total de calor al entorno.</td></tr>
</table>

Anexo 5

<table>
<tr><td rowspan="3"></td><td colspan="5">UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="5">FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="5">CARRERA DE MECÁNICA</td></tr>
<tr><td colspan="7">Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en un cilindro de cristal</td></tr>
<tr><td colspan="7">Datos generales del ensayo:</td></tr>
<tr><td>Material PCM:</td><td colspan="6">Manteca Vegetal</td></tr>
<tr><td>Fecha:</td><td colspan="6">28/4/2025</td></tr>
<tr><td>Responsable:</td><td colspan="6">Joe Toaza</td></tr>
<tr><td>Ubicación:</td><td colspan="6">Laboratorio de la carrera de mecánica</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Características:</td><td>Masa aproximada (g)</td><td>Tiempo de fusión:</td><td>Temperatura final (°C)</td><td>Temperatura inicial (°C)</td><td>Tiempo de solidificación:</td></tr>
<tr><td>13</td><td>40</td><td>18,9</td><td>71,1</td><td>4026</td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones visuales:</td></tr>
<tr><td colspan="7">
</td></tr>
<tr><td colspan="7">Observaciones: En el proceso de enfriamiento, se aprecia un descenso térmico gradual desde una temperatura máxima inicial cercana a 71 °C hasta estabilizarse alrededor de 18,9 °C. La imagen muestra una distribución homogénea de temperatura a lo largo del tubo durante buena parte del proceso, lo cual indica una liberación sostenida de calor latente. Este comportamiento es consistente con su baja pendiente de enfriamiento (~0,025 °C/s), evidenciando que el material se mantuvo durante más tiempo en su rango de cambio de fase, lo que favorece su uso en aplicaciones donde se requiere una liberación prolongada y estable de energía térmica.</td></tr>
</table>

Anexo 6

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE MECÁNICA	

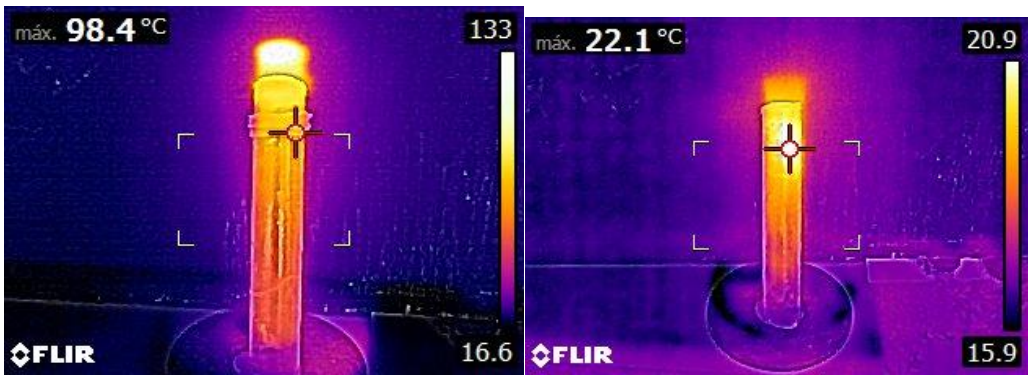
Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en un cilindro de cristal

Datos generales del ensayo:

Material PCM:	Glicerina
Fecha:	28/4/2025
Responsable:	Joe Toaza
Ubicación:	Laboratorio de la carrera de mecánica

Características:	**Masa aproximada (g)**	**Tiempo de fusión:**	**Temperatura final (°C)**	**Temperatura inicial (°C)**	**Tiempo de solidificación:**
	14	40	22,1	98,4	25,52

Observaciones visuales:



Observaciones: Durante el enfriamiento, la glicerina sólida presentó una rápida caída térmica desde aproximadamente 98,4 °C hasta estabilizarse en 22,1 °C. Las imágenes termográficas muestran una pérdida de temperatura acelerada, con un gradiente térmico marcado entre la parte superior e inferior del contenedor. Esta condición es coherente con su mayor pendiente de enfriamiento (~0,095 °C/s), lo que indica una menor retención de calor latente y una transición más rápida entre fases. Este comportamiento sugiere una capacidad limitada de almacenamiento térmico prolongado, siendo menos eficiente en aplicaciones que requieren liberación sostenida de energía.

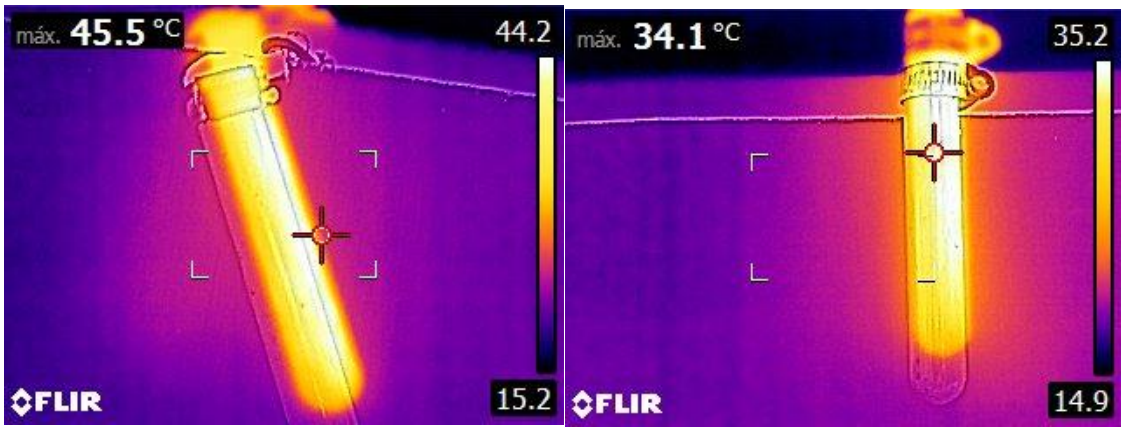
Anexo 7

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE MECÁNICA	

Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en un cilindro de cristal

Datos generales del ensayo:					
Material PCM:	Parafina				
Fecha:	12/5/2025				
Responsable:	Joe Toaza				
Ubicación:	Laboratorio de la carrera de mecánica				
Características:	**Masa aproximada (g)**	**Tiempo de fusión:**	**Temperatura final (°C)**	**Temperatura inicial (°C)**	**Tiempo de medición:**
	14	40	34,1	45,5	180

Observaciones visuales:



Observaciones: En las termografías, se evidenció una distribución de calor centrada en la parte superior y media de la probeta, con el fondo fundiéndose más lentamente. La parafina presentó una fusión rápida y uniforme, con una temperatura final moderada (45,5 °C), característica de este tipo de PCM . Se observó que, una vez retirada la fuente de calor, comenzó a enfriar de forma regular. En comparación con la manteca y la glicerina, la parafina mostró un mejor comportamiento de cambio de fase. Su solidificación fue más equilibrada y sin zonas de retención térmica prolongada.

Anexo 8

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE MECÁNICA	

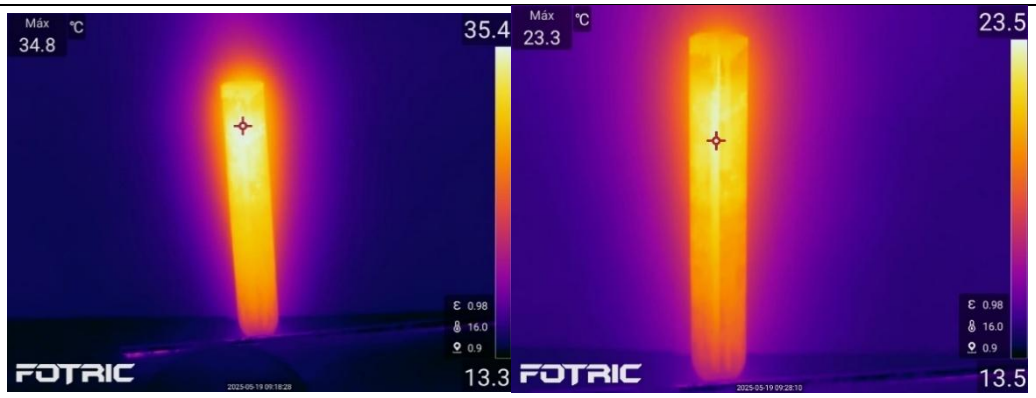
Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en un cilindro de cristal

Datos generales del ensayo:

Material PCM:	Manteca Vegetal
Fecha:	19/5/2025
Responsable:	Joe Toaza
Ubicación:	Laboratorio de la carrera de mecánica

Características:	**Masa aproximada (g)**	**Tiempo de fusión:**	**Temperatura final (°C)**	**Temperatura inicial (°C)**	**Tiempo de medición:**
	13	40	23,3	36,9	540

Observaciones visuales:



Observaciones: Las termografías reflejaron un patrón similar al de los demás materiales: mayor concentración de calor en la parte superior y el centro, zonas donde el calentador tenía mayor efecto. A pesar de tener la temperatura final más baja de los tres materiales (36,9 **°C**), la manteca mostró una fusión rápida pero una solidificación más lenta, probablemente debido a su composición grasa. En las imágenes térmicas finales se observó que las zonas más externas comenzaron a enfriar antes que el núcleo, lo que sugiere que su comportamiento térmico es más sensible a la pérdida de calor superficial.

Anexo 9

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE MECÁNICA	

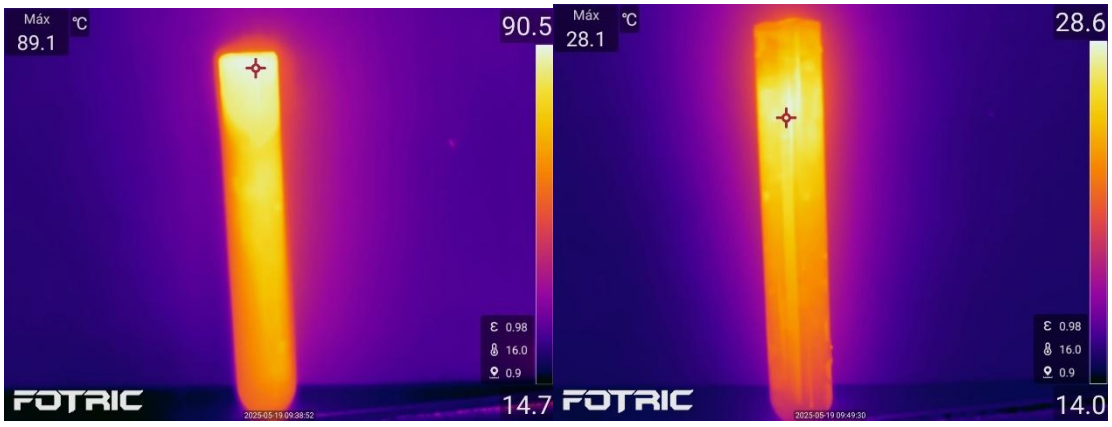
Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en un cilindro de cristal

Datos generales del ensayo:

Material PCM:	Glicerina
Fecha:	19/5/2025
Responsable:	Joe Toaza
Ubicación:	Laboratorio de la carrera de mecánica

Características:	**Masa aproximada (g)**	**Tiempo de fusión:**	**Temperatura final (°C)**	**Temperatura inicial (°C)**	**Tiempo de medición:**
	14	40	28,1	89,1	640

Observaciones visuales:



Observaciones: Durante el calentamiento, las imágenes térmicas mostraron una alta concentración de calor en la parte superior y centro de la probeta, zonas directamente expuestas a la llama ascendente. La distribución del calor fue progresiva, pero se notó que el fondo permanecía más frío por mayor tiempo, lo que indica una baja conducción térmica vertical. La glicerina alcanzó una temperatura final elevada (89,1 °C), lo que sugiere que su fusión requiere mayor aporte energético. A pesar del tiempo corto de fusión (40 s), la solidificación fue más lenta y no uniforme, lo que es coherente con su comportamiento más viscoso al enfriarse.

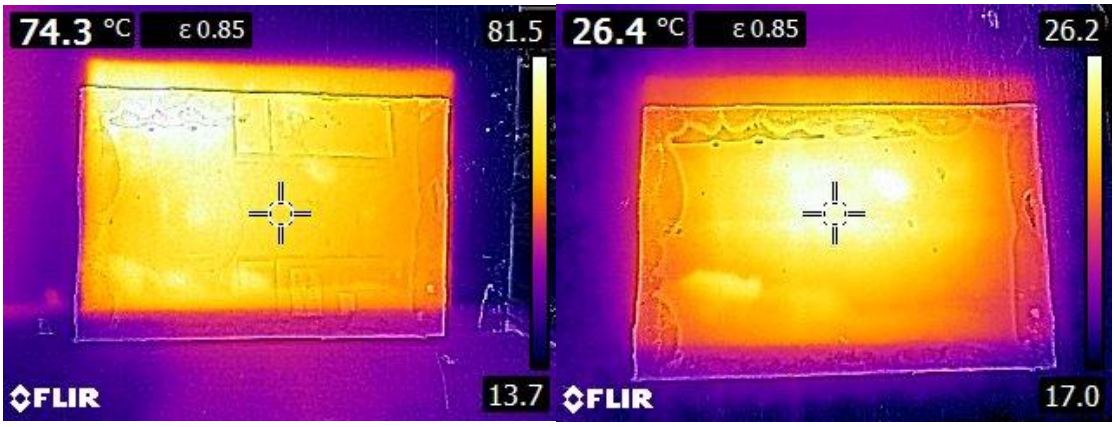
Anexo 10

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE MECÁNICA	

Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en placas de cristal

Datos generales del ensayo:					
Material PCM:	Parafina				
Fecha:	19/06/2025				
Responsable:	Joe Toaza				
Ubicación:	Laboratorio de la carrera de mecánica				
Características:	**Masa aproximada (g)**	**Tiempo de fusión:**	**Temperatura inicial (°C)**	**Temperatura final (°C)**	**Tiempo de medición:**
	30	578	74,3	26,4	1878

Observaciones visuales:



Observaciones: Durante el enfriamiento, la probeta encapsulada en placas de cristal mostró inicialmente una alta concentración de calor en toda la región central (74.3 °C), con los bordes enfriándose de forma más rápida. Esto indica que el PCM mantiene el calor latente en su zona interna mientras el cristal extrae energía por conducción desde la periferia. Al llegar a la temperatura final de 26.4 °C, se observa una distribución térmica mucho más uniforme, aunque con zonas ligeramente más cálidas en el centro, lo que evidencia que la solidificación ocurrió de manera progresiva y no simultánea. Este comportamiento confirma la baja conductividad térmica del PCM y su tendencia a conservar calor en el núcleo por más tiempo.

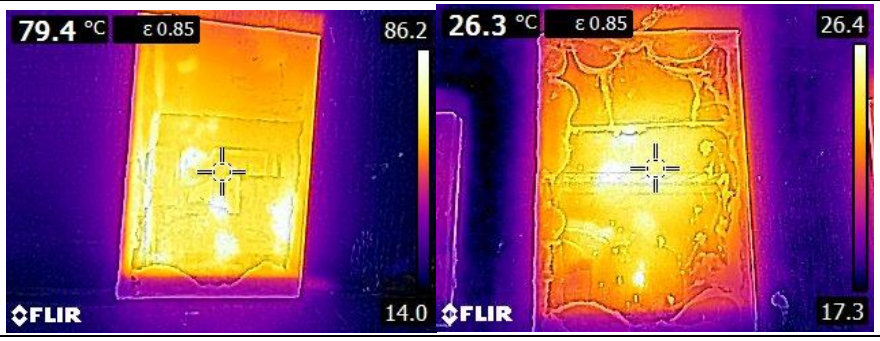
Anexo 11

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE MECÁNICA	

Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en placas de cristal

Datos generales del ensayo:					
Material PCM:	Glicerina				
Fecha:	19/06/2025				
Responsable:	Joe Toaza				
Ubicación:	Laboratorio de la carrera de mecánica				
Características:	**Masa aproximada (g)**	**Tiempo de fusión:**	**Temperatura inicial (°C)**	**Temperatura final (°C)**	**Tiempo de medición:**
	30	842	79,4	26,3	2164

Observaciones visuales:



Observaciones: En el segundo conjunto de imágenes, el material inicia el proceso de enfriamiento con una temperatura elevada de 79.4 °C, concentrada principalmente en la parte superior y el centro del encapsulado. La periferia vuelve a mostrarse más fría, señalando que el cristal facilita la transferencia térmica hacia el exterior. Al descender hasta los 26.3 °C, la probeta presenta una textura térmica irregular, típica de una solidificación incompleta durante el registro. Las zonas internas que permanecen más cálidas indican que la transición de fase fue más lenta en el núcleo, mientras que los bordes ya habían alcanzado la temperatura ambiente. Esto refleja un enfriamiento no uniforme asociado al comportamiento térmico propio del PCM.

Anexo 12

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE MECÁNICA	

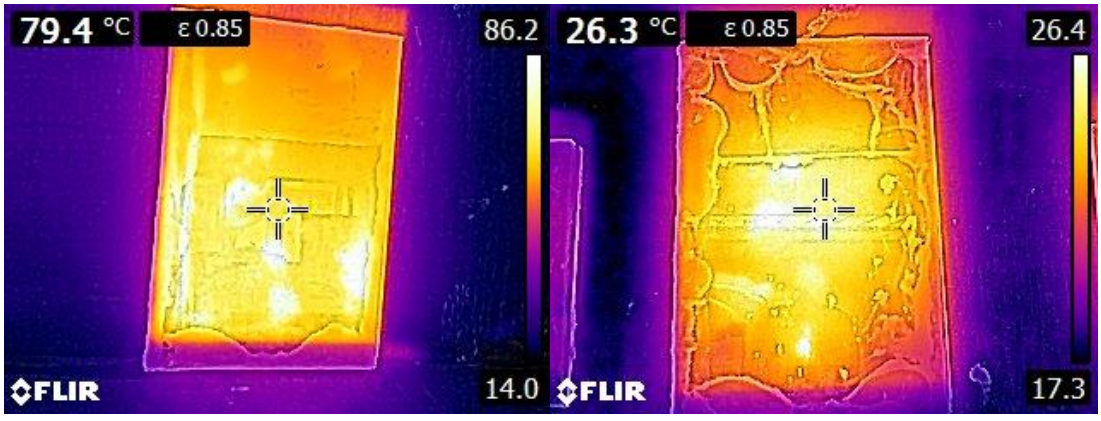
Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en placas de cristal

Datos generales del ensayo:

Material PCM:	Manteca vegetal
Fecha:	19/06/2025
Responsable:	Joe Toaza
Ubicación:	Laboratorio de la carrera de mecánica

Características:	**Masa aproximada (g)**	**Tiempo de fusión:**	**Temperatura inicial (°C)**	**Temperatura final (°C)**	**Tiempo de medición:**
	30	578	72,4	20,1	3254

Observaciones visuales:



Observaciones: En la tercera secuencia, la probeta parte nuevamente de una temperatura alta de 79.4 °C, con una distribución casi homogénea en el centro y un marcado gradiente hacia los extremos del encapsulado. Esta condición inicial sugiere que el PCM aún conserva una cantidad significativa de calor latente. En la imagen final, con una temperatura estabilizada de 26.3 °C, se aprecia una superficie térmicamente uniforme, aunque con patrones internos propios de la estructura solidificada. La ausencia de puntos calientes confirma que el PCM completó la solidificación y que el calor residual se disipó completamente hacia las paredes de cristal, alcanzando finalmente el equilibrio térmico.

Anexo 13

	UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA	
	CARRERA DE MECÁNICA	

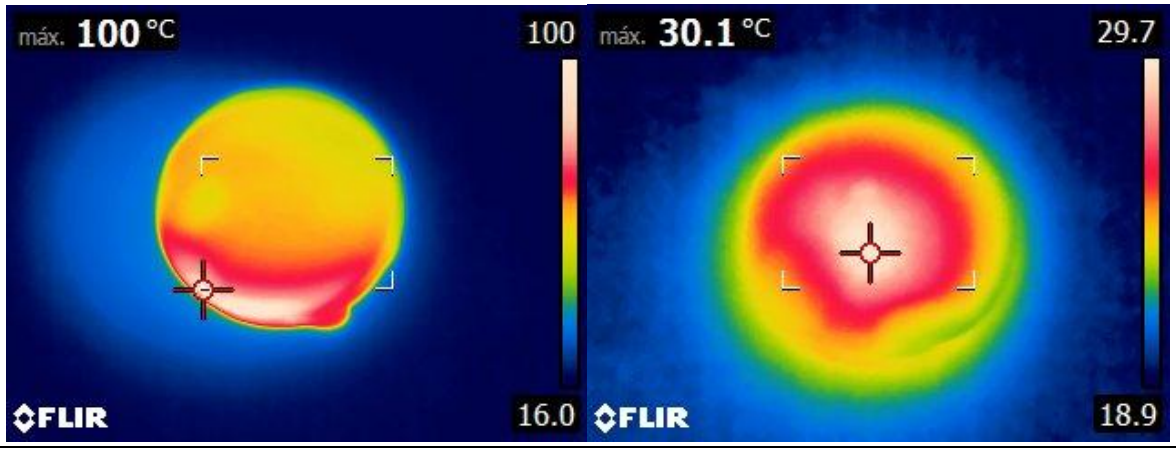
Formato de toma de datos de pruebas experimentales del PCM encapsulado en un envase de plástico

Datos generales del ensayo:

Material PCM:	Parafina
Fecha:	04/9/2025
Responsable:	Joe Toaza
Ubicación:	Laboratorio de la carrera de mecánica

Características:	**Masa aproximada (g)**	**Tiempo de fusión:**	**Temperatura final (°C)**	**Temperatura inicial (°C)**	**Tiempo de medición:**
	64	360	30.1	100	2340

Observaciones visuales:



Observaciones: En esta experimentación con la ayuda de la cámara termográfica se observó una mejor distribución de energía en el PCM, donde a medida que transcurre el tiempo la temperatura más alta que este posee se acumula en el centro dando así una mayor transferencia de calor en esta zona.

Anexo 14

Data sheet

RUBITHERM Phase Change Material

RT8

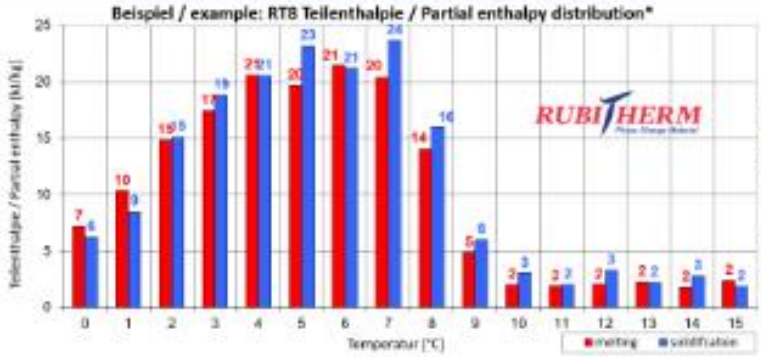


RUBITHERM® RT is a pure PCM, this heat storage material utilising the processes of phase change between solid and liquid (melting and congealing) to store and release large quantities of thermal energy at nearly constant temperature.
The RUBITHERM® phase change materials (PCM's) provide a very effective means for storing heat and cold, even when limited volumes and low differences in operating temperature are applicable.

Properties for RT-line:
- **high thermal energy storage capacity**
- **heat storage and release take place at relatively constant temperatures**
- **no supercooling effect, chemically inert**
- **long life product, with stable performance through the phase change cycles**
- **melting temperature range between -9 °C and 100 °C available**

The most important data:	Typical Values	
Melting area	**6-9** main peak: 7	[°C]
Congealing area	**9-6** main peak: 8	[°C]
Heat storage capacity ± 7,5% Combination of latent and sensible heat in a temperatur range of 0 °C to 15 °C.	**165**	[kJ/kg]*
	46	[Wh/kg]*
Specific heat capacity	**2**	[kJ/kg·K]
Density solid at 0 °C	**0,8**	[kg/l]
Density liquid at 15°C	**0,77**	[kg/l]
Heat conductivity (both phases)	**0,2**	[W/(m·K)]
Volume expansion	**14**	[%]
Flash point	**116**	[°C]
Max. operation temperature	**40**	[°C]





Rubitherm Technologies GmbH
Imhoffweg 6
D-12307 Berlin
phone: +49 (30) 7109622-0
E-Mail: info@rubitherm.com
Web: www.rubitherm.com

The product information given is a non-binding planning aid, subject to technical changes without notice.
Version: 11.06.2024

*Measured with 3-layer-calorimeter.

Anexo 15

Table 4
Thermophysical properties of key PCMs used in experimental cooling and heating applications for buildings.

PCM ingredients	Type	Synthetic/ commercial	Melting temperature	Latent heat	Thermal conductivity	Specific heat	Reference
–	Bio-based PCM Q23M51	Commercial	23 °C	–	0.2 W/m.K	1.97 kJ/kg.K	[68]
85–90% paraffin and 10–15% polymer shell	Paraffin-based PCM	Commercial	37 °C	166.54 kJ/kg	0.13 W/m.K (solid) 0.11 W/m.K (liquid)	3.21 kJ/kg.K (solid) 2.70 kJ/kg.K (liquid)	[66,88]
Paraffin	Paraffin-based PCM	Commercial	28 °C	137.5 kJ/kg	0.2 W/m.K	–	[52]
Perlite (*supporting material*) + Paraffin	Paraffin-based PCM	Synthetic	23.98 °C	67.13 kJ/kg (for melting) 69.06 kJ/kg (for freezing)	–	–	[63]
8% wt. Expanded graphite nanosheets +92% wt. Paraffin, *n*-heptadecane ($C_{17}H_{36}$)	Paraffin-based nano PCM	Synthetic	21.1 °C	26.9 kJ/kg (for melting) 26.8 kJ/kg (for freezing)	0.41 W/m.K (solid) 0.427 W/m.K (liquid)	2.312 kJ/kg.K (solid) 2.236 kJ/kg.K (liquid)	[64]
Paraffin	RUBITHERM RT-line	Commercial	31, 35, 42, 47, 50 and 55 °C	160–170 kJ/kg	0.2 W/m.K	2 kJ/kg.K	[42]
Paraffin	Paraffin-based PCM A28 PCM A32 PCM A38	Commercial	28 °C 32 °C 39 °C	230 kJ/kg 215 kJ/kg 190 kJ/kg	0.21 W/m.K 0.21 W/m.K 0.22 W/m.K	2.22 kJ/kg.K 2.2 kJ/kg.K 2.22 kJ/kg.K	[69]
–	–	–	27–29 °C	205 kJ/kg	0.21 W/m.K	2.23 kJ/kg.K	[14]
–	RT22	Commercial	22 °C	200 kJ/kg	0.2 W/m.K	2 kJ/kg.K	[57]
80% methyl methacrylate + 20% methacrylic acid	Organic MEPCM	Synthesized	23.68 °C	170 kJ/kg	–	–	[89]
Salt-hydrate	SP22	Commercial	22 °C	170 kJ/kg	0.6 W/m.K	2 kJ/kg.K	[90]
61% polypropylene BB412E + 39% RT82	Polymer PCM SS-RT82	Synthesized	86 °C	82.8 kJ/kg	–	–	[59]
Paraffin	RT43	Commercial	38–43 °C	174 kJ/kg	0.2 W/m.K	2 kJ/kg.K	[60]
Paraffin	C20	Commercial	44–46 °C	189 kJ/kg	0.21 W/m.K	2.1 kJ/kg.K	[91]
Paraffin	RT50	Commercial	45–51 °C	160 kJ/kg	0.2 W/m.K	2 kJ/kg.K	[92]
–	–	–	46.3 °C	–	0.1 W/m.K (solid) 0.17 W/m.K (liquid)	1.7 kJ/kg.K (solid) 1.9 kJ/kg.K (liquid)	[93]
	Bio-PCM Q23	Commercial	25.5 °C	70 kJ/kg	0.157 W/m.K	0.837 kJ/kg.K	[94]
Capric acid	organic	–	32 °C	152.7 kJ/kg	0.372 W/m.K (solid) 0.141 W/m.K (liquid)	0.475 kJ/kg.K	[95]
Zinc nitrate hexahydrate	organic	–	36 °C	147 kJ/kg	0.464 W/m.K	1.34 kJ/kg.K (solid) 2.26 kJ/kg.K (liquid)	[95]
15% HDPE + 15%EG + 70% paraffin wax	GH20 SSPCM	Commercial	20.93 °C	61.44 kJ/kg	–	2.52 kJ/kg.K	[96]
Paraffin	MG29	Commercial	27–29 °C	205 kJ/kg	0.21 W/m.K	2.23 kJ/kg.K	[97]
Paraffin wax	RT42	Commercial	38–43 °C	174 kJ/kg	0.2 W/m.K	1.8 kJ/kg.K (solid) 2.4 kJ/kg.K (liquid)	[61]
Hexadecane paraffin	organic	Synthetic	18 °C	236 kJ/kg	0.17 W/m.K	1.65 kJ/kg.K (solid) 2.1 kJ/kg.K (liquid)	[79]
Heptadecane paraffin	organic	Synthetic	22 °C	214 kJ/kg	–	–	[79]
Octadecane paraffin	organic	Synthetic	28 °C	244 kJ/kg	0.26 W/m.K	1.75 kJ/kg.K (solid) 2.1 kJ/kg.K (liquid)	[79]

Anexo 16

Table 1
Summary of PCM thermal conductivity enhancement with porous media.

porous supporting material	Phase change material	Melting temperature /°C	Reference
Copper foam	Paraffin	48–62	Liu et al. [10]
Copper and nickel foam	Paraffin	60–62	Xiao et al. [11]
Copper foam	Paraffin	42.24	Wang et al. [12]
Copper foam	Paraffin	54.0	Tao et al. [13]
Copper foam	Succinonitrile	58.09	Zhao et al. [14]
Graphene–nickel foam	n-carboxylic acids	50.6–62.8	Liang et al. [15]
Aluminum foam	Paraffin	46–52	Wang et al. [16]
Expanded graphite	Paraffin	41.6	Sarı and Karaipekli [17]
Graphite foam	Paraffin	58	Zhong et al. [18]
Expanded graphite	Acetamide	66.95	Xia and Zhang [19]
Expanded graphite	Neopentyl glycol	45	Wang et al. [20]
Expanded graphite	Polyethylene glycol	41.8–50.9	Lv et al. [21]
Expanded graphite	Stearic acid	68.88	Wu et al. [22]
Expanded graphite	D-Mannitol	151.82	Xu et al. [23]
Graphite foam	$MgCl_2$	714	Zhao et al. [24]
Expanded graphite	$LiNO_3$/KCl	165.60	Huang et al. [25]
Expanded graphite	$KNO_3/NaNO_3$	223	Zhao et al. [26]
Expanded graphite	$NaNO_3/KNO_3$	220	Xiao et al. [27]
Graphite foam	NaCl	800	Singh et al. [28]
Graphite foam	$MgCl_2$	714	Singh et al. [29]
Expanded perlite	Capric-myristic acid	21.70	Karaipekli and Sarı [30]
Expanded vermiculite	Stearic acid	67.2	Li et al. [31]

TABLA A-7

Propiedades de alimentos comunes

a) Calores específicos y propiedades en el punto de congelación

Alimento	Contenido de agua,[a] % (masa)	Punto de congelación[a] °C	Calor específico,[b] kJ/kg · K: Arriba del punto de congelación	Calor específico,[b] kJ/kg · K: Debajo del punto de congelación	Calor latente de fusión,[c] kJ/kg
Vegetales					
Alcachofas	84	−1.2	3.65	1.90	281
Espárragos	93	−0.6	3.96	2.01	311
Frijoles	89	−0.7	3.82	1.96	297
Brócoli	90	−0.6	3.86	1.97	301
Col	92	−0.9	3.92	2.00	307
Zanahorias	88	−1.4	3.79	1.95	294
Coliflor	92	−0.8	3.92	2.00	307
Apio	94	−0.5	3.99	2.02	314
Maíz tierno	74	−0.6	3.32	1.77	247
Pepinos	96	−0.5	4.06	2.05	321
Berenjena	93	−0.8	3.96	2.01	311
Rábano	75	−1.8	3.35	1.78	251
Poro	85	−0.7	3.69	1.91	284
Lechuga	95	−0.2	4.02	2.04	317
Hongos	91	−0.9	3.89	1.99	304
Quimbombó	90	−1.8	3.86	1.97	301
Cebollas frescas	89	−0.9	3.82	1.96	297
Cebollas secas	88	−0.8	3.79	1.95	294
Perejil	85	−1.1	3.69	1.91	284
Chícharos frescos	74	−0.6	3.32	1.77	247
Pimientos	92	−0.7	3.92	2.00	307
Papas	78	−0.6	3.45	1.82	261
Calabazas	91	−0.8	3.89	1.99	304
Espinaca	93	−0.3	3.96	2.01	311
Tomate rojo	94	−0.5	3.99	2.02	314
Nabos	92	−1.1	3.92	2.00	307
Frutas					
Manzanas	84	−1.1	3.65	1.90	281
Chabacanos	85	−1.1	3.69	1.91	284
Aguacates	65	−0.3	3.02	1.66	217
Plátanos	75	−0.8	3.35	1.78	251
Moras azules	82	−1.6	3.59	1.87	274
Melones	92	−1.2	3.92	2.00	307
Cerezas ácidas	84	−1.7	3.65	1.90	281
Cerezas dulces	80	−1.8	3.52	1.85	267
Higos secos	23	—	—	1.13	77
Higos frescos	78	−2.4	3.45	1.82	261
Toronja	89	−1.1	3.82	1.96	297
Uvas	82	−1.1	3.59	1.87	274
Limones	89	−1.4	3.82	1.96	297
Aceitunas	75	−1.4	3.35	1.78	251
Naranjas	87	−0.8	3.75	1.94	291
Duraznos	89	−0.9	3.82	1.96	297
Peras	83	−1.6	3.62	1.89	277
Piñas	85	−1.0	3.69	1.91	284
Ciruelas	86	−0.8	3.72	1.92	287
Membrillos	85	−2.0	3.69	1.91	284
Pasas	18	—	—	1.07	60
Fresas	90	−0.8	3.86	1.97	301
Mandarinas	87	−1.1	3.75	1.94	291
Sandías	93	−0.4	3.96	2.01	311
Pescado/mariscos					
Bacalao entero	78	−2.2	3.45	1.82	261
Hipogloso entero	75	−2.2	3.35	1.78	251
Langosta	79	−2.2	3.49	1.84	264
Macarela	57	−2.2	2.75	1.56	190
Salmón entero	64	−2.2	2.98	1.65	214
Camarón	83	−2.2	3.62	1.89	277
Carnes					
Res, canal de	49	−1.7	2.48	1.46	164
Hígado	70	−1.7	3.18	1.72	234
Bistec	67	—	3.08	1.68	224
Lomo	56	—	2.72	1.55	187
Pollo	74	−2.8	3.32	1.77	247
Cordero, pierna de	65	—	3.02	1.66	217
Cerdo, canal de	37	—	2.08	1.31	124
Jamón	56	−1.7	2.72	1.55	187
Salchicha de puerco	38	—	2.11	1.32	127
Pavo	64	—	2.98	1.65	214
Otros					
Almendras	5	—	—	0.89	17
Mantequilla	16	—	—	1.04	53
Queso americano	37	−12.9	2.08	1.31	124
Queso suizo	39	−10.0	2.15	1.33	130
Chocolate con leche	1	—	—	0.85	3
Huevos enteros	74	−0.6	3.32	1.77	247
Miel de abeja	17	—	—	1.05	57
Mantecado	63	−5.6	2.95	1.63	210
Leche entera	88	−0.6	3.79	1.95	294
Cacahuates	6	—	—	0.92	20
Cacahuates tostados	2	—	—	0.87	7
Nueces encarceladas	3	—	—	0.87	10
Nueces	4	—	—	0.88	13

Fuentes: [a]Los datos sobre los contenidos de agua y los puntos de congelación se tomaron del *Handbook of Fundamentals* de la ASHRAE, versión en el SI (Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1993), Cap. 30, tabla 1. Usado con autorización. El punto de congelación es la temperatura a la cual esa congelación se inicia para las frutas y los vegetales, y la temperatura promedio de congelación para los otros alimentos.

[b]Los datos del calor específico están basados en los valores del calor específico del agua y el hielo a 0°C y se determinan con base en las fórmulas de Siebel: $c_{p,\,\text{fresco}} = 3.35 \times$ (contenido de agua) + 0.84, arriba del punto de congelación, y $c_{p,\,\text{congelado}} = 1.26 \times$ (contenido de agua) + 0.84, debajo del punto de congelación.

[c]El calor latente de fusión se determina al multiplicar el calor de fusión del agua (334 kJ/kg) por el contenido de agua del alimento.

Anexo 18

TABLA A-3

Propiedades de líquidos, sólidos y alimentos comunes

a) Líquidos

	Datos de ebullición a 1 atm		*Datos de congelación*		*Propiedades de líquidos*		
Sustancia	Punto de ebullición normal, °C	Calor latente de vaporización h_{fg}, kJ/kg	Punto de congelación, °C	Calor latente de fusión h_{if}, kJ/kg	Temperatura, °C	Densidad ρ, kg/m^3	Calor específico c_p, kJ/kg · K
Aceite comestible (ligero)					25	910	1.80
Agua	100	2257	0.0	333.7	0	1 000	4.22
					25	997	4.18
					50	988	4.18
					75	975	4.19
					100	958	4.22
Alcohol etílico	78.6	855	−156	108	20	789	2.84
Amoniaco	−33.3	1357	−77.7	322.4	−33.3	682	4.43
					−20	665	4.52
					0	639	4.60
					25	602	4.80
Argón	−185.9	161.6	−189.3	28	−185.6	1 394	1.14
Benceno	80.2	394	5.5	126	20	879	1.72
n-Butano	−0.5	385.2	−138.5	80.3	−0.5	601	2.31
Dióxido de carbono	−78.4*	230.5 (a 0°C)	−56.6		0	298	0.59
Etanol	78.2	838.3	−114.2	109	25	783	2.46
Etilenglicol	198.1	800.1	−10.8	181.1	20	1 109	2.84
Glicerina	179.9	974	18.9	200.6	20	1 261	2.32
Helio	−268.9	22.8	—	—	−268.9	146.2	22.8
Hidrógeno	−252.8	445.7	−259.2	59.5	−252.8	70.7	10.0
Isobutano	−11.7	367.1	−160	105.7	−11.7	593.8	2.28
Mercurio	356.7	294.7	−38.9	11.4	25	13 560	0.139
Metano	−161.5	510.4	−182.2	58.4	−161.5	423	3.49
					−100	301	5.79
Metanol	64.5	1100	−97.7	99.2	25	787	2.55
Nitrógeno	−195.8	198.6	−210	25.3	−195.8	809	2.06
					−160	596	2.97
Octano	124.8	306.3	−57.5	180.7	20	703	2.10
Oxígeno	−183	212.7	−218.8	13.7	−183	1 141	1.71
Petróleo	–	230–384			20	640	2.0
Propano	−42.1	427.8	−187.7	80.0	−42.1	581	2.25
					0	529	2.53
					50	449	3.13
Queroseno	−04-293	251	−24.9	—	20	820	2.00
Refrigerante R-134a	−26.1	217.0	−96.6	—	−50	1 443	1.23
Salmuera (20% de cloruro de sodio a base másica)	103.9	—	−17.4	—	20	1 150	3.11
					−26.1	1 374	1.27
					0	1 295	1.34
					25	1 207	1.43

* Temperatura de sublimación. (A presiones por debajo de la presión de punto triple de 518 kPa, el dióxido de carbono existe como un sólido o un gas. También, la temperatura de punto de congelamiento del dióxido de carbono es la temperatura de punto triple de –56.5 °C.)

Anexo 19

Table 1 Properties of PCMs used in buildings for heating

Used PCM	Incorporation method	Application	Melting point, °C	Latent heat, kJ/kg	Ref
Sodium acetate trihydrate (SAT)	Macro-encapsulation	SDHW system	58	264	[26]
Paraffin wax	Macro-encapsulation	Solar air heater	54	190	[24]
Paraffin RT50	Macro-encapsulation	SDHW system	51	168	[27]
SP22	Macro-encapsulation	Ventilated facade	22	170	[21]
DuPont sheets Energain® (Paraffin)	Macro-encapsulation	Walls and ceiling	20-35	72.4	[20]
Paraffin	impregnation	Underfloor heating	28	120	[2], [23]
DuPont sheets Energain® (Paraffin)	Macro-encapsulation	PCM wallboard	21.7	70	[23]
In-organic	Macro-encapsulation	Underfloor heating	29	220	[22]
Coconut oil	Macro-encapsulation	Underfloor heating	28	254	[28]
SAT-urea/EG CPCM	Shape-stabilization	Radiant heating	47.84	232.1	[29]