



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE CÁPSULAS PLÁSTICAS PARA USO
MATERIAL DE CAMBIO DE FASE EN UN ENTORNO DE MATERIALES
LIVIANOS**

POR

Pablo Vicente Zúñiga Muñoz

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dr. Carlos Andrés Medina Muñoz
Dr. Cristian Alberto Cuevas Barraza

Marzo 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Pablo Vicente Zúñiga Muñoz

© 2025 Pablo Vicente Zúñiga Muñoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

En memoria de mis abuelos Oscar Waldo y María Amalia, cuyo amor incondicional me sigue acompañando. A mi madre, por su apoyo constante y por darme la oportunidad de equivocarme. A mis hermanos, hermana y amigos, por su compañía y cariño en este tramo del camino de la vida. A mis profesores, entrenadores e instructores, de quienes he tenido el privilegio de aprender, rescatando valiosas enseñanzas y sólidos conocimientos teóricos en distintas áreas.

Resumen

La climatización de edificaciones livianas y su baja inercia térmica representan un desafío para la eficiencia energética. En este contexto, los materiales de cambio de fase (PCM) han surgido como una alternativa para mejorar la regulación térmica natural, permitiendo almacenar y liberar energía en forma de calor latente. Sin embargo, su desempeño térmico depende de la forma de encapsulación y la interacción con los elementos de la aplicación en que se ocupe. Este estudio analiza el impacto de la forma y orientación de cápsulas plásticas de PCM en la estabilidad térmica de un sistema de materiales livianos, evaluando tres tipos de encapsulación (*simple*, *tubos* y *cuadros*) fabricadas con PVC y *wax* de parafina como PCM. Se realizaron ensayos experimentales en un banco de pruebas compuesto por cubos instrumentados con sensores de temperatura, expuestos a condiciones ambientales en dos configuraciones: vertical, ubicando las cápsulas en una posición similar al de estar inmersos en una pared, y horizontal, donde las cápsulas están instaladas como cielo falso de una construcción.

Los resultados indican que la geometría del encapsulado influye significativamente en la regulación térmica del aire interior. En la configuración vertical, la cápsula Cuadros mostró una reducción de hasta 22.81% en la amplitud térmica diaria, atribuida a la compartimentación del PCM, que minimiza la convección interna y mejora la estabilidad térmica. Sin embargo, la cápsula Tubos, pese a tener compartimentos más pequeños, presentó un menor desempeño debido a la mayor cantidad de juntas internas, las cuales generan puentes térmicos que pueden dificultar la transferencia de calor dentro del encapsulado. En la configuración horizontal, donde la gravedad tiene menor influencia en la redistribución del PCM, las diferencias entre diseños fueron menos pronunciadas, con un desempeño levemente superior del diseño *simple*, debido a la ausencia de estos puentes térmicos. Además, se observó el fenómeno de subenfriamiento en la solidificación del PCM, donde el material permaneció en estado líquido por debajo de su temperatura de fusión antes de cristalizar, lo que afecta la eficiencia del almacenamiento térmico.

Estos hallazgos aportan al diseño de estrategias de encapsulación optimizadas para PCM en construcción liviana, evidenciando que la compartimentación mejora la estabilidad térmica en ciertas orientaciones, pero una reducción excesiva del tamaño de los compartimentos puede aumentar la resistencia térmica. Como trabajo futuro, se propone optimizar la geometría del encapsulado, evaluar su desempeño en diversas condiciones climáticas e investigar la viabilidad comercial de esta tecnología como solución sostenible para la eficiencia energética en edificaciones.

Abstract

The increasing energy demand of lightweight buildings and their low thermal inertia pose a challenge for energy efficiency. In this context, phase change materials (PCM) have emerged as an alternative to enhance thermal regulation by storing and releasing heat through phase transitions. However, their thermal performance depends on the encapsulation design and its interaction with the building envelope. This study analyzes the impact of the shape and orientation of plastic PCM capsules on the thermal stability of a lightweight construction system, evaluating three types of encapsulations (*simple*, *tubes*, and *squares*) made of PVC with paraffin wax as the PCM. Experimental tests were conducted using test cubes equipped with temperature sensors, exposed to environmental conditions in two configurations: vertical and horizontal.

The results indicate that the geometry of encapsulation significantly influences indoor thermal regulation. In the vertical configuration, the *squares* capsule reduced daily thermal amplitude by up to 22.81%, attributed to the PCM compartmentalization, which minimizes internal convection and improves thermal stability. However, the *Tubes* capsule, despite having smaller compartments, exhibited lower performance due to the higher number of internal joints, which create thermal bridges that can hinder heat transfer within the encapsulation. In the horizontal configuration, where gravity has less influence on PCM redistribution, the differences between designs were less pronounced, with the *simple* design performing slightly better due to the absence of these thermal bridges. Additionally, supercooling during PCM solidification was observed, where the material remained in a liquid state below its melting temperature before crystallizing, affecting thermal storage efficiency.

These findings contribute to the design of optimized PCM encapsulation strategies for lightweight construction, demonstrating that compartmentalization enhances thermal stability in certain orientations, but excessive reduction in compartment size can increase the number of thermal bridges, impacting system efficiency. Future work should focus on optimizing the encapsulation geometry, assessing its performance in varied climatic conditions, and investigating the commercial feasibility of this technology as a sustainable solution for energy-efficient buildings.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	v
Lista de Tablas	vii
Lista de Figuras	viii
Glosario	x
1 CAPÍTULO 1: Introducción y Estado del Arte.....	1
2 CAPÍTULO 2: Metodología.....	9
2.1 Construcción de banco de ensayos y cápsulas.....	9
2.2 Ensayos.....	13
3 CAPÍTULO 3: Ensayos experimentales.	15
3.1 Prototipos de PCM.....	15
3.2 Banco de ensayos.....	16
3.3 Sistema de medición y adquisición de datos.	18
3.4 Fuentes de error.	21
3.5 Metodología de los ensayos.....	23
3.6 Resultados.....	23
4 CAPÍTULO 4: Análisis y discusión.....	34
5 CAPÍTULO 5: Conclusiones y trabajos futuros.	41
6 Referencias	43

Lista de Tablas

Tabla 1: Propiedades PCM-18. Fuente: Insilico. Co. Ltda. Ficha técnica.	11
Tabla 2: Propiedades cápsulas. Fuente: Elaboración propia.	16
Tabla 3: Temperatura máximas y mínimas, caso vertical representativo. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 4: Datos de cambio de fase para el caso vertical. Fuente: Elaboración propia.	38
Tabla 5: Temperatura máximas y mínimas, ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 6: Datos de cambio de fase para el caso horizontal. Fuente: Elaboración propia.	39

Lista de Figuras

Figura 1: Algunos tipos de encapsulamiento. Fuente: [6].....	3
Figura 2: Dispositivo de almacenamiento de calor latente multi-tubo con configuración optimizada impreso 3D. Fuente: [16]	5
Figura 3: Formas simuladas. Medidas en mm. Fuente: [17]......	6
Figura 4: Validación de simulación de macrocápsula triangular. Fuente: [17].	6
Figura 5: Absorción y liberación de energía en función del tiempo para el proceso de fusión (izquierda) y solidificación (derecha). Fuente: [17].	7
Figura 6: Cubo de ensayo y sistema constructivo 1.2.M.C2.4. Fuente: Elaboración propia.	10
Figura 7: Entalpía acumulada PCM18 entre los 10 y 25 °C. Fuente: Insilico. Co. Ltda. Ficha técnica.	11
Figura 8: Selladora de bolsas. Fuente: IMECO [20]......	12
Figura 9: Sistema constructivo 1.2.M.C2.4 con PCM-18 incorporado. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 10: Esquema de ensayo vertical y flujo de datos. Fuente: Elaboración propia.....	14
Figura 11: Bosquejo cápsulas de PCM. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 12: Estructura de cubos y capa de poliestireno. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 13: Cubos construidos. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 14: Dimensiones termistor NTC 10kΩ MF-52. Fuente: [21].	18
Figura 15: Esquema de circuito de lectura de temperaturas. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 16: Termistores correspondientes a la pared interior y el aire ambiente. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 17: Datos brutos sensores en cápsulas ensayo vertical. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 19: Datos suavizados aire ambiente ensayo vertical. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 20: Datos suavizados de sensores en cápsulas ensayo vertical. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 18: Termistores instalados rotulados. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 21: Aire ambiente cubos para el ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 22: Temperatura sensores cápsulas, ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 23: Temperaturas "Cápsula Simple", ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración Propia.	28
Figura 24: Temperaturas "Cápsula Tubos", ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración Propia.	28
Figura 25: Temperaturas "Cápsula Cuadros", ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración Propia.	29
Figura 28: Datos suavizados aire ambiente ensayo horizontal. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 29: Datos suavizados de sensores en cápsulas ensayo horizontal. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 30: Aire ambiente cubos para el ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración propia.	31

Figura 31: Temperatura sensores cápsulas, ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 32: Temperaturas "Cápsula Simple", ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración Propia.	32
Figura 33: Temperaturas "Cápsula Tubos", ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración Propia.	32
Figura 34: Temperaturas "Cápsula Cuadros", ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración Propia.	33
Figura 27: Diferencia relativa aire respecto al caso base, ensayo vertical. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 36: Referencia relativa aire ambiente respecto al caso base, ensayo horizontal. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 26: Temperatura cápsulas PCM en rango de cambio de fase, Ensayo Vertical. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 35: Temperatura cápsulas PCM en rango de cambio de fase, Ensayo Horizontal. Fuente: Elaboración propia.	39

Glosario

PCM	:	Phase Change Material
R	:	Resistencia eléctrica [Ω]
V	:	Voltaje [V]
T	:	Temperatura en Kelvin [K]
t	:	Temperatura en grados Celsius [$^{\circ}\text{C}$]

CAPÍTULO 1: Introducción y Estado del Arte

Dado el Acuerdo de París [1], adoptado en 2015 en el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, los países firmantes se han comprometido a limitar el aumento de la temperatura media global por debajo de los 2 °C en comparación con los niveles preindustriales, con la meta ideal de no superar 1,5 °C. Dentro de este contexto, el sector de la edificación juega un papel clave, ya que representa aproximadamente el 30 % del consumo final de energía a nivel mundial [2] y es responsable del 21 % de las emisiones de gases de efecto invernadero [3]. Estas emisiones provienen principalmente del uso de combustibles fósiles para calefacción, refrigeración e iluminación, así como del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción. Por lo tanto, mejorar la eficiencia energética en edificaciones y reducir su demanda energética se han convertido en estrategias fundamentales para alcanzar los compromisos climáticos establecidos en el Acuerdo de París.

El sector de las edificaciones presenta un potencial significativo para reducir las emisiones de CO₂, especialmente mediante la implementación de medidas de eficiencia energética, con un potencial de reducción del 40% para el año 2050 [3]. En particular, el 66% de la energía consumida por las edificaciones se destina a la climatización [4], lo que representa un desafío clave para el reacondicionamiento de edificaciones existentes y el diseño de futuras construcciones.

En términos de eficiencia energética en climatización, es crucial considerar tanto la demanda energética del recinto como la eficiencia de los equipos de climatización disponibles. Independientemente del equipo utilizado, la estrategia más eficiente en una edificación es diseñar recintos con baja demanda energética. Pero ¿cómo se logra un recinto con baja demanda de climatización? La forma más efectiva es mediante una envolvente de alta calidad [5], es decir, que los materiales que separan el interior del exterior faciliten una gestión óptima de la energía.

Existen dos parámetros clave de la envolvente térmica de un recinto que permiten predecir su comportamiento térmico con el exterior: la conductividad térmica del material, que representa su resistencia para conducir calor, y la inercia térmica, que refleja su capacidad para almacenar calor. Este último parámetro está generalmente relacionado con la masa de las edificaciones y, por ende, con el calor sensible que pueden almacenar. En los casos de construcciones livianas el valor de este parámetro es bajo en comparación a casas de ladrillo, sin embargo, existen materiales innovadores capaces de absorber calor a través del cambio de estado, lo que permite una alta densidad de almacenamiento de energía en un pequeño volumen. Estos son los materiales de cambio de fase (PCM, por sus siglas en inglés).

Como se ha mencionado, un material con cambio de fase puede almacenar grandes cantidades de calor en un volumen relativamente pequeño, con el beneficio adicional de que la mayor parte de la absorción o liberación de calor se produce a una temperatura aproximadamente constante [6]. Esto lo convierte en un excelente candidato para aplicaciones de almacenamiento de energía térmica en diversos contextos. No obstante, dado que existen PCM de distinta naturaleza, es fundamental seleccionar el más adecuado para cada aplicación. Además, como se verá, el contenedor de este material juega un papel crucial en su desempeño térmico.

Según el rango de temperatura de aplicación, los PCM se clasifican en tres categorías: baja (<20°C), media (20-250°C) y alta temperatura (>250°C). Para aplicaciones en edificaciones, generalmente se

prefieren los PCM de media temperatura, que operan cerca de la temperatura de confort humano, alrededor de 25°C. Asimismo, estos materiales se clasifican según su composición química: orgánicos, inorgánicos y mezclas eutécticas. Los PCM orgánicos se subdividen en derivados de la parafina y no derivados; los inorgánicos incluyen metales o sales hidratadas, y las mezclas eutécticas se componen de dos PCM diferentes que, al mezclarse, forman un material con una temperatura de cambio de fase distinta.

En particular, la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM) en la envolvente térmica de edificaciones ha sido ampliamente estudiada como una estrategia para reducir el consumo energético y mejorar la estabilidad térmica interior. Se ha demostrado que la incorporación de PCM en muros, techos y ventanas permite reducir la transferencia de calor y retrasar los picos de temperatura en el interior de los recintos. En estudios recientes, se ha observado que la inclusión de PCM en ventanas puede disminuir la transferencia de calor en un 18-40%, mientras que su integración en muros encapsulados puede retrasar los picos térmicos en hasta 7 horas, mejorando así la inercia térmica del sistema [7]. Además, en aplicaciones de techos con PCM, se ha registrado una reducción de la temperatura interior de hasta 5°C, con un efecto positivo en la estabilidad térmica diaria [8]. Sin embargo, la eficiencia de estos sistemas depende en gran medida de la forma de encapsulación y de la integración del PCM dentro de los materiales constructivos, ya que su conductividad térmica y la tasa de intercambio de calor afectan el rendimiento general del almacenamiento térmico [9].

Las tendencias actuales en el uso de PCM en construcción se centran en el desarrollo de nanoestructuras de PCM, que buscan mejorar la estabilidad térmica y aumentar la eficiencia de la transferencia de calor mediante el uso de nanopartículas conductoras. Se ha explorado el uso de PCM multifuncionales, integrados con sistemas solares térmicos y geotermia, para optimizar el almacenamiento de energía y reducir la dependencia de fuentes energéticas externas [10]. Además, el avance en PCM de origen biológico, basados en aceites vegetales y otras fuentes renovables, ha demostrado ser una alternativa prometedora para el desarrollo de materiales más sostenibles [11]. No obstante, persisten desafíos en términos de costo, estabilidad a largo plazo y compatibilidad con materiales constructivos, lo que ha impulsado investigaciones sobre nuevas técnicas de encapsulación y la optimización de la disposición y geometría de los PCM dentro de la envolvente térmica de edificaciones [12].

Dependiendo de cómo se desee incorporar el PCM en la envolvente térmica de una vivienda, es esencial considerar dos aspectos: la selección del tipo de material y la selección del encapsulamiento [13]. Para elegir el material, este no debe ser nocivo para la salud, no tóxico, tener una temperatura de cambio de fase en el rango deseado, poseer un alto calor latente, ser químicamente estable y poseer un bajo costo. Los derivados de la parafina, conocidos como "paraffin wax", cumplen con estos requisitos, pero presentan la desventaja de una baja conductividad térmica y la facilidad de escurrimiento de sus cápsulas.

En cuanto al encapsulamiento, se diferencian entre macrocápsulas, con un diámetro mayor a 1 mm, y microcápsulas, con diámetros menores. Las macrocápsulas son más fáciles y económicas de fabricar, pero pueden no aprovechar completamente el cambio de fase debido a un cambio de estado incompleto, lo que reduce su potencial térmico. Por otro lado, las microcápsulas, aunque más costosas y complejas de producir, evitan mejor el escurrimiento del material y aseguran un cambio de fase más eficiente.

Para el diseño de macrocápsulas, es necesario tener en cuenta cuatro aspectos fundamentales para lograr un cambio de estado rápido y completo: la geometría del contenedor del PCM, el tipo de material, la compatibilidad con el PCM y la optimización de la superficie exterior en términos de transferencia de calor. Algunos ejemplos de distintas formas de encapsulado se presentan en la **Figura 1**. De lo revisado en [6], se destaca que, en general, las formas esféricas de los contenedores presentan un mejor rendimiento en el cambio de fase del PCM en comparación con otras formas, y que las cápsulas más pequeñas logran un tiempo de cambio de fase menor. Además, la conductividad térmica de la cápsula influye en el tiempo de cambio de fase; sin embargo, a espesores reducidos de la cápsula, el efecto de la conductividad térmica disminuye, manteniendo un rendimiento similar en todos los casos. En cuanto a la compatibilidad de materiales, el acero inoxidable se evalúa como el más seguro contra la corrosión, superando al latón, cobre y aluminio. El uso de aletas en contenedores cilíndricos es una medida prometedora para mejorar el rendimiento. Finalmente, el estudio señala la falta de literatura con ensayos experimentales, predominando las simulaciones numéricas, lo que sugiere una oportunidad significativa para generar conocimiento en este ámbito.

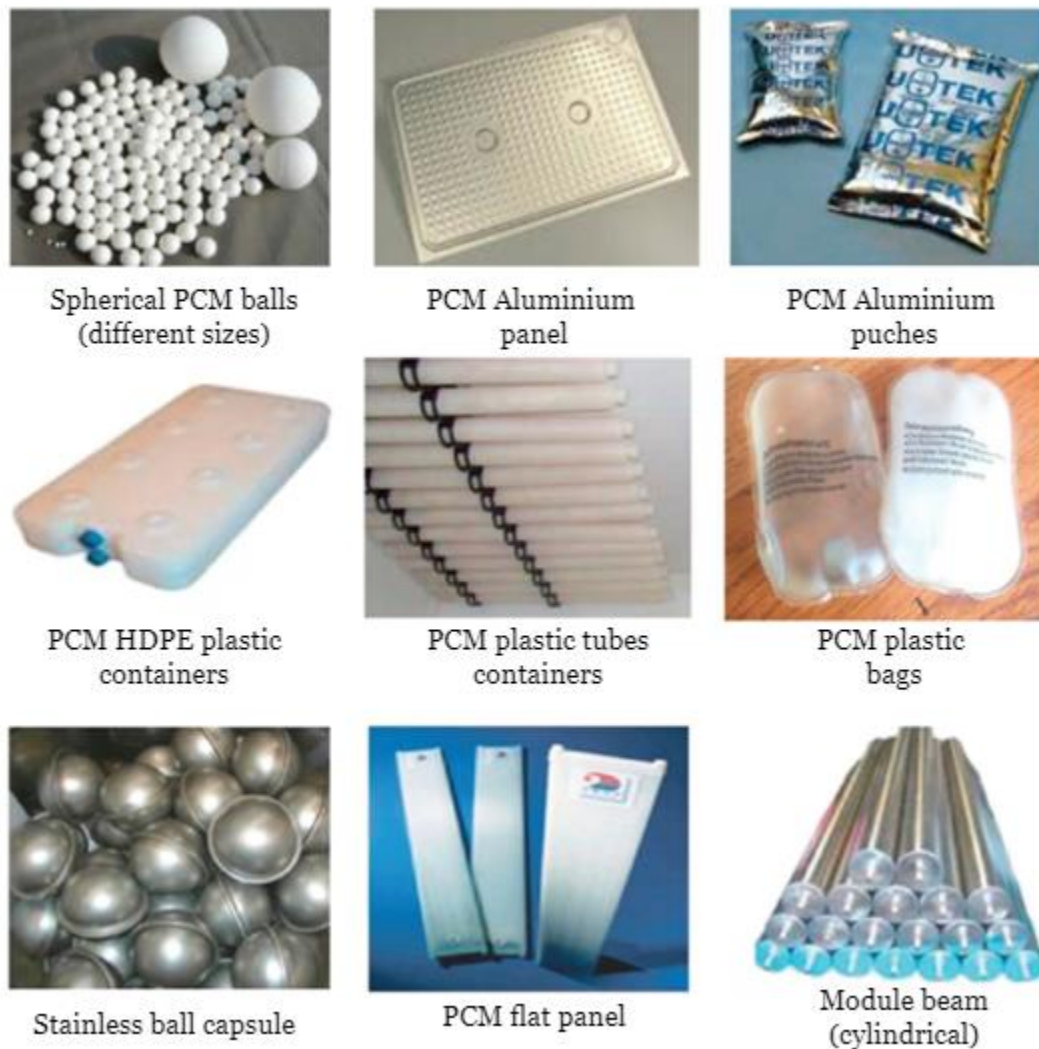


Figura 1: Algunos tipos de encapsulamiento. Fuente: [6].

Otros materiales atractivos para el encapsulamiento de PCM son los plásticos. Aunque no poseen la conductividad térmica de los metales mencionados anteriormente, su uso en pequeños espesores hace que esta propiedad no sea determinante en el rendimiento térmico del material. Sin embargo, existen desafíos importantes para garantizar la hermeticidad necesaria y así evitar el escurrimiento del PCM. En [14], se estudió la infiltración de distintos materiales de cambio de fase en muestras de plástico durante 16 semanas, sometidas a ciclos térmicos periódicos. De los plásticos seleccionados, PP-H, PE-HD y PVC-U, este último demostró las mejores características de seguridad contra la permeabilidad del PCM, con una 22filtración menor al 0,1% según un análisis gravimétrico.

Por otro lado, uno de los principales desafíos en el uso de materiales de cambio de fase (PCM) para almacenamiento térmico es su baja conductividad térmica, lo que limita la rapidez con la que pueden absorber y liberar calor. Para mejorar la eficiencia de transferencia térmica, se han estudiado diferentes estrategias, como el uso de aditivos metálicos, aletas de conducción térmica y encapsulación optimizada. Sin embargo, otro aspecto clave en la mejora del rendimiento térmico de los PCM es la convección natural dentro del material fundido.

Estudios recientes han demostrado que la fusión de un PCM no ocurre de manera uniforme, sino que inicialmente está dominada por conducción térmica, hasta que se genera una cantidad suficiente de PCM fundido para que la convección natural comience a actuar, acelerando la transferencia de calor. En particular, Azad et al. [15] investigaron las condiciones necesarias para el inicio de la convección natural en PCM encapsulados en sistemas cilíndricos, determinando que la geometría del contenedor y el grado de subenfriamiento del PCM afectan significativamente el momento en que la convección se vuelve dominante. Encontraron que se requiere un mayor volumen de PCM fundido para iniciar la convección cuando el encapsulamiento tiene un diámetro mayor, y que el subenfriamiento retrasa este proceso. El subenfriamiento se manifiesta cuando el material permanece en estado líquido por debajo de su temperatura de solidificación, lo que afecta la eficiencia en el almacenamiento y liberación de energía térmica.

Estos hallazgos son altamente relevantes para aplicaciones en construcción liviana, donde los PCM encapsulados pueden desempeñar un papel en la regulación térmica de un ambiente interior. En particular, el diseño y la orientación de la encapsulación pueden influir en la efectividad del almacenamiento térmico, ya que diferentes configuraciones pueden afectar el inicio y la intensidad de la convección natural dentro del PCM. En este contexto, la presente investigación evaluará el impacto de la forma y orientación de cápsulas de PCM en un sistema constructivo liviano, analizando cómo estos factores influyen en la estabilidad térmica del aire ambiente.

En la misma línea, el rendimiento térmico, es decir, la capacidad del material de cambiar de fase rápidamente dentro de la cápsula en respuesta a las variaciones de temperatura del exterior está fuertemente influenciado por la forma de la cápsula que lo contiene. Un estudio [16] demostró mediante un análisis topológico que la incorporación de aletas en dispositivos tubulares de almacenamiento térmico que contienen PCM, puede mejorar significativamente su rendimiento. La forma final resultante de este estudio se presenta en la *Figura 2*. No obstante, determinar la forma óptima para maximizar este rendimiento no es una tarea trivial. La combinación de conductividad térmica, convección y disposición geométrica del PCM y su material encapsulante presenta desafíos de consideración. Estos desafíos ofrecen una amplia oportunidad para generar conocimiento innovador, explorando nuevas configuraciones y materiales que optimicen el rendimiento térmico en

aplicaciones de construcción. La investigación futura en este campo podría descubrir formas y estrategias de encapsulación que no solo mejoren la eficiencia energética, sino que también se adapten a las diversas necesidades operativas de los edificios modernos, contribuyendo así al avance en el uso de PCM como una tecnología clave en la construcción sostenible.

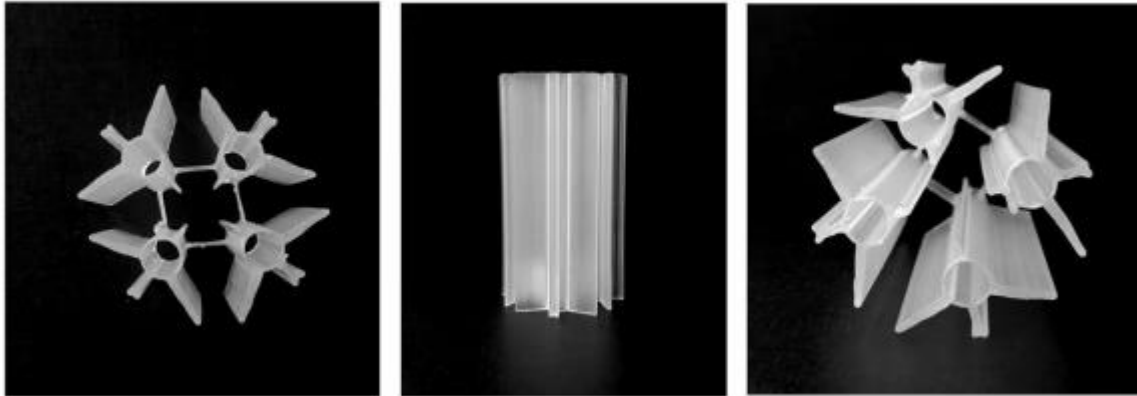


Figura 2: Dispositivo de almacenamiento de calor latente multi-tubo con configuración optimizada impreso 3D. Fuente: [16]

En la búsqueda de mejorar el rendimiento de los sistemas que ocupan materiales con cambio de fase a través de la geometría, Patel et al. [17] estudian cuatro formas de macro-encapsulación para un PCM a base de parafina mediante un modelamiento numérico en Ansys Fluent 16.2. Se simulan cuatro formas de macro cápsula: esférica, cúbica, triangular y en forma de cruz, como se muestra en la **Figura 3**. El modelo es validado a través de un ensayo experimental con la cápsula de forma triangular, mostrando que el tiempo de fusión y solidificación de cada cápsula está directamente relacionado con su geometría. Esto se debe a que, al principio, la transferencia de calor desde el exterior al interior ocurre principalmente por conducción, desde la carcasa al material de cambio de fase. Sin embargo, una vez que comienza la fusión en las paredes, el modo predominante de transferencia de calor en el interior de la cápsula es la convección natural entre el PCM líquido y sólido, la cual está influenciada por el recorrido que hace el fluido dentro de la cápsula, y, por consiguiente, por la forma de esta. A su vez, durante la solidificación ocurre lo contrario: al inicio predomina la convección natural como el principal modo de transferencia de calor en el interior de la cápsula, pero posteriormente, predomina la conducción a través del PCM solidificado. Algunos resultados gráficos de la validación se muestran en la **Figura 4**.

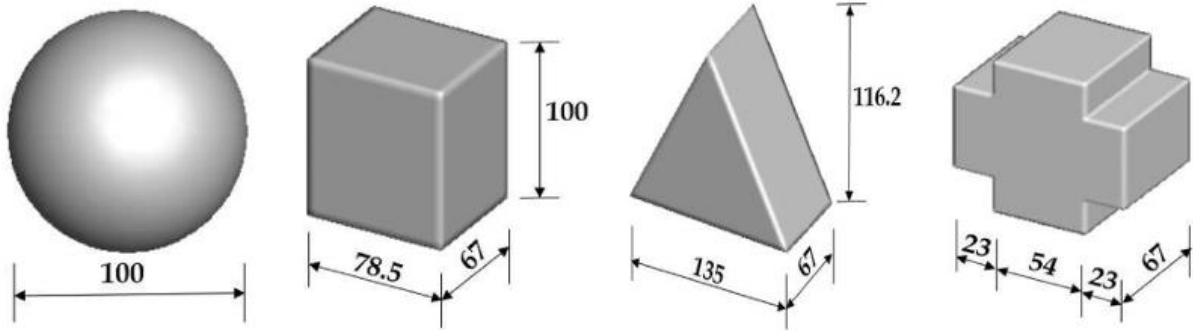


Figura 3: Formas simuladas. Medidas en mm. Fuente: [17].

Los resultados de este estudio muestran que, para alcanzar la misma absorción y liberación de energía, el tiempo requerido para cada forma de cápsula puede variar considerablemente, como se muestra en la **Figura 5**. Esto es relevante al considerar cuánto tiempo se desea mantener la inercia térmica en la aplicación del material de cambio de fase, lo cual dependerá de los ciclos de temperatura a los que se enfrente. Además, una vez validado, este modelo constituye una herramienta valiosa para el análisis del rendimiento térmico de macro cápsulas de PCM.

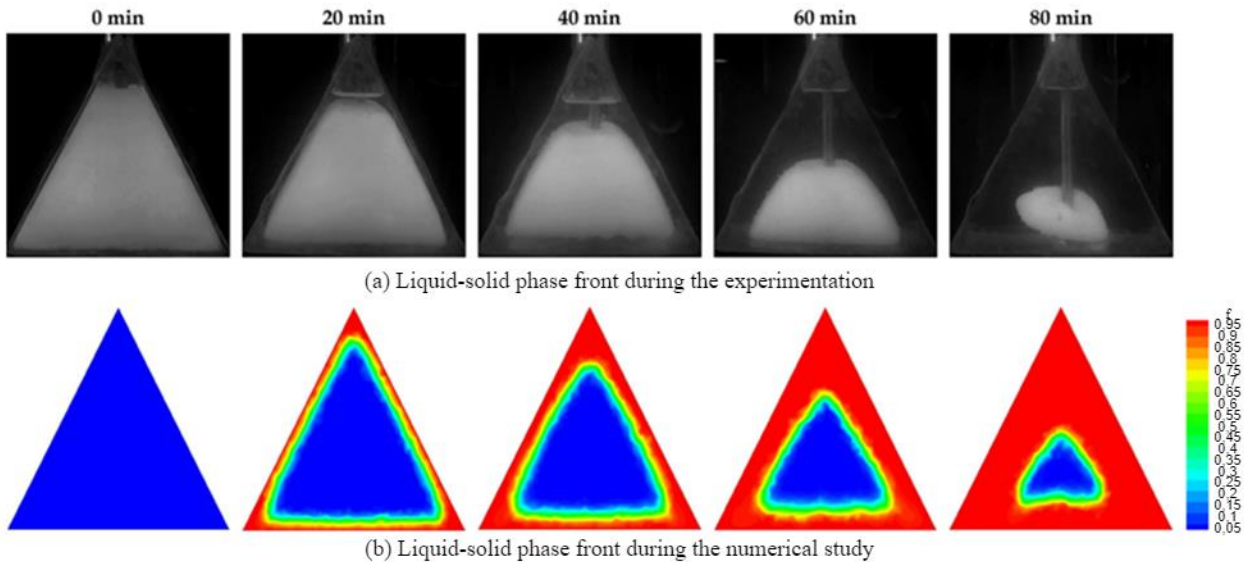


Figura 4: Validación de simulación de macrocápsula triangular. Fuente: [17].

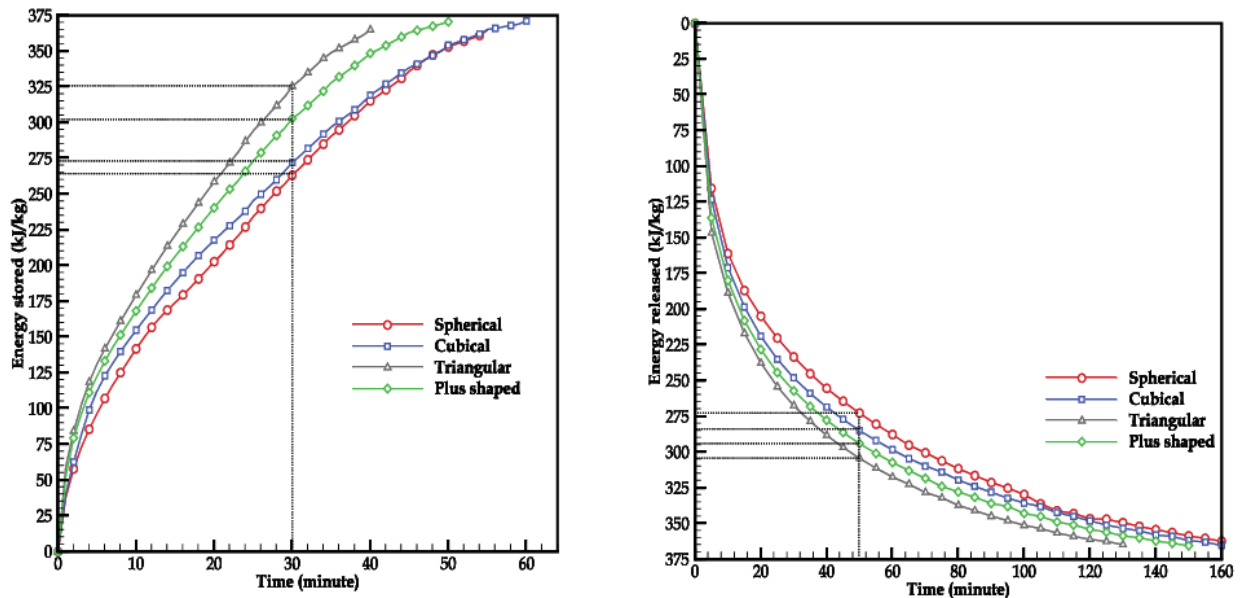


Figura 5: Absorción y liberación de energía en función del tiempo para el proceso de fusión (izquierda) y solidificación (derecha). Fuente: [17].

Resumidamente, se ha observado que el material de una macrocápsula que incorpora PCM debe seleccionarse considerando la compatibilidad con el PCM para evitar problemas de corrosión, así como su porosidad, para prevenir fugas del material. Paralelamente, el espesor de la cápsula determinará tanto su resistencia mecánica frente a las exigencias a las que esté sometida, como la eficiencia en la transferencia de calor por conducción entre la superficie exterior e interior. Por último, la forma y el tamaño de la cápsula influirán en el tiempo que esta tarda en absorber y liberar el calor, así como en la cantidad de calor que puede almacenar. Sin embargo, aún existe una brecha entre esta tecnología y una aplicación concreta.

Esta Memoria de Título se enfocará en explorar una técnica de encapsulado para un material de cambio de fase de origen orgánico, variando la distribución y forma de las cápsulas para comparar sus atributos térmicos y de fabricación. A continuación, se presentan la hipótesis y los objetivos del estudio.

Hipótesis: La *capacidad de regulación térmica* de un ambiente construido con materiales livianos, cuya envolvente incluye material de cambio de fase (PCM) del tipo parafina encapsulado en macrocápsulas de plástico, *mejora al reducir el tamaño de las cápsulas y aumentar la inclinación de su orientación*, optimizando la distribución del PCM durante su cambio de fase.

Objetivo general: Evaluar el impacto de la forma y orientación de cápsulas plásticas que contienen materiales de cambio de fase (PCM) del tipo *wax* de parafina en la estabilidad térmica del aire ambiente interior en un cubo de ensayo de materiales livianos.

Objetivos específicos:

1. Diseñar y construir, cápsulas plásticas que contienen PCM en distintas geometrías y bancos de ensayos de material liviano.
2. Medir y analizar la temperatura del aire ambiente interior en cubos de ensayo con cápsulas orientadas vertical y horizontalmente, utilizando sensores conectados a un sistema de adquisición de datos.
3. Comparar la influencia de la forma y orientación de las cápsulas en la capacidad de reducir la variación térmica diaria del ambiente interior de un cubo de ensayo.

De este modo, de la hipótesis se espera que reduciendo el tamaño de las cápsulas mejore la distribución del material en estado líquido. Además, gracias a esto se tendrá un flujo de convección natural dentro de la capsula más reducido, lo que se espera mantenga un cambio de fase más uniforme en la cápsula completa a medida que se aumentan la cantidad de compartimientos, como se verá más adelante.

CAPÍTULO 2: Metodología

Para la comprobación de la hipótesis, este estudio se centrará en la comparación del comportamiento térmico de tres macro cápsulas con material de cambio de fase dentro de tres cubos de ensayo construidos con materiales livianos sometidos a condiciones ambientales. Estos sistemas serán comparados con un “caso base” que no contará con material de cambio de fase. Así, se evaluará la capacidad de mantener una temperatura más estable al interior de cada sistema bajo distintas orientaciones de las cápsulas, con respecto a un caso en común. Además, se comentarán los desafíos que implica la construcción de cada prototipo y así contribuir a un desarrollo del tipo de encapsulado.

La metodología la podemos dividir en tres ítems principales: la construcción de los bancos de ensayos y cápsulas, el diseño y ejecución de los ensayos experimentales y el análisis de resultados de estos.

2.1 Construcción de banco de ensayos y cápsulas.

Para el estudio comparativo de las cápsulas, estas se dispondrán dentro de tres cubos de ensayo para ser comparadas con un cuarto cubo que no contendrá cápsulas. Para esto se construirán cuatro cubos de plumavit de lado 0,5 m, en el que una cara de cada uno de estos corresponderá a un tabique compuesto de, revestimiento interior, aislación, plancha estructural y revestimiento exterior, de manera de evaluar su desempeño en un ambiente de baja inercia térmica, tal como se muestra en la **Figura 6**. Tres de estos cubos contendrán cada uno de los distintos prototipos de cápsula y uno estará sin material de cambio de fase, el que servirá de referencia como caso base.

Los materiales del tabique fueron seleccionados según el “Listado Oficial de Soluciones Constructivas para el Acondicionamiento Térmico” publicado por el MINVU [18]. Por simplicidad se eligió el sistema 1.2.M.C2.4, descrito como un tabique perimetral de estructura de madera con aislación térmica de poliestireno expandido de 10 kg/m^3 , revestimiento interior de yeso cartón standard de 10 mm y revestimiento exterior de placa OSB de 9,5 mm. La **Figura 6** muestra un esquema del cubo utilizado en los experimentos.

Si bien este experimento no reúne las condiciones de la dinámica térmica de una construcción liviana como la que se referencia, es un punto de partida válido para conocer qué tipo de cápsula es prometedora para un caso a escala.

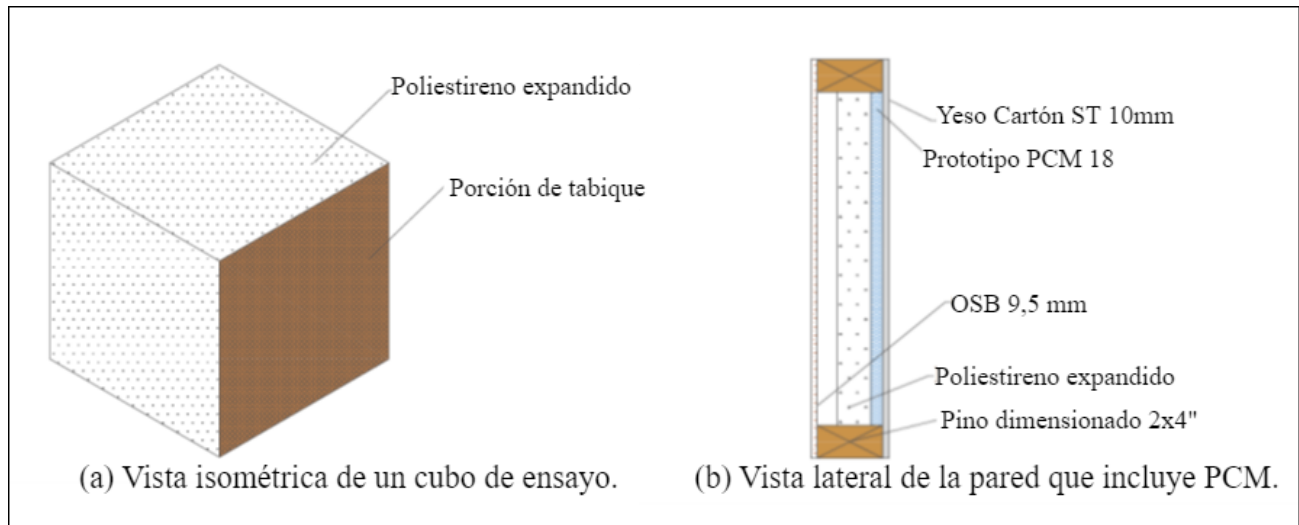


Figura 6: Cubo de ensayo y sistema constructivo 1.2.M.C2.4. Fuente: Elaboración propia.

Para la construcción de prototipos se dispone de un material de cambio de fase adquirido a través de un programa de emprendimiento de IncubaUdec, financiado por CORFO. Se dispone de 10 kg de muestra de *wax* de parafina con punto de fusión de 18 °C que en un principio fue seleccionado por encontrarse cerca de la temperatura de confort humana, sin embargo, estudios como [19] proponen temperaturas de cambio de fase de 22°C. Como la presente memoria de título no pretende encontrar la temperatura de confort óptima de cambio de fase, el material adquirido nos servirá para estudiar el efecto de la geometría sobre el comportamiento térmico del PCM.

El material provisto por la empresa coreana “Insilico. Co. Ltda.” consiste en una muestra de 10 kg de hexadecano en formato bruto, lo que corresponde a un PCM de origen orgánico. Algunas especificaciones técnicas se presentan en la **Tabla 1**. Su comportamiento térmico durante el cambio de fase se presenta en la **Figura 7**.

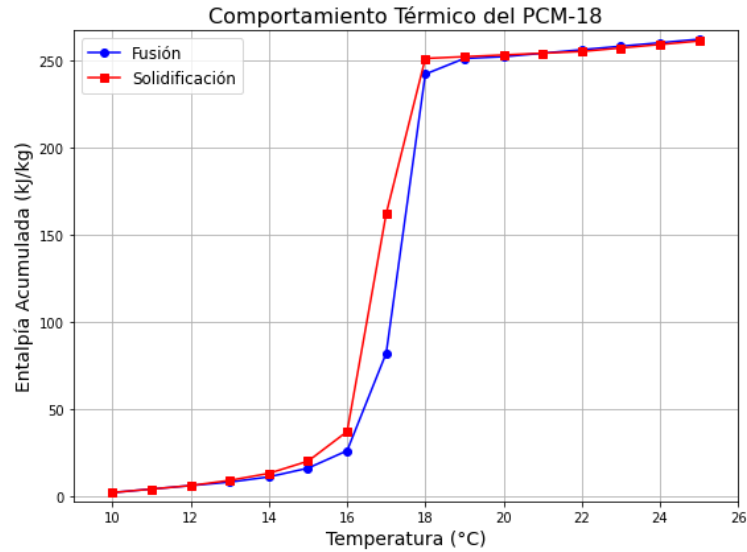


Figura 7: Entalpía acumulada PCM18 entre los 10 y 25 °C. Fuente: Insilico. Co. Ltda. Ficha técnica.

La manipulación de este material no significa un peligro para la salud, sin embargo, como medida de seguridad recomendada por el fabricante se requiere tratar el material con guantes de látex y evitar el contacto con ojos y boca.

Tabla 1: Propiedades PCM-18. Fuente: Insilico. Co. Ltda. Ficha técnica.

Propiedad	Unidad de Medida	Valor
Densidad @ 25°C	g/cm ³	0,7773
Densidad @ 40°C	g/cm ³	0,7590
Punto de fusión	°C	18
Punto de ebullición	°C	287

Para la construcción de las 3 distintas cápsulas se utilizarán bolsas de plástico sellables al calor. El sellado de esta se hará a través de una selladora de calor como la de la **Figura 8**.



Figura 8: Selladora de bolsas. Fuente: IMECO [20].

Se dispondrá la misma cantidad de material para los tres prototipos de cápsula. Este se distribuirá en distintas formas gracias a las bolsas plásticas que pueden ser selladas en compartimientos. Se construirá una cápsula simple de contorno cuadrado como referencia y las otras dos con formas según lo permita el proceso de fabricación manual, buscando siempre imponer diferencias que modifiquen el movimiento del material de cambio de fase al interior de las cápsulas. En la **Figura 9** se presenta un esquema de pared con la cápsula de PCM-18 incorporada.

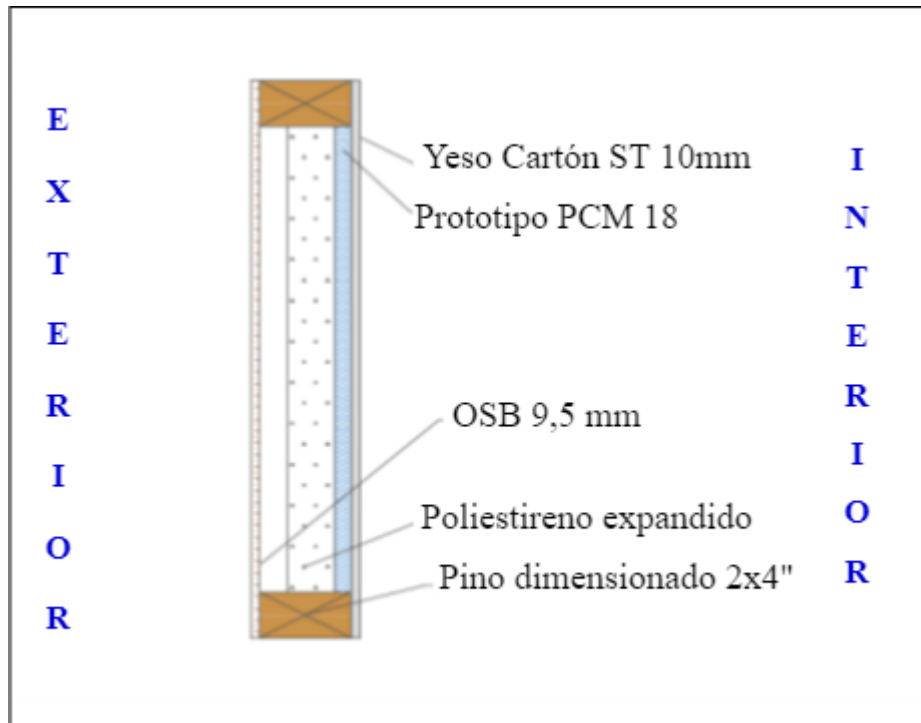


Figura 9: Sistema constructivo 1.2.M.C2.4 con PCM-18 incorporado. Fuente: Elaboración propia.

2.2 Ensayos.

Una vez contruidos los bancos de ensayos y prototipos, estos serán instrumentados con termistores “NTC 10k” para obtener las temperaturas de los puntos de interés dada su precisión en comparación a otros sensores resistivos. Estos termistores comerciales se compararán con curvas de relación resistencia-temperatura del fabricante para evitar ensayos de calibración. Los termistores se distribuirán en las cápsulas, en las paredes interiores y en el aire ambiente de cada cubo de ensayo.

Para evaluar el efecto de la orientación de las cápsulas, los ensayos se dividirán en dos, uno en el que las cápsulas estarán en posición vertical y otro en posición horizontal. Esto se logrará cambiando la orientación de las paredes de tabique de los cubos de ensayo.

Para cada posición a ensayar, se dispondrán los cubos a la intemperie ubicados de manera en que no se hagan sombra entre ellos y en un lugar que no reciba sombra durante el día. Así, las variaciones de los flujos de calor que interactúan con los cubos estarán determinadas por las condiciones ambientales de los días en que se realicen los ensayos.

Se registrarán datos por al menos dos días para cada posición y luego se elegirán las 24 horas de mediciones más representativas para el análisis comparativo.

Para la recolección de los datos de temperatura durante el ensayo, se implementará un sistema de medición basado en la placa Arduino UNO. Este se encargará de leer las señales de los termistores para su posterior almacenamiento y análisis.

En la **Figura 10**, se muestra un cubo en posición para el caso de ensayo horizontal, instrumentado con termistores en la cápsula de PCM, pared interior y aire ambiente, este último cubierto por una pantalla anti-radiación. Al costado, se muestra un esquema del flujo de datos desde los termistores al computador.

Finalmente se analizarán los datos, comparando las temperaturas interiores y de los prototipos para cada paso de tiempo. Para esto se confeccionarán curvas a partir de los datos de cada termistor y estos serán comparados con el caso base a través de un programa de análisis de datos como Excel. Además, se comentarán los distintos desafíos encontrados a la hora de la fabricación de cada tipo de cápsula.

Como se ha mencionado anteriormente, este ensayo no busca crear un ambiente a escala de una construcción liviana, sin embargo, se usan materiales livianos por su baja inercia térmica, lo que da un punto de partida para luego escalar una cápsula en particular.

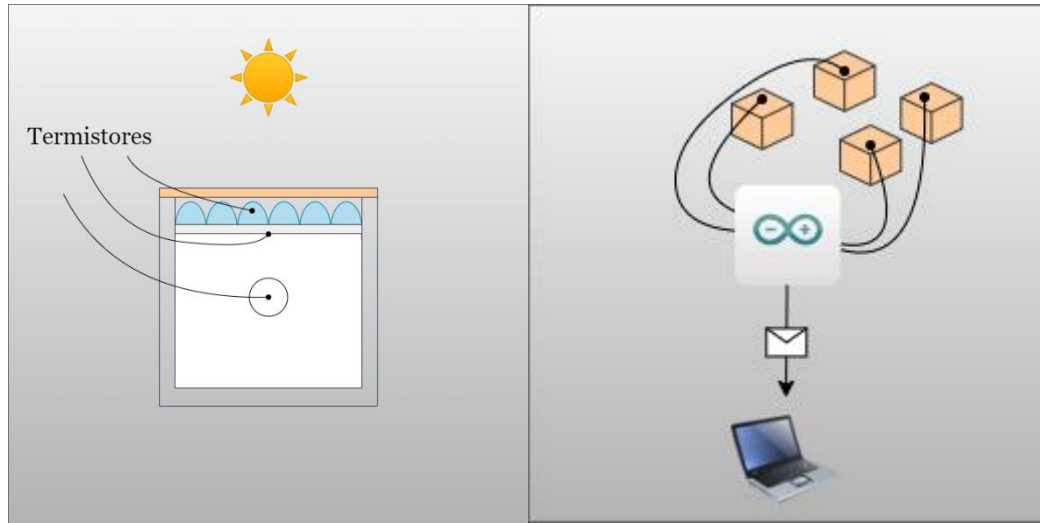


Figura 10: Esquema de ensayo vertical y flujo de datos. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 3: Ensayos experimentales.

En este capítulo se presentan en detalle los elementos que constituyen el banco de ensayos, tales como, cápsulas, cubos de ensayo, sistema de adquisición de datos, entre otros, así como también las mediciones realizadas. Posteriormente se muestran los resultados obtenidos para cada condición.

3.1 Prototipos de PCM.

Como material encapsulante se utilizó plástico en formato de rollo de bolsa para sellar mediante una selladora de calor y lograr así las distintas formas. En primer lugar, se grababan los distintos compartimientos, para luego rellenarse con PCM.

Con el fin de imponer una diferencia en el movimiento del PCM al interior de las cápsulas cuando este cambie de fase y así condicionar la convección natural al interior estas, se diseñaron con tres formas notoriamente distintas.

La primera, con la forma más simple, solo está sellada por los bordes permitiendo grandes cambios de forma de la cápsula durante el estado líquido del material. La segunda, divide el material en tubos horizontales pequeños lo que limita el movimiento del material, sobre todo cuando este es instalado en una pared vertical. La tercera, secciona el material en cuatro partes, admitiendo menores cambios de forma que la primera, pero más que la segunda.

En la **Figura 11**, se presentan esquemas de las cápsulas con su vista frontal y de planta. En (a) la *cápsula simple*, en (b) la *cápsula de tubos* y en (c) la *cápsula de cuadros*.

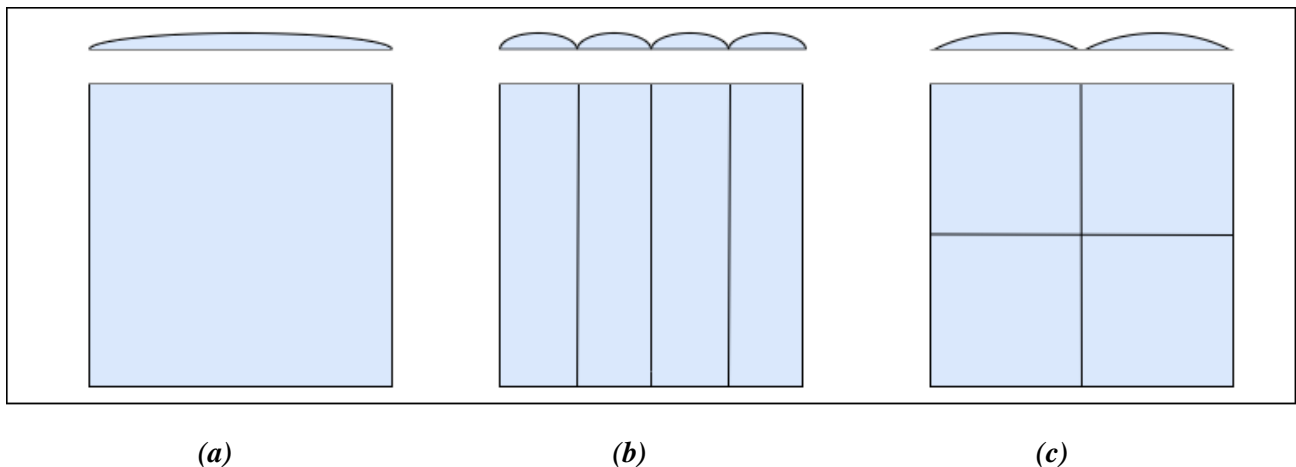


Figura 11: Bosquejo cápsulas de PCM. Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que, debido a la técnica manual de encapsulado, no se logra que todas tengan exactamente la misma cantidad de material, pero si un rango aceptable de diferencia. A continuación, en la **Tabla 2** se presentan datos relevantes de cada cápsula como la cantidad de material y el tamaño

de las superficies en contacto con material de cambio de fase y superficie de juntas, en que el paso de calor ocurre solo a través del espesor de la bolsa plástica.

Tabla 2: Propiedades cápsulas. Fuente: Elaboración propia.

Cápsula	Superficie PCM [cm ²]	Superficie Libre [cm ²]	Masa PCM [g]
Simple	1394	0,0	607
Tubos	1404	62,4	597
Cuadros	1362	31,7	580

3.2 Banco de ensayos.

Como se mencionó en el capítulo anterior, se busca someter las distintas cápsulas a un ambiente comparable entre cada una de ellas y para esto se eligió una aplicación específica de una construcción liviana pequeña, por la facilidad de construcción y la accesibilidad de los recursos.

Este ambiente se consiguió mediante cubos de ensayo de 0,5 m de lado exterior, cinco de sus lados compuestos de una capa de 50 mm de poliestireno expandido y una cara multicapa compuesta de una placa de yeso cartón de 10 mm, una cápsula de PCM y una plancha de madera aglomerada de 9mm. La estructura se hizo con la misma cantidad de pino radiata para cada uno de los cubos. En la **Figura 12** se presentan las distintas partes construidas y en la **Figura 13** los cubos terminados.



Figura 12: Estructura de cubos y capa de poliestireno. Fuente: Elaboración propia.



Figura 13: Cubos contruidos. Fuente: Elaboración propia.

Se puso especial cuidado en mantener el ambiente interno lo más estanco posible, cubriéndose todos los espacios que pudiese haber entre juntas de planchas. Los orificios para cables fueron rellenados con silicona y se utilizaron tornillos para asegurar una adherencia completa de la plancha exterior e interior a la estructura.

Como se pretende comparar el efecto del material con cambio de fase en el aire ambiente interior, en **Tabla 1** se presenta la capacitancia de los materiales que componen los cubos, para un rango de temperaturas comprendido entre 11 y 26 °C, es decir, su capacidad de almacenamiento de energía térmica. Se elige este rango para comparar con los datos de la ficha técnica del material de cambio de fase.

Propiedades para el rango de temperaturas de 11 a 28 °C			
Material	Masa [kg]	Calor específico [J/kg*K]	Capacitancia [J]
Pino Radiata	3,82	1600	91680
Poliestireno expandido	0,53	1210	9620
OSB	1,68	1552	39110
Yeso Cartón	1,875	1050	29531
PCM 18	0,595	150000	89250

Tabla 3: Capacitancia de materiales que componen el cubo de ensayo. Fuente: [21], [22], [23], [24].

Las propiedades fueron obtenidas desde distintos estudios y fichas técnicas según el caso. Se puede concluir que el material de cambio de fase representa un 34% de la capacitancia del cubo de ensayo y solo un 7% de la masa total de este.

3.3 Sistema de medición y adquisición de datos.

Para la medición de temperatura se utilizaron termistores, que son resistencias térmicamente sensibles. Para este caso se utilizó un modelo NTC de 10k Ω , lo que significa que su resistencia a 25°C es de 10k Ω y esta disminuye a medida que aumenta la temperatura (Negative Temperature Coefficient). Estos fueron ubicados en distintos puntos del banco de ensayo para medir la temperatura del aire ambiente dentro de los cubos, la pared interior de yeso cartón y el borde exterior de las cápsulas de PCM, es decir, por el borde que colinda con la placa OSB. Se midió el borde de las cápsulas y no dentro de ellas por motivos prácticos, ya que incluirlos dentro de la cápsula aumentaba las posibilidades de fuga de material.

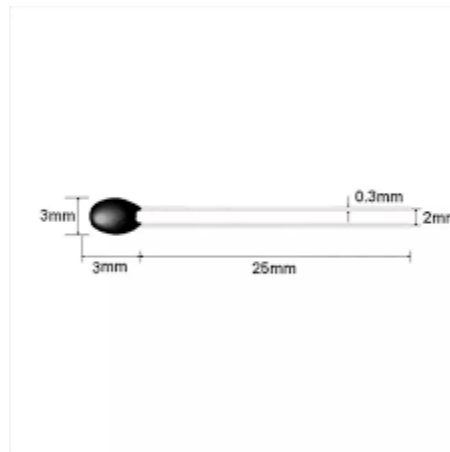


Figura 14: Dimensiones termistor NTC 10k Ω MF-52. Fuente: [21].

Para censar y almacenar los datos se utilizó una placa Arduino UNO, microcontrolador basado en el chip ATmega328P que permite la lectura de señales analógicas y digitales mediante pines de entrada y salida. Su funcionamiento se basa en la conversión de señales analógicas, como la variación de voltaje de los termistores, a valores digitales mediante un conversor ADC (Analog-to-Digital Converter) de 10 bits, permitiendo procesar y registrar datos con alta precisión.

Cada termistor se conectó a una resistencia en serie para formar un divisor de voltaje, permitiendo medir la variación de voltaje entre estos dos elementos en función de la temperatura. Este divisor de voltaje proporciona una señal analógica que es leída por los pines de Arduino.

El circuito básico consistió un divisor de voltaje entre un termistor y una resistencia de polarización de valor 10k Ω para maximizar la sensibilidad de las lecturas en el rango de temperaturas esperadas. Entre el termistor y la resistencia se conectó un pin analógico que leyó el voltaje de salida con el que se calculó la resistencia del termistor como sigue.

$$R_t = R_f \cdot \frac{V_{out}}{V_{in} - V_{out}} \quad (1)$$

Donde,

R_t : resistencia del termistor

R_f : resistencia fija [10k Ω]

V_{in} : voltaje de alimentación [5V]

V_{out} : voltaje medido por el pin analógico

Para aumentar la cantidad de termistores a instalar, se conectó un multiplexor a la placa. Este permite aumentar en 16 unidades la cantidad de pines analógicos disponibles. El esquema de conexión del circuito, construido a través del software *Fritzing*, se presenta en la **Figura 15**.

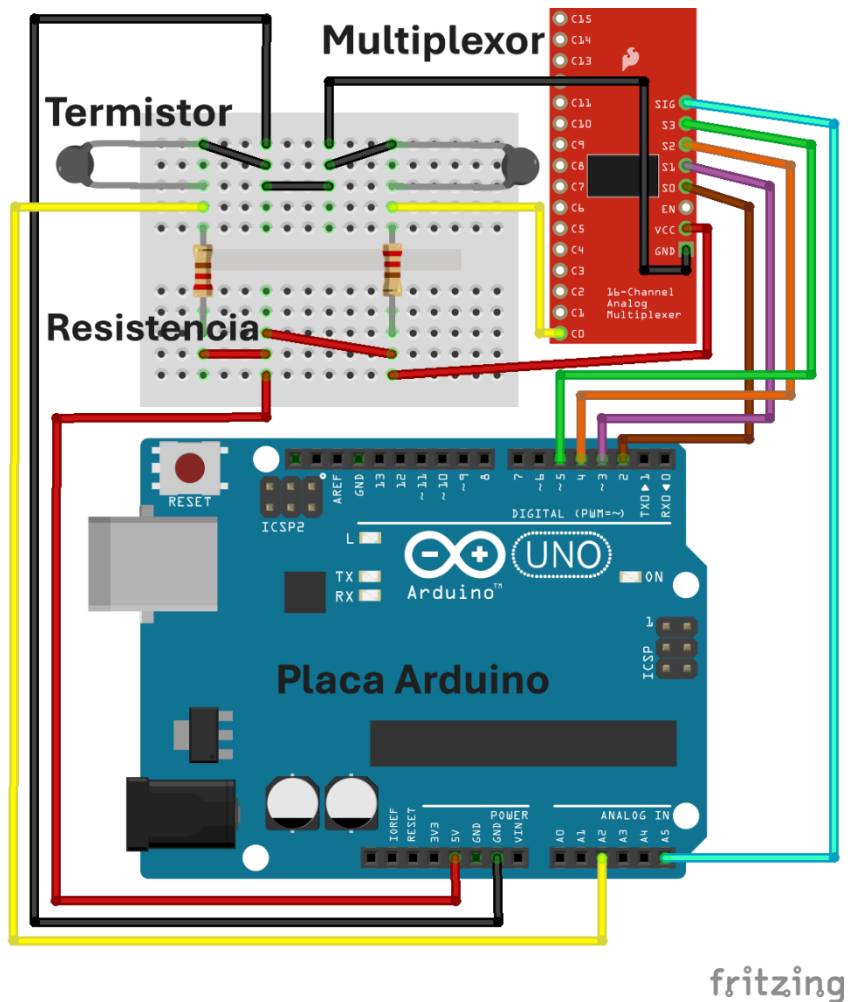


Figura 15: Esquema de circuito de lectura de temperaturas. Fuente: Elaboración propia.

En este proyecto, el Arduino UNO se configuró a través de Arduino IDE para leer las variaciones de resistencia de los termistores NTC. Posteriormente, a través de un cable de datos USB 2.0 y una

comunicación mediante un código Python implementado en Spyder, se recibieron los datos de resistencias para calcular la temperatura mediante la ecuación de Steinhart-Hart, presentada en (2), y almacenarlas en un archivo de valores (extensión .csv).

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot [\ln(R)]^3 \quad (2)$$

Donde,

$$A: 1,106836861 \cdot 10^{-3}$$

$$B: 2,384641754 \cdot 10^{-4}$$

$$C: 0,6507394466 \cdot 10^{-7}$$

R: Resistencia de referencia del termistor en Ω

Las constantes A, B y C varían según el fabricante y el rango de temperatura de trabajo. Para este caso se usó un termistor NTC 10k Ω MF-52. Cabe destacar que la curva no lineal del termistor hace de este un sensor preciso en el rango de temperaturas de interés, resultando en grandes cambios de resistencia frente a pequeñas variaciones de temperatura.

Los terminales de los termistores fueron extendidos a través de cables de cobre de 1mm para luego conectarse al circuito de la placa Arduino. Estos fueron ubicados en las cápsulas en distintas posiciones, pegados con adhesivo instantáneo y asegurados con cinta de papel.

Se instalaron también termistores en el centro de las paredes de yeso cartón por su lado interior. El cual fue inmerso en la pared de manera que estuviese a ras con ella, evitando variaciones de temperatura debido a la capa límite generada por la convección natural a través de la placa. Estos fueron fijados con adhesivo instantáneo.

Finalmente se instalaron termistores que midieron el aire ambiente. Estos fueron ubicados en el centro cada cubo de ensayo, cubierto de un cilindro de papel aluminio a modo de pantalla de radiación.

En la **Figura 16** se muestra un termistor de pared interior con su cabeza inmersa en la pared y la pantalla de radiación ocupada para los termistores correspondientes al aire ambiente interior.



Figura 16: Termistores correspondientes a la pared interior y el aire ambiente. Fuente: Elaboración propia.

3.4 Fuentes de error.

Para obtener la incertidumbre total de las mediciones, se utilizó la propagación de errores basada en la suma cuadrática de incertidumbres individuales. Se consideran los errores del sensor NTC, la resolución del ADC del Arduino y las pérdidas en conexiones eléctricas. Este método sigue el procedimiento recomendado en [22], donde se indica que la incertidumbre total debe calcularse considerando la raíz cuadrática de la suma de los errores individuales para obtener una estimación más precisa de la incertidumbre global.

Si bien se considera el termistor como un instrumento preciso en comparación a otros sensores de resistencia variable, este presenta incertidumbre en su medición de distintos orígenes.

En primer lugar, según el fabricante cada termistor tiene una precisión de $\pm 0,5$ °C. Además, se considera el autocalentamiento del sensor debido al aumento de la resistencia de este como otra fuente de error.

La resolución de la placa Arduino es de 10 bits. Lo que significa que divide el voltaje de alimentación de 5V en 1024 (2^{10}) “niveles” de voltaje de 4,88 mV. Dependiendo del voltaje medido, una variación de un paso en el ADC representa aproximadamente $\pm 30\Omega$. Luego, calculando la propagación de error según la ecuación de Steinhart-Hart simplificada, se obtiene un error de $\pm 0,2$ °C por concepto de la resolución del Arduino. Los cálculos se detallan a continuación.

Ecuación de Steinhart-Hart simplificada:

$$T = \frac{\beta}{\ln(R/R_0)} \quad (3)$$

Donde,

β : coeficiente térmico del termistor, 3950 K

R : resistencia registrada

R_0 : resistencia de referencia, 10k Ω a 25°C

T : temperatura en Kelvin

Derivando la ecuación con respecto a la resistencia se obtiene:

$$dT = \frac{T^2}{\beta} \times \frac{dR}{R} \quad (4)$$

Reemplazando para una temperatura de 298,15 [K] (25 [°C]) y un error de $\pm 30\Omega$, se obtiene una incertidumbre aproximada de $\pm 0,1973$ [°C].

Por otro lado, si consideramos una variación de voltaje del 0,5% debido a las resistencias internas de todas las conexiones obtenemos una incertidumbre de 0,005[V]. Siguiendo un proceso análogo al anterior, se obtiene una incertidumbre de $\pm 0,0987$ [°C].

Así según las tres fuentes de error vistas, la precisión del termistor, la resolución de la placa y la variación de voltaje, podemos establecer una propagación de error global de $\pm 0,5402$ [°C], como sigue.

$$U = \sqrt{U_{sensibilidad}^2 + U_{resolución}^2 + U_{voltaje}^2} \quad (5)$$

$$U = \sqrt{0,5^2 + 0,1973^2 + 0,0987^2} \quad (6)$$

$$U = \pm 0,546 \text{ [°C]} \quad (7)$$

3.5 Metodología de los ensayos.

Fabricados todos los elementos para el ensayo, se procedió a instalar los cubos en un techo libre de sombras ubicado en Hualpen con coordenadas $36^{\circ}48'22''\text{S}$ $73^{\circ}04'51''\text{W}$. Previo a la recolección de datos, los cubos se dejaron expuestos al ambiente en un tiempo de estabilización de más de 7 días. Este procedimiento tuvo como objetivo asegurar que todas las cápsulas se encontraran en un estado térmico estable, minimizando los efectos que pudiese tener el historial de cada capsula. De esta manera se aseguró que la dinámica térmica observada estuviese determinada únicamente por la interacción entre los cubos y el ambiente y no una condición inicial distinta para cada cubo.

Se procedió entonces a realizar dos ensayos. El primero se realizó con la pared que incluía las cápsulas en posición horizontal con la cara exterior en dirección normal a la superficie terrestre, esto para disminuir el efecto de la fuerza de gravedad en el material al interior de las cápsulas cuando estas tuviesen cambios de fase y al mismo tiempo aprovechar el efecto de la radiación solar.

El segundo ensayo se realizó con la pared que incluía las cápsulas ubicadas en posición vertical y dirección norte. Al orientar las paredes en esta dirección se asegura una exposición prolongada a la radiación solar directa, estrategia que permite evaluar con mayor precisión las diferencias del comportamiento térmico de cada caso. Además, la posición vertical aumenta la incidencia de los cambios de forma dentro de la cápsula mientras ocurre el cambio de fase, lo que permite evaluar las diferencias en el desempeño de cada caso.

Los ensayos se llevaron a cabo desde el 06-02-2025 a las 21:27 hrs hasta el 08-02-2025 a las 20:36 hrs para el primer ensayo y desde el 08-02-2026 a las 21:29 hrs hasta el 11-02-2025 a las 23:00 hrs. Esto es más de un día corrido para cada caso, se hizo así para asegurar que el día a presentar en los resultados fuera representativo.

Los datos de la temperatura del aire ambiente fueron obtenidos desde la Dirección General de Aeronáutica Civil, correspondientes a la estación Carriel Sur, Concepción, con ubicación $36^{\circ}46'50''\text{S}$ $73^{\circ}03'59''\text{W}$.

3.6 Resultados.

Para cada ensayo se obtuvieron los datos en bruto de cada sensor, luego se seleccionaron 24 hrs representativas del comportamiento de cada caso y se obtuvo información relevante para el análisis posterior. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

3.6.1 Ensayo Vertical

En la **Figura 17** se presentan las temperaturas medidas para el aire ambiente dentro de los cubos. Se incluyen de manera escalonada los datos de la temperatura de bulbo seco del aire, medida en la central meteorológica.

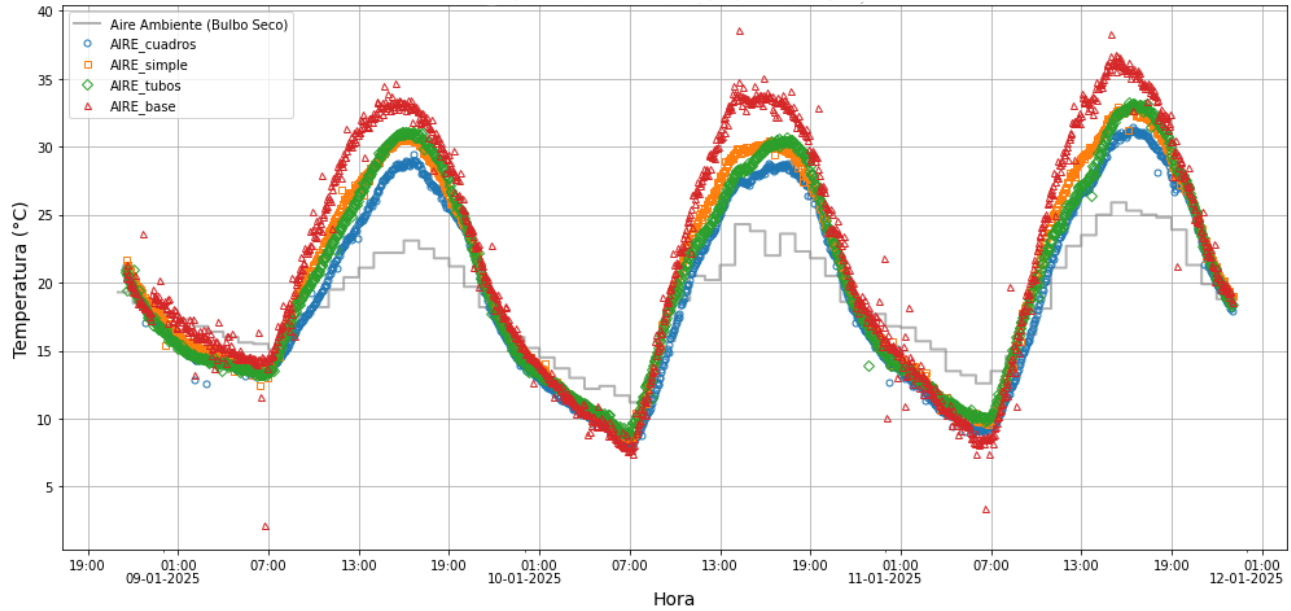


Figura 17: Datos brutos sensores en cápsulas ensayo vertical. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que algunos datos escapan de la tendencia de un mismo conjunto de datos. Esto se debe a factores como cambios rápidos y transitorios en las condiciones ambientales y principalmente por ruido en los canales analógicos de la placa Arduino, por lo que se decide presentar los datos con promedios móviles de ventana deslizante, es decir, cada dato presentado en la curva es un promedio de los datos anteriores y posteriores a la medición, esto permite observar las tendencias a largo plazo, minimizando el ruido de canales y cambios ambientales repentinos. En adelante, todos los gráficos se presentarán de esta manera.

La ecuación del promedio deslizante se presenta en (8) y fue calculada con una total de 10 puntos por ventana.

$$temp_suavizada_i = \frac{t_{i-k} + t_{i-k+1} + \dots + t_i + \dots + t_{i+k}}{n} \quad (8)$$

Donde,

- t_i : temperatura en el punto actual
- n : número total de puntos en la ventana
- k : mitad de la ventana

Así, en la **Figura 18** y **Figura 19** se presentan los gráficos suavizados para el aire ambiente y sensores de las cápsulas de PCM, respectivamente.

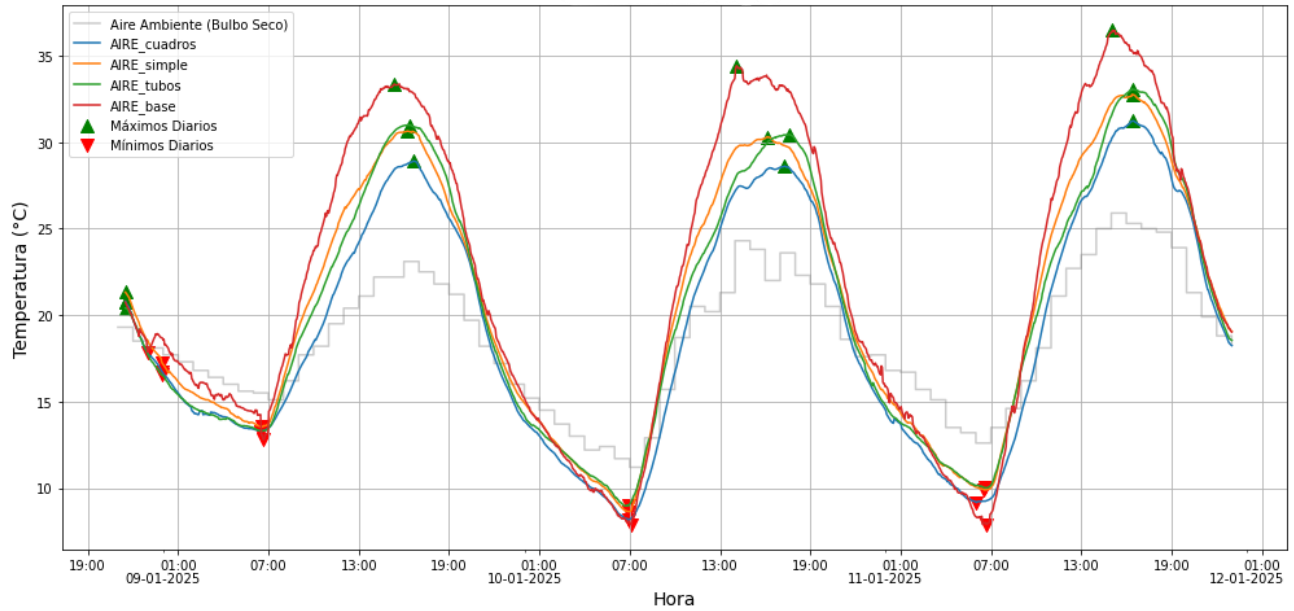


Figura 18: Datos suavizados aire ambiente ensayo vertical. Fuente: Elaboración propia.

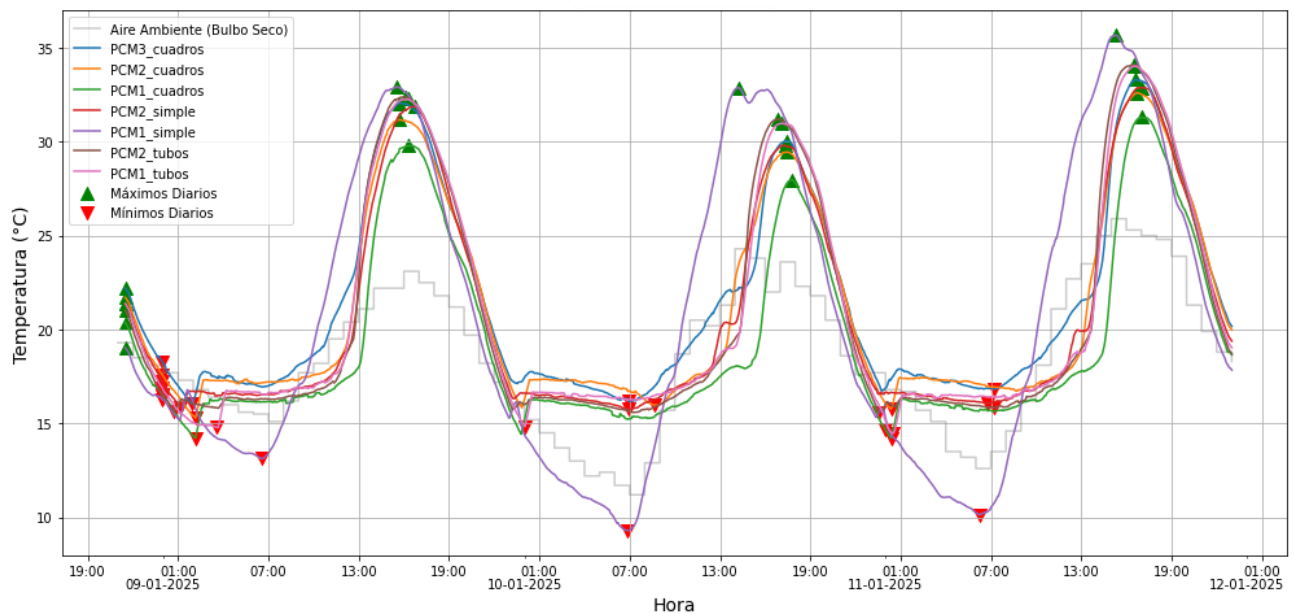


Figura 19: Datos suavizados de sensores en cápsulas ensayo vertical. Fuente: Elaboración propia.

Algunos de los sensores presentados en el gráfico de PCM, corresponden a termistores ubicados donde hay material de cambio de fase y otros ubicados en las uniones de sello por calor como se muestra en la leyenda de cada gráfico. Los sufijos *_junt*, *_sup* e *_inf* corresponden a las ubicaciones de los sensores en juntas de subcápsulas, parte superior y parte inferior, respectivamente, como se presenta en la **Figura 20**. Además, se muestra el sentido en que se instalaron las cápsulas en el ensayo vertical.



Figura 20: Termistores instalados rotulados. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el patrón por conjunto de datos es similar para cada día. A partir de esto se seleccionaron las 24 horas más representativas para observar diferencias. Estas están comprendidas entre el 10-01-2025 a las 23:00 hrs y el 11-05-2025 a las 23:00 hrs. A continuación, se presentan en los resultados desde la **Figura 21** a la **Figura 25**.

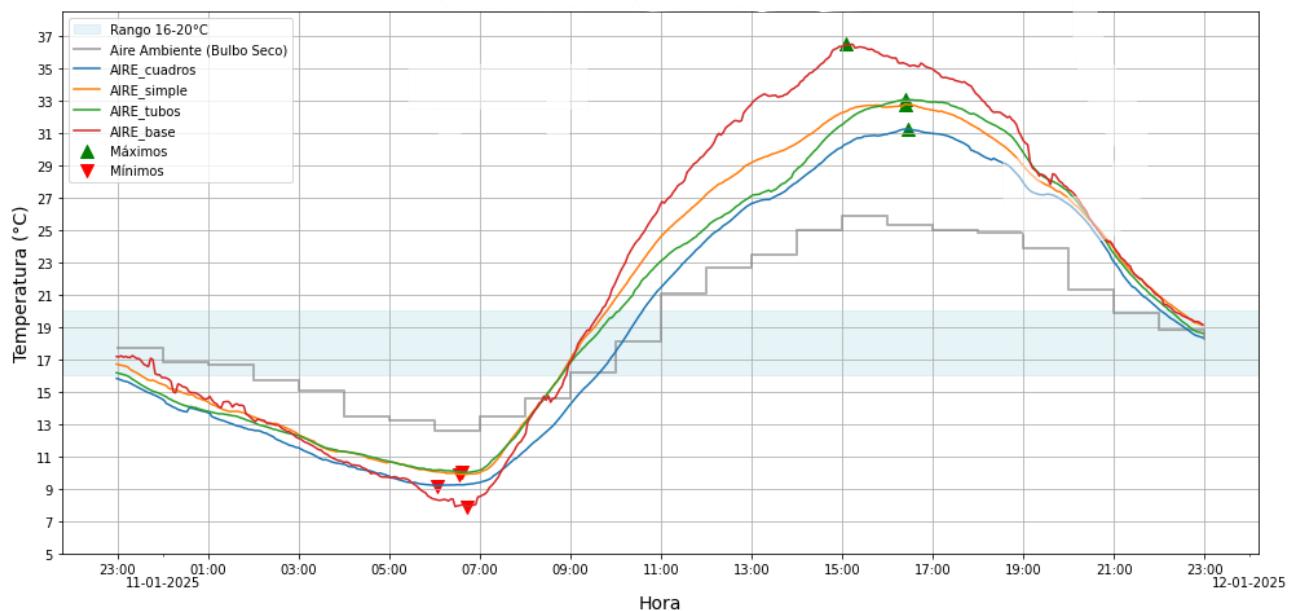


Figura 21: Aire ambiente cubos para el ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del aire ambiente de cada uno de los cubos, presentado en la **Figura 21**, se observa que el caso *simple* y *tubos* alcanzan la temperatura mínima más alta y en el mismo instante aproximadamente. Por su parte, el caso *cuadros* alcanza una temperatura mínima más baja de los cubos con cápsula, sin embargo, la diferencia es en menos de 1 °C y se alcanza 30 minutos antes que en los casos anteriores. Para el caso *base* se observa que alcanza la temperatura mínima más baja de todos los cubos.

Respecto a las temperaturas máximas se observa que los tres casos con cápsulas alcanzan su máximo en el mismo instante de tiempo, difiriendo en 42 minutos con el caso *base*. La menor temperatura máxima es alcanzada por el caso *cuadros*, mientras los otros dos casos con cápsula alcanzan aproximadamente la misma temperatura entre ellos con 0,72 °C de diferencia. La temperatura máxima es alcanzada por el caso *base*.

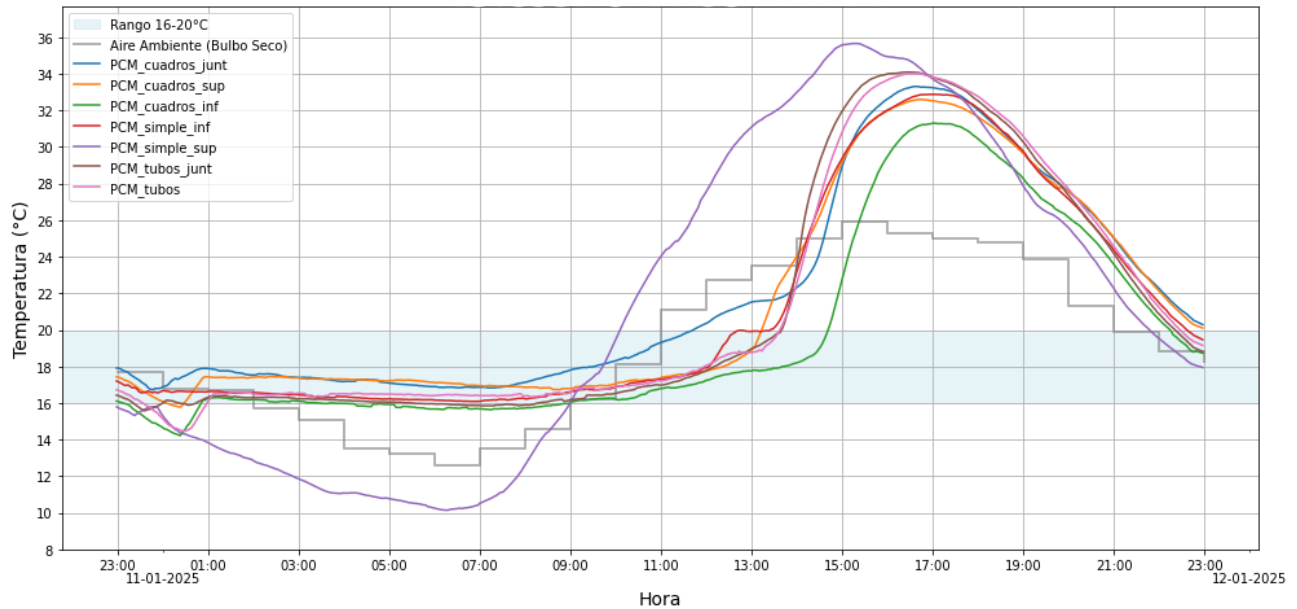


Figura 22: Temperatura sensores cápsulas, ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración propia.

Los gráficos correspondientes a cada cubo de ensayo por separado son presentados en la en la **Figura 23**, **Figura 24** y **Figura 25**. En estos se incluye la temperatura de la pared interior de yeso cartón de cada cubo, observando que el caso *tubos* y el caso *cuadros* logran mantener la temperatura de la pared más cercana a la temperatura ambiente con respecto al caso *simple*.

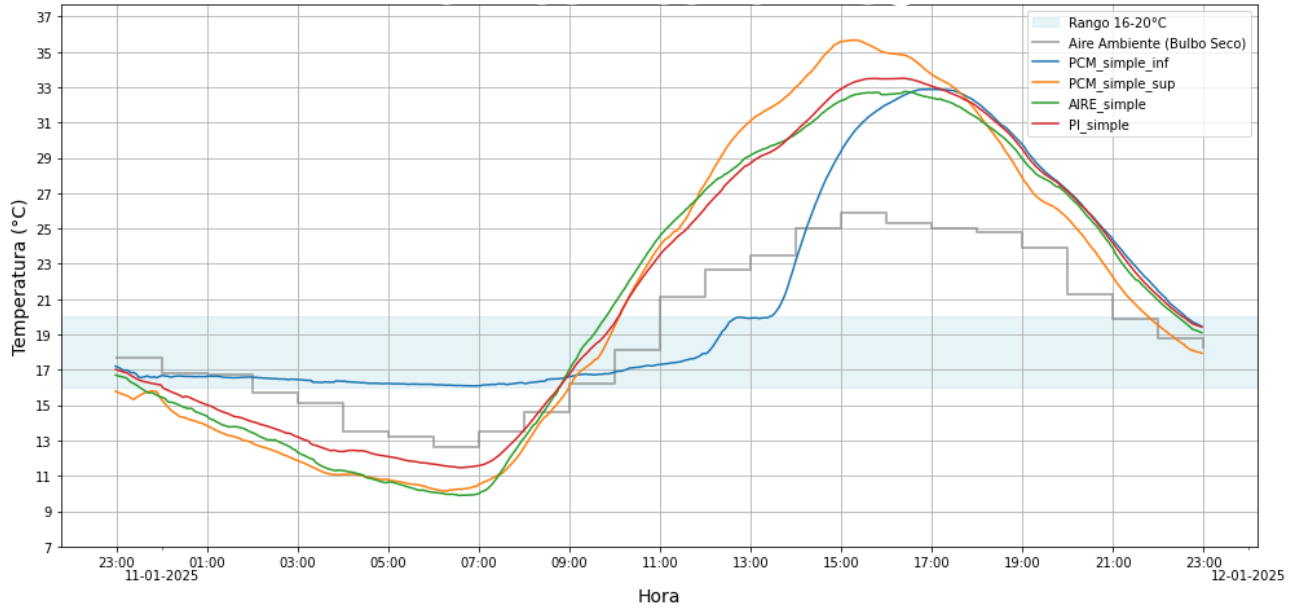


Figura 23: Temperaturas "Cápsula Simple", ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración Propia.

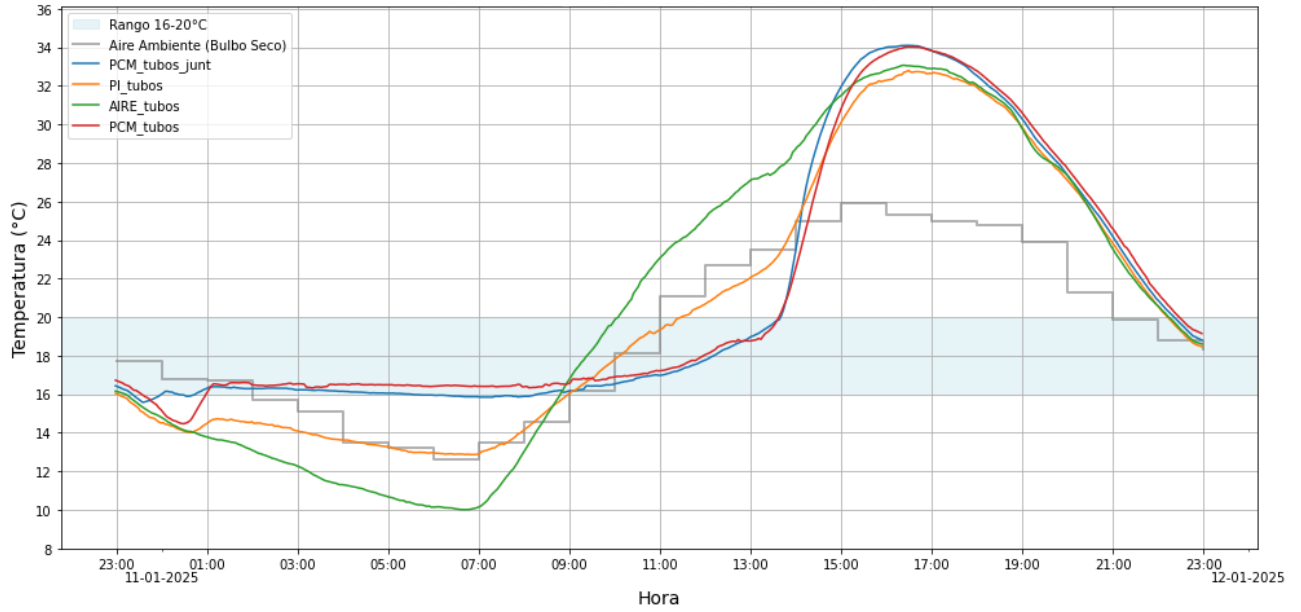


Figura 24: Temperaturas "Cápsula Tubos", ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración Propia.

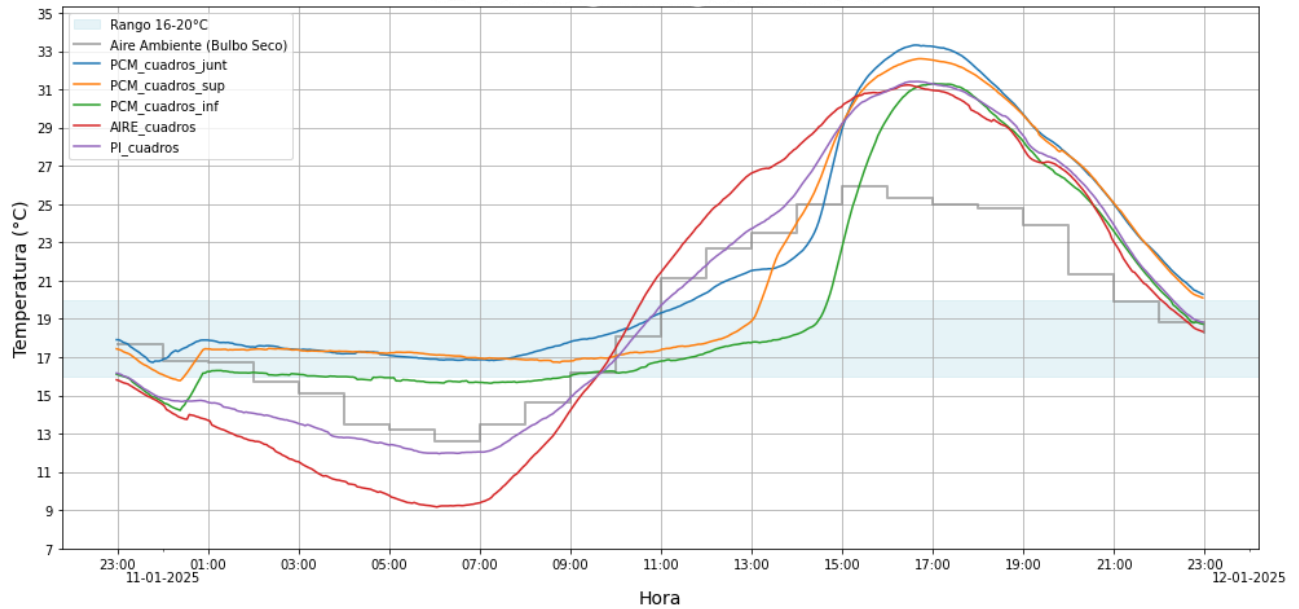


Figura 25: Temperaturas "Cápsula Cuadros", ensayo vertical representativo. Fuente: Elaboración Propia.

3.6.2 Ensayo Horizontal

Para el caso horizontal se presentan en la **Figura 26** y **Figura 27** los datos de toda la medición para los sensores ubicados en las cápsulas de PCM y los sensores del aire ambiente respectivamente. Posteriormente se selecciona las 24 horas comprendidas entre el **07-01-2025 a las 20:00** y el **08-01-2025 a las 20:00** para el posterior análisis comparativo. Se presentan los casos de sensores de cápsulas, aire ambiente y caso por cada cubo desde la **Figura 28** a la **Figura 32**.

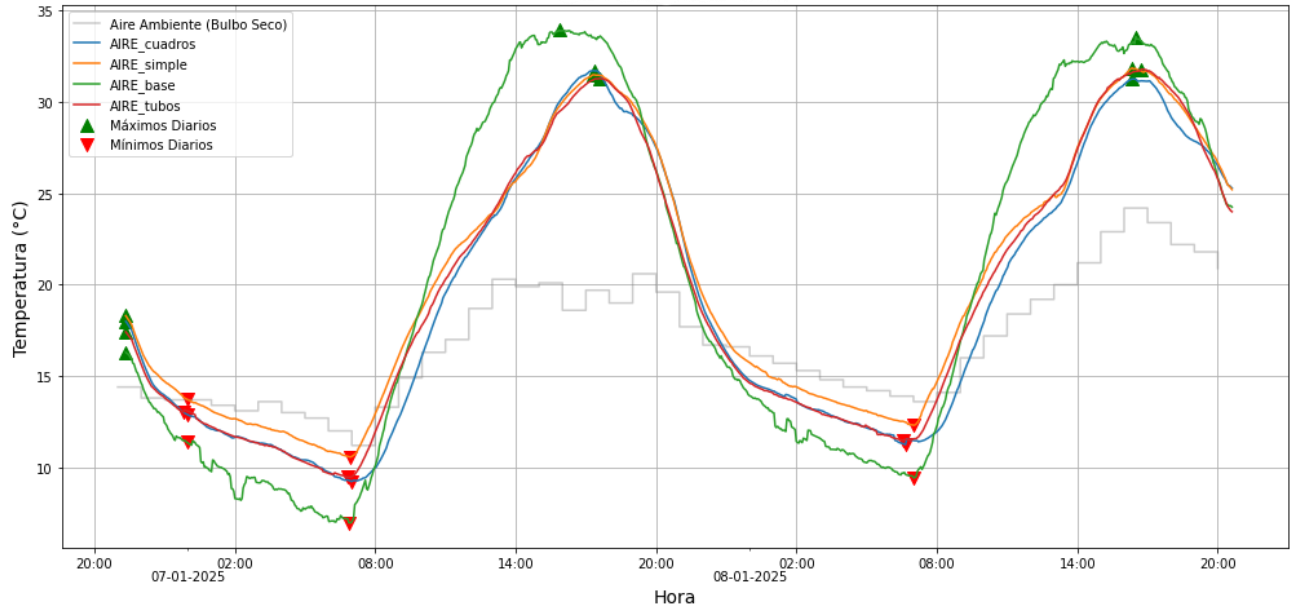


Figura 26: Datos suavizados aire ambiente ensayo horizontal. Fuente: Elaboración propia.

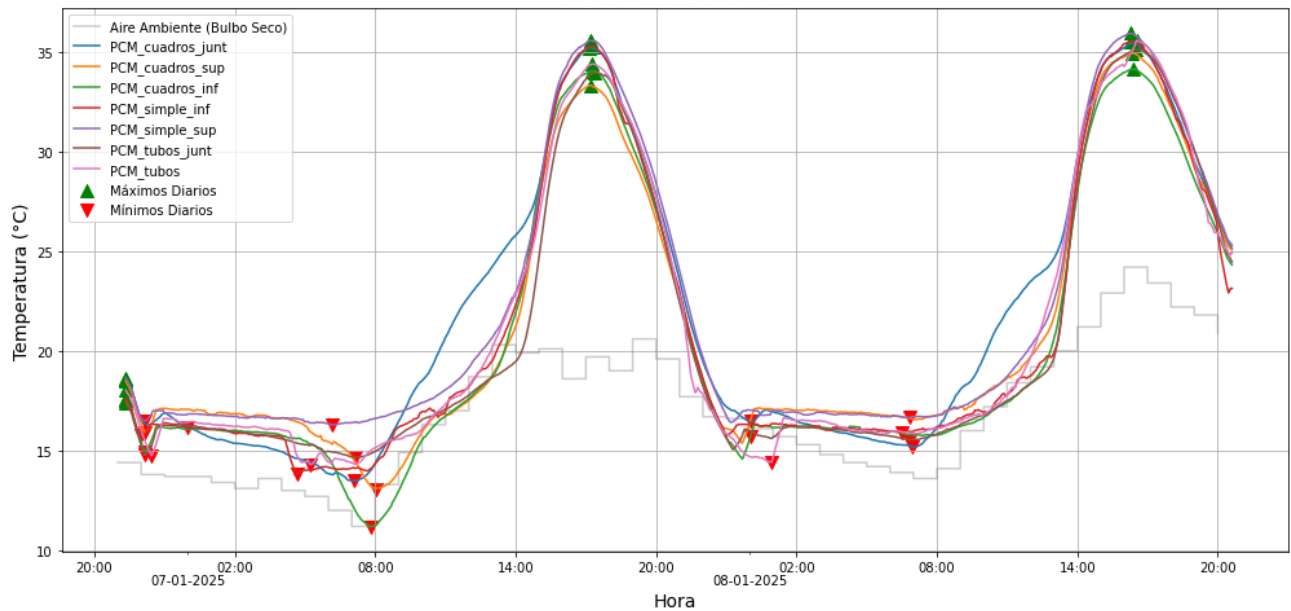


Figura 27: Datos suavizados de sensores en cápsulas ensayo horizontal. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 28** podemos notar que las temperaturas máximas y mínimas de los casos de estudio son aproximadamente iguales. Presentan una diferencia máxima de $1,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las temperaturas más bajas y de $0,61\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las temperaturas más altas. El caso *base* alcanza la mayor y menor de las temperaturas totales.

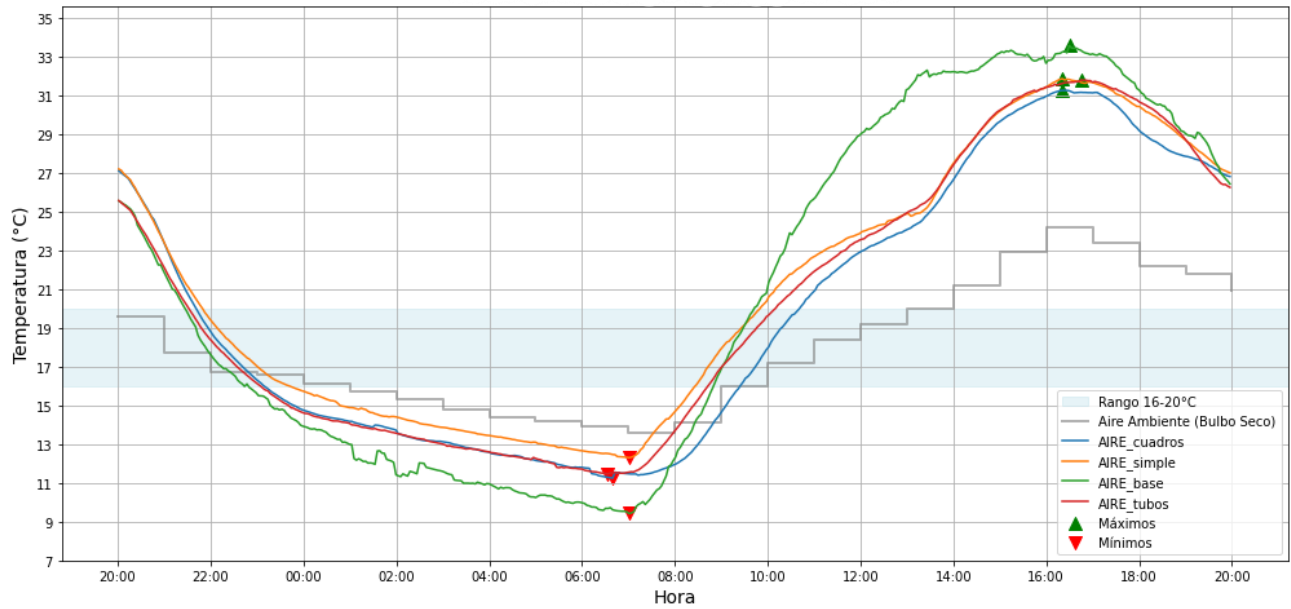


Figura 28: Aire ambiente cubos para el ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 29** se presentan las temperaturas medidas por los sensores ubicados en las cápsulas. Se puede observar que el tiempo de permanencia en la zona de cambio de fase es aproximadamente el mismo para todas las ubicaciones, a excepción de la temperatura correspondiente a la junta de las subcápsulas del caso *cubos* que presenta un desfase mayor.

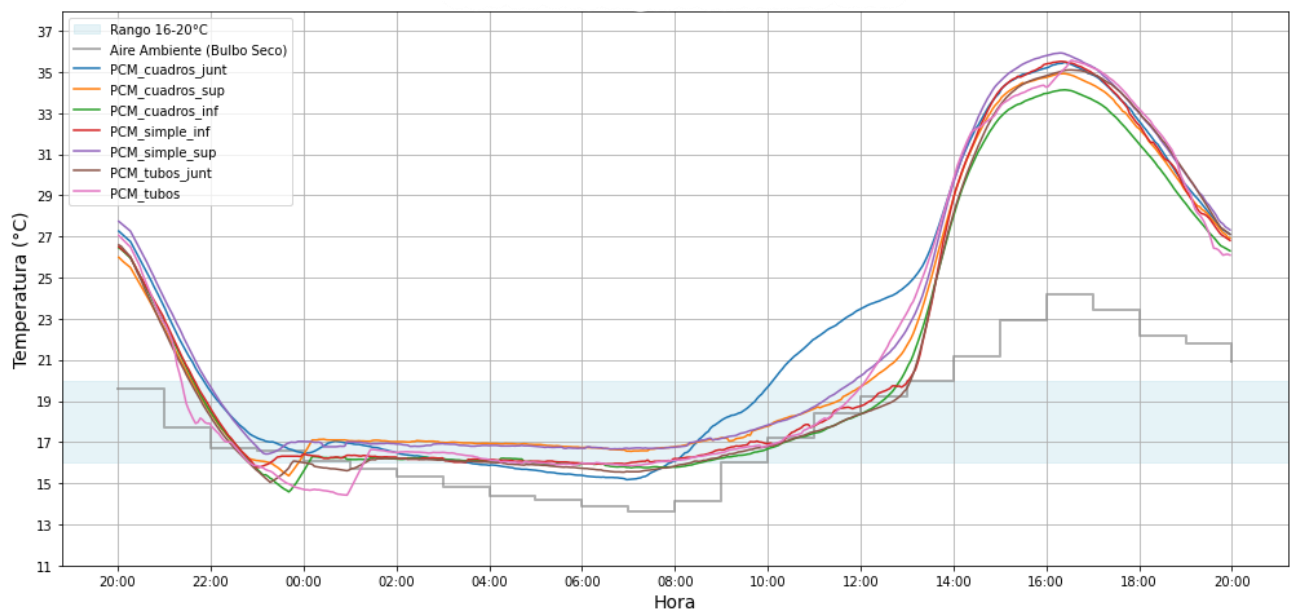


Figura 29: Temperatura sensores cápsulas, ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 30**, **Figura 31** y **Figura 32**, se presentan los sensores ubicados en cada uno de los cubos de ensayo por separado. En estos se incluye la pared interior de yeso cartón. En general, se observa un comportamiento acoplado entre la temperatura de las cápsulas de PCM con la temperatura de la pared interior.

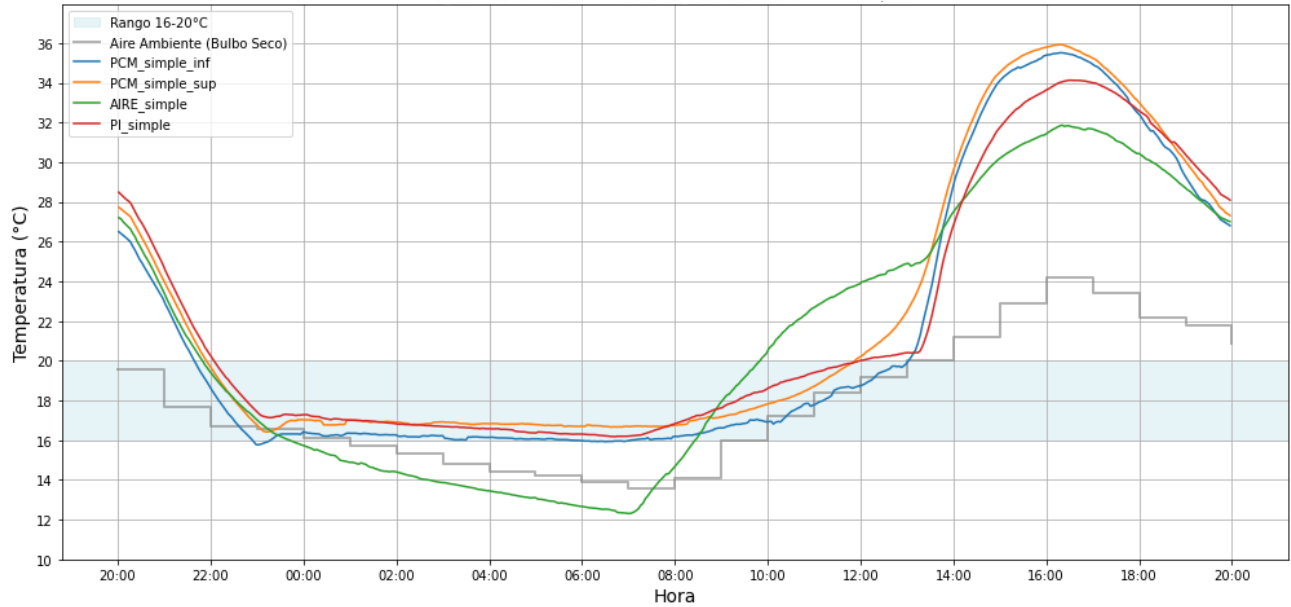


Figura 30: Temperaturas "Cápsula Simple", ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración Propia.

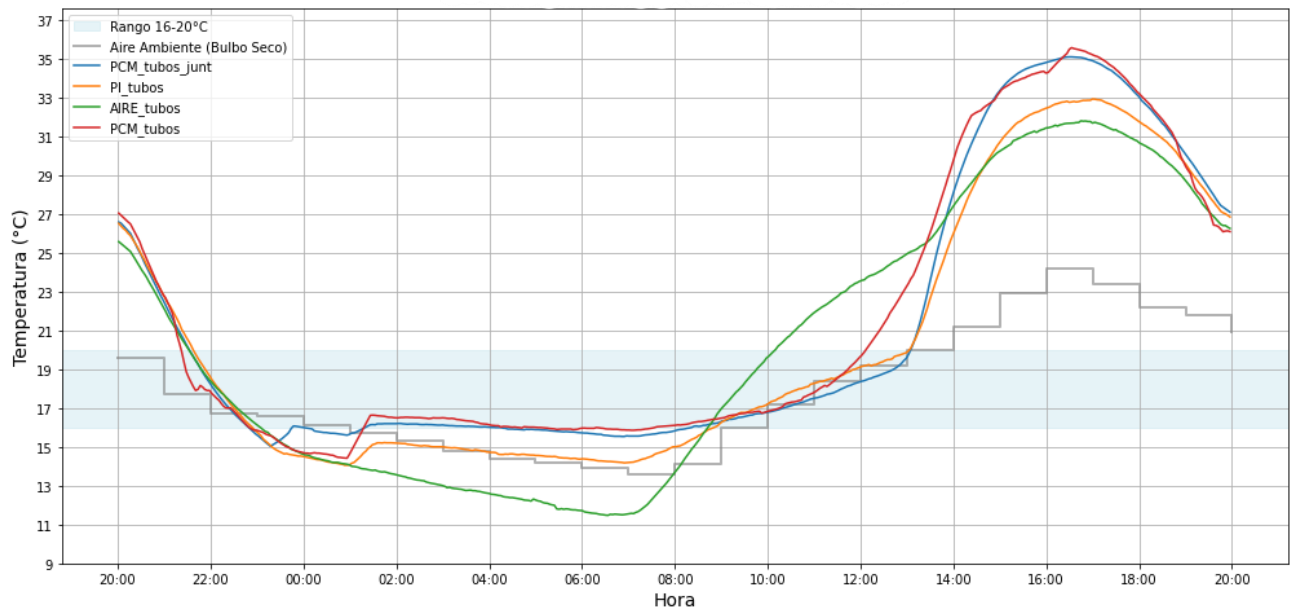


Figura 31: Temperaturas "Cápsula Tubos", ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración Propia.

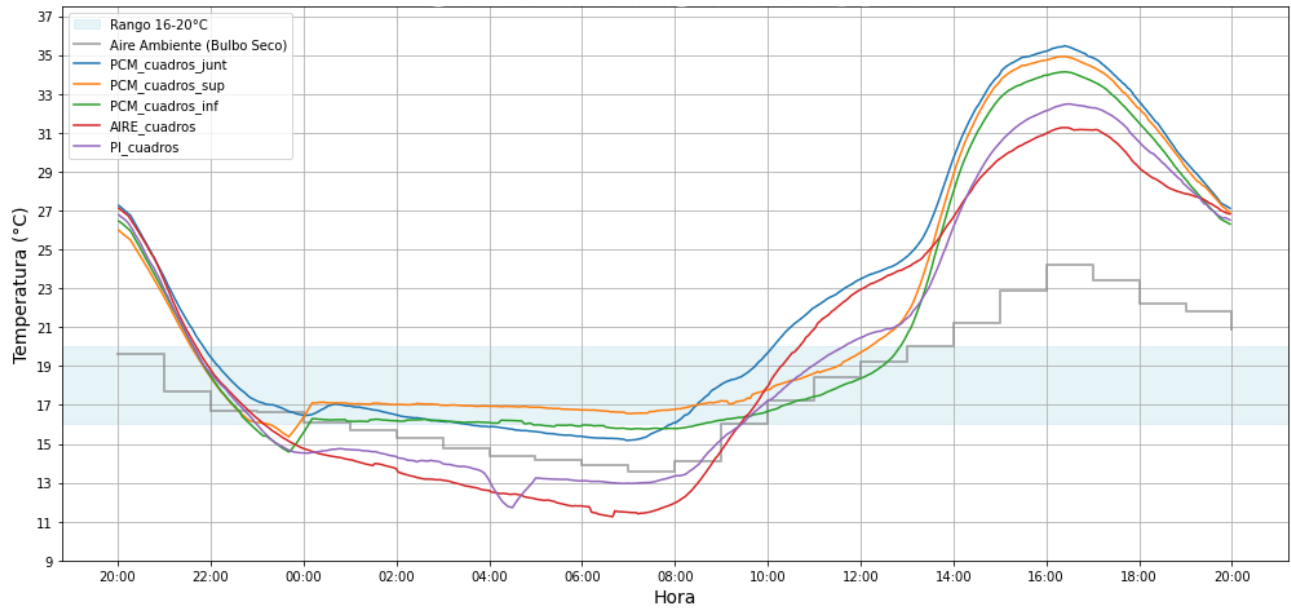


Figura 32: Temperaturas "Cápsula Cuadros", ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 4: Análisis y discusión.

Se evaluó el impacto de la forma y orientación de cápsulas con material de cambio de fase en un ambiente de construcción liviana. A continuación, se presenta un análisis detallado de los resultados experimentales obtenidos.

En la **Tabla 5** se exponen las temperaturas máximas y mínimas del aire ambiente para el caso vertical. Se observa que la diferencia entre los casos con cápsulas de PCM para las temperaturas mínimas respecto al caso *base* es de entre 1,28 y 2,13 °C. Para las temperaturas máximas la diferencia es mayor, de entre 3,40 y 5,24 °C.

Además, se presenta la “Amplitud relativa” con respecto al caso base. Esto es la diferencia en amplitud de temperatura diaria con respecto al caso base.

Tabla 4: Temperatura máximas y mínimas, caso vertical representativo. Fuente: Elaboración propia.

Máximo y mínimos Aire Ambiente				
Caso	Temperatura Máxima[°C]	Temperatura Mínima [°C]	Amplitud de temperaturas [°C]	Amplitud relativa respecto al caso base [%]
Cuadros	31,23	9,17	22,06	-6,52
Simple	32,76	9,89	22,87	-5,71
Tubos	33,07	10,02	23,05	-5,53
Base	36,47	7,89	28,58	referencia

Complementando esta información, en la **Figura 33**, se presentan dos gráficos conjuntos. El superior, la evolución del aire ambiente en cada cubo de ensayo y el inferior, la diferencia relativa respecto al caso base de cada cubo de ensayo. Se interpreta que una similitud de comportamiento respecto al caso base se corresponde a una diferencia relativa cercana a 0°C y, por el contrario, mientras mayor sea la diferencia de comportamiento, mayor diferencia de temperatura. Se calculó para cada instante de tiempo.

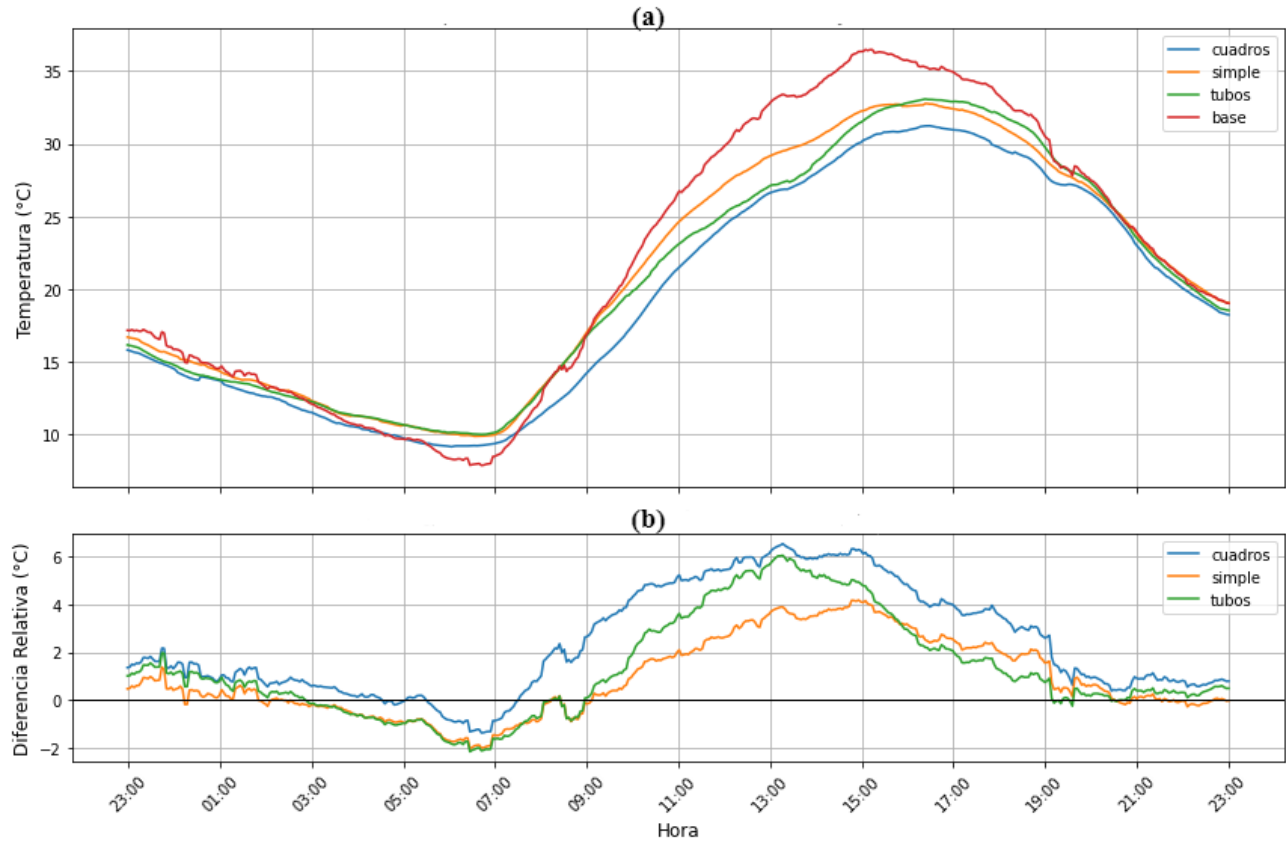


Figura 33: (a) Perfil de temperatura del aire al interior de los cubos, ensayo vertical. (b) Diferencia relativa del aire respecto al caso base, ensayo vertical. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que, en la primera parte del gráfico, en el descenso de la temperatura del caso base, los tres cubos de ensayo mantienen comportamientos aproximadamente acoplados a este caso. En la parte intermedia del gráfico, cuando ocurre el aumento desde la temperatura mínima a la máxima, el caso *cuadros* mantiene la mayor diferencia respecto al caso *base*. Finalmente, en el descenso de la temperatura se vuelve a observar un comportamiento acoplado al caso *base*. Esto coincide con los presentado en la **Tabla 4** en que la amplitud relativa mayor corresponde al caso *cuadros*.

La cápsula *cuadros* presentó la menor amplitud térmica y la mayor reducción de la variación diaria de temperatura en comparación con el caso *base*. Aunque este diseño no es el que tiene los compartimientos más pequeños, su mejor desempeño puede atribuirse a un equilibrio entre el tamaño de sus compartimientos y la reducción de puentes térmicos. La menor cantidad de juntas en comparación con el caso *tubos* minimiza las pérdidas de calor a través del material encapsulante (plástico), favoreciendo una mayor transferencia de calor directa al PCM y mejorando su capacidad de almacenamiento térmico.

En términos generales, se observó que la reducción de la amplitud térmica en los cubos con PCM es más significativa en las temperaturas máximas del día que en las mínimas de la noche. Esto puede explicarse porque la diferencia de temperatura entre el aire exterior y la temperatura de cambio de fase del PCM es mayor cuando la temperatura ambiente es más alta, lo que incrementa el flujo de

calor hacia el material. Además, pueden existir otras formas de transferencias de calor dominantes según cada hora el día, como convección forzada, radiación solar o intercambio radiativo con la superficie de cielo, sin embargo, estos intercambios no fueron medidos.

Por otro lado, para el caso horizontal, se presenta en la **Tabla 5** el resumen de temperaturas máximas y mínimas registradas. Además, se presenta el porcentaje de la “Amplitud relativa” con respecto al caso base.

Tabla 5: Temperatura máximas y mínimas, ensayo horizontal representativo. Fuente: Elaboración propia.

Máximo y mínimos Aire Ambiente				
Caso	Temperatura Máxima[°C]	Temperatura Mínima [°C]	Amplitud de temperaturas [°C]	Amplitud relativa respecto al caso base [°C]
Cuadros	31,26	11,25	20,01	-4,15
Simple	31,87	12,31	19,56	-4,60
Tubos	31,8	11,48	20,32	-3,84
Base	33,58	9,42	24,16	referencia

Al igual que en el análisis del caso vertical, en la **Figura 33**, se presentan dos gráficos. El superior la evolución del aire ambiente en cada cubo de ensayo y el inferior la diferencia relativa respecto al caso base de cada cubo de ensayo.

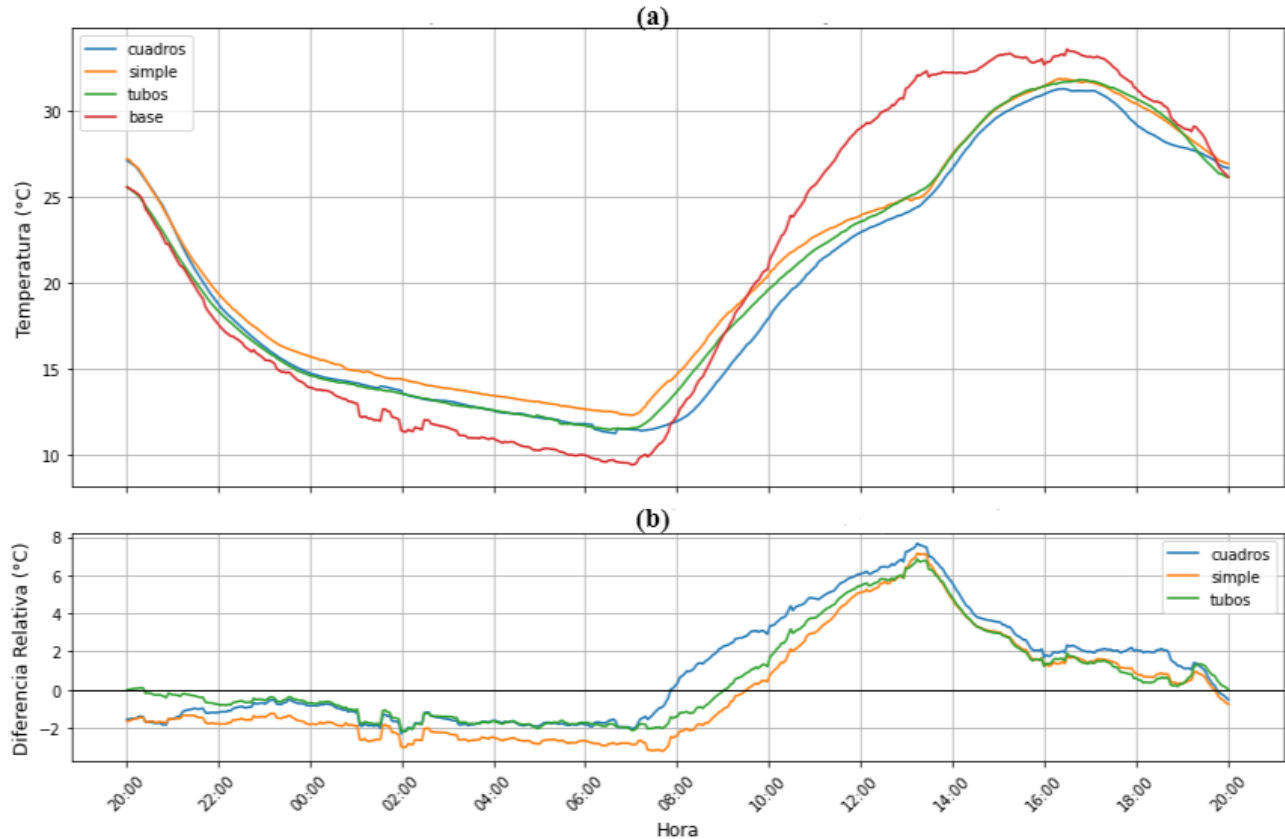


Figura 34: (a) Perfil de temperatura del aire al interior de los cubos, ensayo horizontal. (b) Diferencia relativa del aire respecto al caso base, ensayo horizontal. Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el caso *simple* mantiene la mayor diferencia relativa en el descenso de la temperatura, sin embargo, los tres casos muestran un comportamiento acoplado a la temperatura del caso base para este rango. Al aumento de la temperatura el caso *cuadros* presenta la mayor diferencia relativa, retrasando el aumento de temperatura del cubo de ensayo.

Además, para las mediciones del aire ambiente del caso horizontal, la diferencia de temperaturas máximas y mínimas entre casos es menor en comparación con el caso vertical. Dicho de otro modo, no hay un caso que destaque particularmente por su rendimiento. Esto se explica porque la forma de los compartimientos no tiene mayor efecto debido que la gravedad tiene una incidencia menor en el movimiento del PCM a través de la cápsula. Para este caso el mejor rendimiento lo tuvo el caso *simple* y se debe también a la ausencia de puentes térmicos en la cápsula provocado por las juntas.

Para analizar las cápsulas propiamente tal, se presentan datos relevantes correspondientes al fenómeno de cambio de fase del caso vertical se presentan en la **Figura 35** que muestra las temperaturas de los distintos sensores de las cápsulas dentro del rango de temperatura de cambio de fase. Se incluye una línea de referencia que indica la hora aproximada en que se perciba la menor temperatura ambiente medida por la estación meteorológica, para un posterior análisis. Además, en la **Tabla 6**, se presenta un resumen de lo anterior.

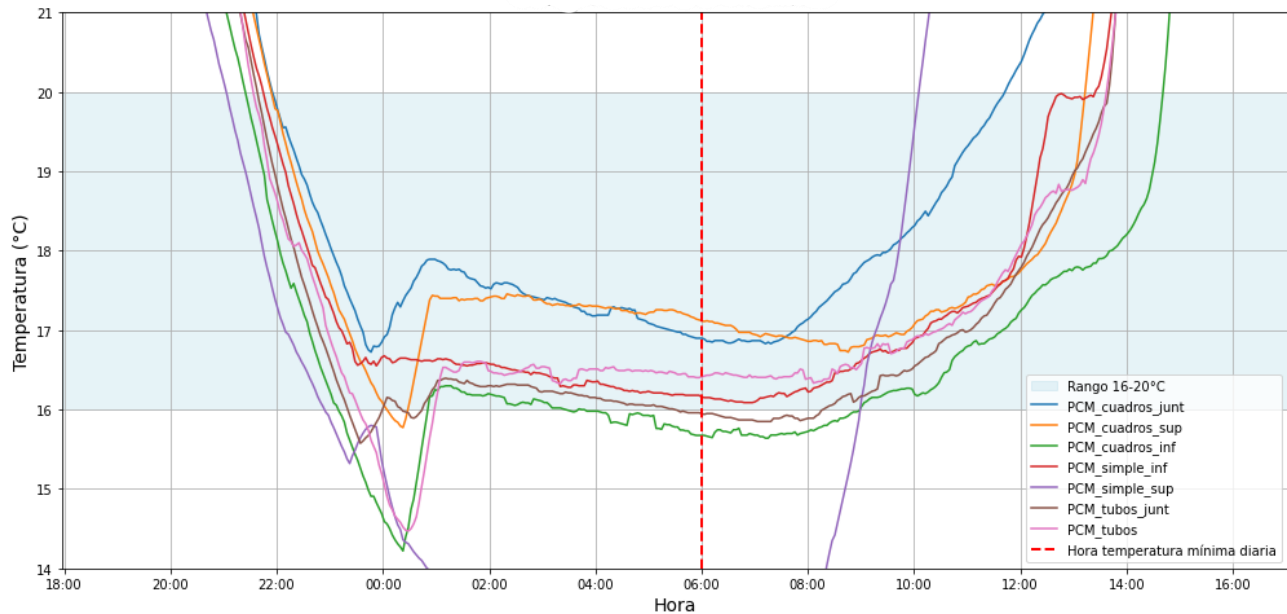


Figura 35: Temperatura cápsulas PCM en rango de cambio de fase, Ensayo Vertical. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6: Datos de cambio de fase para el caso vertical. Fuente: Elaboración propia.

Cambio de fase Ensayo Vertical			
Sensor	Temperatura Mínima Subenfriamiento	Sub Enfriamiento	Permanencia <20°C
PCM_cuadros_junt	15,87	23:52	13h 45m
PCM_cuadros_sup	15,68	0:25	15h 21m
PCM_cuadros_inf	13,99	0:25	17h 16m
PCM_simple_inf*	15,58	23:46	15h 33m
PCM_simple_sup**	14,99	23:31	12h 57m
PCM_tubos_j	15,18	23:46	15h 57m
PCM_tubos	13,99	0:16	16h 4m

*El fenómeno no es claro.
** Existe cambio en pendiente de temperatura, no se observa el fenómeno.

Del mismo modo, en la **Figura 36** y en la **Tabla 7**, se presentan los mismos datos para el caso horizontal.

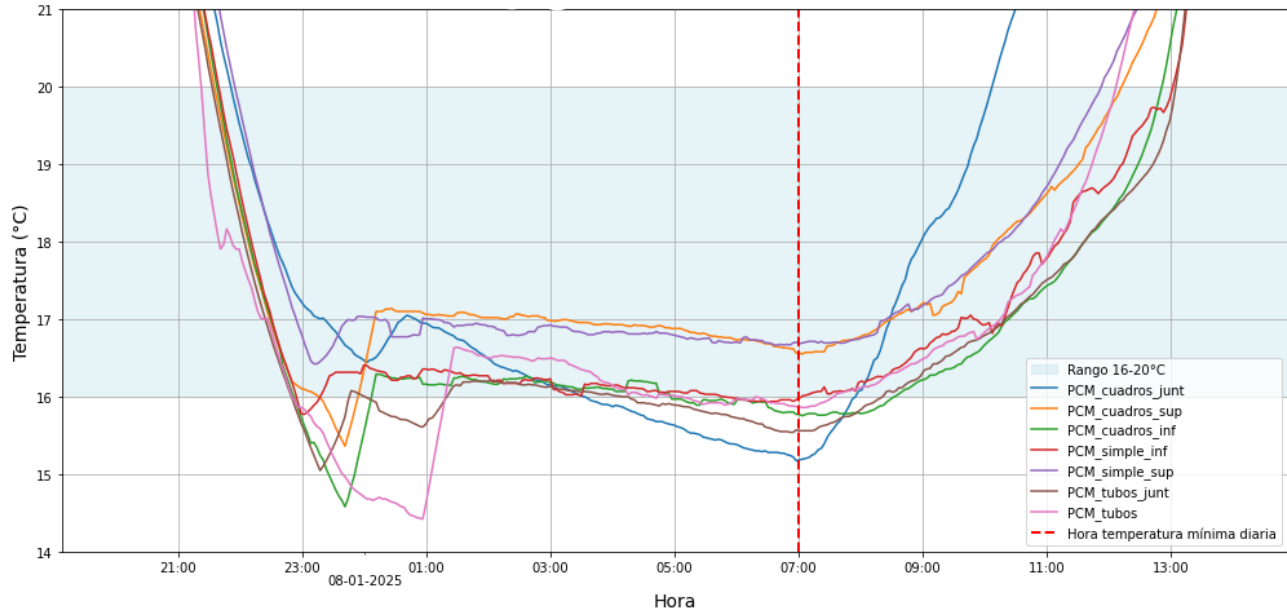


Figura 36: Temperatura cápsulas PCM en rango de cambio de fase, Ensayo Horizontal. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7: Datos de cambio de fase para el caso horizontal. Fuente: Elaboración propia.

Cambio de fase Ensayo Horizontal			
Sensor	Temperatura Mínima Subenfriamiento	Sub Enfriamiento	Permanencia <20°C
PCM_cuadros_junt	14,89	0:14	12h 15m
PCM_cuadros_sup	15,09	23:47	14h 33m
PCM_cuadros_inf	14,19	23:47	15h 12m
PCM_simple_inf	14,79	22:58	15h 12m
PCM_simple_sup	15,18	23:19	13h 54m
PCM_tubos_junt	14,59	23:29	15h30m
PCM_tubos	14,39	0:53	14h 39m

Como se revisó, el fenómeno de subenfriamiento merma la capacidad de almacenamiento de calor del material de cambio de fase, sin embargo, a pesar de la ocurrencia de este fenómeno, no fue determinante en el desempeño final. La cápsula *cuadros* en el ensayo vertical fue la que obtuvo el mejor comportamiento y al mismo el subenfriamiento más bajo observado. Esto se explica porque este fenómeno en que el material alcanza temperaturas más bajas que la de cambio de fase permaneciendo en fase líquida, no es tan determinante en la convección natural al interior de la cápsula. El fenómeno cobra más relevancia cuando se alza la temperatura y alcanza valores sobre la temperatura de cambio de fase, manteniendo un estado sólido. En ese caso, la convección natural y

por consiguiente la capacidad de absorción de energía sufre mayores cambios como se presenta en [15].

Se observa que el sensor PCM superior de la cápsula simple no leyó un comportamiento de material de cambio de fase en los registros de temperaturas para el caso vertical. Esto se puede explicar dado que la solidificación del material se concentra en el fondo de la cápsula por efectos de la gravedad, lo que provoca un menor espesor de cápsula en el punto superior, lo que disminuye la cantidad de material en esa zona y por lo tanto su capacidad de mantener la temperatura estable en esa parte de la cápsula.

Para el caso horizontal no se observa el fenómeno anterior. En este caso todas las cápsulas presentan un subenfriamiento claro lo que refuerza la idea de que el material está distribuido en un espesor uniforme en la extensión de la cápsula.

CAPÍTULO 5: Conclusiones y trabajos futuros.

Tras el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos que evaluaron el impacto de la forma y orientación de cápsulas de PCM en un entorno térmico de materiales livianos, se pueden establecer las siguientes conclusiones.

La geometría de las cápsulas influye directamente en la homogeneidad de la temperatura del PCM durante la transición de fase. Las cápsulas con compartimientos internos restringieron el desplazamiento vertical del PCM en estado líquido, reduciendo el cambio de forma entre la parte superior e inferior de cada compartimiento y permitiendo una convección natural con un gradiente térmico menor. Esto es consistente con estudios de transferencia de calor, donde se ha demostrado que la geometría de confinamiento influye en la eficiencia térmica de los sistemas compuestos [22].

Al comparar los resultados de los ensayos en orientación vertical y horizontal, se observa que las cápsulas compartimentadas mejoran la regulación térmica respecto al caso base cuando se ubican en posición vertical. Esto refuerza la idea de que la compartimentación mejora el desempeño del material en ciertas distribuciones. Sin embargo, entre las cápsulas compartimentadas existe una diferencia notable de 1,84 °C en los máximos de temperatura, lo que sugiere que la superficie de juntas es un factor determinante. Aunque la cápsula tubos tiene los compartimientos más pequeños, también presenta la mayor superficie de juntas, donde un delgado espesor de plástico se opone al paso de calor y genera un puente térmico. En contraste, la cápsula cuadros, con compartimientos más grandes, logra un equilibrio térmico más eficiente, ya que estos son lo suficientemente pequeños para mejorar la transferencia de calor sin generar excesivas juntas que promuevan la conducción térmica.

En el ensayo horizontal, los comportamientos de las distintas configuraciones fueron aproximadamente similares, con un leve mejor desempeño de la cápsula simple. Esto se explica porque, en esta orientación, el PCM puede distribuirse uniformemente en un espesor constante, dado que la gravedad no altera su distribución interna. Además, la ausencia de juntas intermedias en la cápsula simple elimina posibles puentes térmicos, favoreciendo una mejor transferencia de calor.

Estos resultados indican que la efectividad de la compartimentación del PCM depende tanto de la orientación de la cápsula como de su geometría interna. En la posición vertical, la compartimentación juega un papel clave en la estabilidad térmica, ya que reduce el desplazamiento del PCM líquido, evitando gradientes térmicos internos significativos. Esto concuerda con estudios sobre convección natural, donde se ha demostrado que la orientación influye en la flotabilidad del fluido y, por lo tanto, en la eficiencia de la transferencia de calor [22].

Todo lo anterior permite concluir que la hipótesis se confirma parcialmente. Si bien la regulación térmica mejoró con el uso de compartimientos en las cápsulas, la reducción del tamaño de estos no mostró una relación lineal con la estabilidad térmica. En la orientación vertical, se observaron mejoras significativas debido a la limitación del desplazamiento del PCM líquido; sin embargo, en el caso horizontal, estas diferencias fueron menos marcadas. Esto sugiere que el análisis del impacto del tamaño de los compartimientos en la regulación térmica debe complementarse con otras variables,

como la superficie de juntas y la forma de la cápsula, ya que estas influyen en la resistencia térmica y la eficiencia del almacenamiento de calor. Además, es necesario ensayar las cápsulas en modelos a escala que representen las condiciones reales de una aplicación. Si bien este estudio es un punto de partida en la geometría tentativa de una cápsula, es necesario evaluarla en condiciones validables a través de simulaciones.

Este trabajo, además de ser un estudio técnico, representa un paso en el camino hacia la creación de un producto que mejore la eficiencia térmica de recintos mediante el uso de materiales de cambio de fase (PCM). Si bien la efectividad térmica del encapsulado es el aspecto central de la investigación, su viabilidad económica es igualmente determinante para su implementación en el mercado.

El presente estudio optó por un encapsulado simple y de bajo costo, considerando que muchas investigaciones previas han propuesto soluciones basadas en cápsulas metálicas (como aluminio o latón) o geometrías complejas para optimizar el rendimiento térmico del PCM. Sin embargo, al comparar costos, se evidencia que el PVC rígido es entre 7 y 20 veces más barato por unidad de volumen que el aluminio, además de requerir procesos de fabricación más simples y económicos. Aunque el aluminio proporciona mayor resistencia mecánica y conductividad térmica, su uso representa un desafío en términos de costos y fabricación para aplicaciones en construcción liviana.

Dado lo anterior, futuras investigaciones podrían enfocarse en tres líneas principales de desarrollo:

Optimización del encapsulado. Incluir la variable de superficie de juntas, considerando su efecto en la resistencia térmica y en la distribución del PCM durante la transición de fase.

Evaluación en aplicaciones reales. Determinar los requisitos específicos del encapsulado en construcción liviana, como resistencia estructural, integración con materiales de obra y respuesta térmica en condiciones reales. Posteriormente evaluar los prototipos en una escala real validable numéricamente.

Análisis de viabilidad comercial. Explorar estrategias para que el encapsulado sea económicamente competitivo, considerando factores como escalabilidad en producción y costos de implementación.

Estos avances permitirían no solo mejorar la eficiencia térmica del encapsulado, sino también acercarlo a una aplicación real, contribuyendo al desarrollo de soluciones energéticamente eficientes en la edificación y al desafío global de la descarbonización a través de la eficiencia energética.

Referencias

- [1] N. U. (ONU), «Acuerdo de París de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático,» 2015.
- [2] E. S. B. T. IEA, «www.iea.org,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/energy-system/buildings#tracking>.
- [3] I. P. o. C. Change, «Climate Change 2022, Mitigation of Climate Change,» 2022.
- [4] IEA, «Space Cooling,» 2023.
- [5] IEA, «Buildings Envelopes,» 2023.
- [6] M. S. Qudama Al-Yasiri, «Influential aspect on melting and solidification of PCM energy store containers in building envelope applications,» *International Journal of Green Energy*, 2021.
- [7] Y. E. F. T. K. A. J. Y. Z. Y. M. A. Allouhi, «Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 109, pp. 118-130, 2015.
- [8] M. S. A. d. G. L. F. C. Mohit Prabhakar, «Improving the energy efficiency of passive PCM system using controlled natural ventilation,» *Energy and Buildings*, vol. 228, 2020.
- [9] N. D. Khawla Saafi, «Energy and cost efficiency of phase change materials integrated in building envelopes under Tunisia Mediterranean climate,» *Energy*, vol. 187, 2019.
- [10] A. d. Gracia, «Dynamic building envelope with PCM for cooling purposes – Proof of concept,» *Applied Energy*, vol. 235, 2019.
- [11] M. V. B. C. B. J. V. R. J. Ravi Anant Kishore, «Optimizing PCM-integrated walls for potential energy savings in U.S. Buildings,» *Energy and Buildings*, vol. 226, 2020.
- [12] A. d. G. C. F. L. F. C. Mohammad Saffari, «Simulation-based optimization of PCM melting temperature to improve the energy performance in buildings,» *Applied Energy*, vol. 202, 2017.
- [13] R. T. H. S. Zhongbao LIU, «APPLICATION OF PHASE CHANGE ENERGY STORAGE IN BUILDINGS Classification of PCM and Packaging Methods,» *Thermal Science*, vol. 26, pp. 4315-4332, 2022.
- [14] S. B. K. S. Milan Ostrý, «Test on material compatibility of Phase Change Materials and Selected Plastics,» *Molecules*, 2019.

- [15] D. G. A. D. Mohammad Azad, «Natural convection onset during melting of phase change materials: Part,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 170, 2021.
- [16] A. S. R. G. K. M. V. V. A. S. Alberto Pizzolato, «Maximization of performance in multi-tube latent heat storage - Optimization of fins topology, effect of materials selection and flow arrangements,» *Energy*, vol. 203, 2019.
- [17] V. J. M. K. R. Jay R. Patel, «Thermal performance investigations of the melting and solidification in differently shaped macro-capsules saturated with phase change material,» *Journal of Energy Storage* , vol. 31, 2020.
- [18] G. d. C. Ministerio de Vivienda y Urbanism, «Listado Oficial de Soluciones Constructivas para el Acondicionamiento Térmico,» 2024.
- [19] D. Saravia, «Análisis de uso de materiales con cambio de fase en la envolvente térmica de una vivienda,» 2020.
- [20] IMECO, «IMECO,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.imeco.cl/product/selladoras-de-bolsas>.
- [21] TECNOE. [En línea]. Available: https://www.tecnoe.cl/MLC-938117026-pack-10-sensores-de-temperatura-termistor-ntc-10k-mf52-_JM.
- [22] I. &. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 2007.
- [23] D. A. F. B. S. &. M. M. A. Cabaleiro, «Development of paraffinic phase change material nanoemulsions for thermal energy storage and transport in low-temperature applications,» *Applied Thermal Engineering*, 2019.