

Evaluación experimental del proceso de fusión y cristalización de estearina de palma  
hidrogenada para su uso como PCM en sistemas carcasa-serpentin

Valentina Aguilera Duarte y Anamaria Blanco Beltrán

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Química

Director

Dr. Sc. Viatcheslav V. Kafarov

Codirector

M.Sc. Víctor Alexis Lizcano González

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

*Quiero dedicar este trabajo a Dios por brindarme fuerza a lo largo de mi carrera y por poner en mi vida a Ana, la persona correcta para emprender este proyecto.*

*A toda mi familia, por su apoyo y amor. De manera especial, a mi madre, a mi hermano David y a mi abuela Carmen.*

*A mis amigos de colegio y universidad, quienes han sido fundamentales en mi desarrollo como persona y profesional.*

***Valentina Aguilera Duarte.***

### **Dedicatoria**

*Dedico este trabajo a Dios por caminar junto a mí en esta carrera. Su amor y dirección han sido mi pilar.*

*A mis padres, quienes han sido un constante apoyo y fuente de motivación en mi vida. Cuando sentía que caía, ellos estaban ahí para sostener mis manos y recordarme que podía lograrlo. Su amor incondicional ha sido mi refugio. Este logro es también suyo.*

*A mi hermano, por ser mi compañero de vida. Juntos hemos compartido momentos, desafíos y alegrías.*

*A Vale, por ser la mejor compañera de tesis que podría haber deseado.*

*A todos aquellos amigos y familiares que formaron parte de mi proceso, me acompañaron y me animaron en los momentos difíciles. Sus palabras de aliento y amistad fueron un apoyo invaluable.*

***Anamaria Blanco B.***

### **Agradecimientos**

*Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a Dios por guiarnos en cada paso de nuestra carrera y por unir nuestros caminos para emprender este proyecto.*

*Agradecemos a nuestros familiares y amigos por motivarnos a seguir adelante y brindarnos fuerza en los momentos difíciles. Nuestro agradecimiento más profundo va dirigido al Dr. Sc. Viatcheslav V. Kafarov y al Ing. M. Sc. Víctor Alexis Lizcano Gonzáles quienes confiaron en nosotras, nos proporcionaron valiosos conocimientos, orientación y apoyo fundamental a lo largo del desarrollo de este proyecto.*

*Extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por abrirnos sus puertas y proporcionarnos las herramientas necesarias para nuestra formación como profesionales. También agradecemos a la Escuela de Ingeniería Química y cada uno de sus integrantes por impartirnos conocimientos y ofrecernos valiosas experiencias, así como al laboratorio por permitirnos llevar a cabo todo el proceso de investigación.*

*Finalmente, deseamos manifestar nuestro agradecimiento a todas aquellas personas que participaron en este proceso y que fueron parte fundamental en su ejecución.*

**Valentina Aguilera D. y Anamaria Blanco B.**

**Tabla de contenido**

Introducción .....	11
1 Objetivos .....	14
1.1 Objetivo general .....	14
1.2 Objetivos específicos.....	14
2 Marco teórico y Estado del arte.....	15
3 Descripción metodológica.....	20
3.1 Equipo y recursos utilizados .....	20
3.2 Metodología experimental.....	22
3.2.1 Análisis de la influencia de la geometría del serpentín en la transferencia de calor durante el proceso de fusión y cristalización de la estearina de palma hidrogenada. ....	22
3.2.2 Estudio de la transferencia de calor durante el proceso de fusión y cristalización de la estearina de palma hidrogenada empleando serpentín en cobre y en acero inoxidable.....	24
3.2.3 Comparar el desempeño como PCM de la estearina de palma hidrogenada respecto a la cera de parafina durante el proceso de fusión y cristalización.....	24
4 Resultados .....	25
4.1 Proceso de fusión de la estearina de palma empleando serpentines de cobre.....	25
4.1.1 Geometría serpentín tipo cuadrada.....	26

4.1.2	Geometría serpentín tipo U. ....	29
4.1.3	Influencia de la geometría sobre el coeficiente transferencia de calor por convección (h).....	31
4.1.4	Comparación de los resultados de las pruebas experimentales para las tuberías en acero inoxidable y cobre.....	32
4.2	Proceso de cristalización de la estearina de palma hidrogenada en geometrías de material cobre.....	33
4.2.1	Geometría serpentín tipo cuadrada.....	34
4.2.2	Geometría de serpentín tipo U. ....	36
4.2.3	Influencia de la geometría a través del coeficiente transferencia de calor por convección.....	37
4.2.4	Comparación de los resultados de las pruebas experimentales para las tuberías en acero inoxidable y cobre.....	37
4.3	Procesos de fusión y cristalización de la cera de parafina .....	39
4.3.1	Proceso de fusión con geometría serpentín cuadrada de material cobre.....	39
4.3.2	Proceso de cristalización con geometría serpentín cuadrada de material cobre. ....	41
4.3.3	Comparación del desempeño como PCM de estearina de palma con cera de parafina por medio del coeficiente de transferencia de calor (h). ....	43
5	Conclusiones .....	45
	Referencia Bibliográficas.....	47
	Apéndices.....	53

### Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b> Temperaturas de fusión y cristalización de la cera de parafina y la estearina de palma hidrogenada.....	15
<b>Tabla 2</b> Tiempo en el que los sensores de cada una de las configuraciones geométricas alcanzaron la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada.....	25
<b>Tabla 3</b> <i>Análisis de temperatura y valores de coeficiente h a las horas 24 y 14 en experimentos de fusión de la estearina de palma hidrogenada</i> .....	32
<b>Tabla 4</b> Tiempo en el que los sensores de cada una de las configuraciones geométricas alcanzaron la temperatura de cristalización de la estearina de palma hidrogenada .....	33
<b>Tabla 5</b> <i>Análisis de temperatura y coeficientes h de la hora 0 a la 6 y de la 6 a la 12 en experimentos de cristalización de la estearina de palma hidrogenada</i> .....	38
<b>Tabla 6</b> Comparación de los tiempos de fusión para la estearina de palma hidrogenada (48°C) y la parafina (57°C) .....	43
<b>Tabla 7</b> <i>Proceso de fusión de estearina de palma hidrogenada y cera de parafina en geometría serpentín cuadrada de material cobre</i> .....	44
<b>Tabla 8</b> Comparación de los tiempos en los que la estearina (43°C) y la parafina (53°C) alcanzaron la temperatura de cristalización. ....	44
<b>Tabla 9</b> <i>Comparación del proceso de cristalización de estearina de palma hidrogenada y cera de parafina en geometría de serpentín cuadrado y tubería de cobre.</i> .....	44

### Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> Banco de pruebas y ubicación de los sensores. ....	21
<b>Figura 2</b> a) Geometría de serpentín cuadrada b) Geometría de serpentín U c) Geometría de serpentín L .....	21
<b>Figura 3</b> Banco de pruebas con geometría acero de serpentín completa y estearina de palma hidrogenada. ....	22
<b>Figura 4</b> Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente $h$ una vez el sensor alcanzó la $T$ fusión $48^{\circ}\text{C}$ . ....	26
<b>Figura 5</b> Distribución de temperatura en el proceso de fusión para geometría cuadrada en $t=5\text{h}$ , $t=10\text{h}$ , $t=15\text{h}$ y $t=20\text{h}$ . Trayectoria del fluido caloportador indicada. ....	27
<b>Figura 6</b> Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín U. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente $h$ una vez el sensor alcanzó la temperatura de $48^{\circ}\text{C}$ . ....	29
<b>Figura 7</b> Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente mientras los sensores registraron temperaturas mayores a $43.7^{\circ}\text{C}$ . ....	34
<b>Figura 8</b> Temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín U. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve	

*sensores y el valor del coeficiente h siempre y cuando el sensor alcanzara una temperatura mayor de 47°C. .... 36*

**Figura 9** *Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín completa. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente h una vez el sensor alcanzó la temperatura de 57°C. .... 40*

**Figura 10** *Distribución de temperatura en el proceso de fusión para geometría cuadrada en  $t=5h$ ,  $t=10h$ ,  $t=15h$  y  $t=20h$ . .... 40*

**Figura 11** *Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente h una vez el sensor alcanzó la temperatura de 57°C. .... 42*

### Resumen

**Título:** Evaluación experimental del proceso de fusión y cristalización de estearina de palma hidrogenada para su uso como PCM en sistemas carcasa-serpentín

**Autor:** Valentina Aguilera Duarte y Anamaria Blanco Beltrán

**Palabras clave:** material de cambio de fase, estearina de palma hidrogenada, cera de parafina sistemas carcasa-serpentín, coeficiente de transferencia de calor.

**Descripción:** El presente estudio se enfocó en la evaluación experimental de la estearina de palma hidrogenada como material de cambio de fase (PCM) en sistemas de carcasa-serpentín con diversas configuraciones geométricas y diferentes materiales de tubería. Los objetivos principales fueron analizar la influencia de la geometría del serpentín, comparar el rendimiento entre el cobre y el acero inoxidable como materiales de construcción de los serpentines, y evaluar el desempeño de la estearina en comparación con la cera de parafina. La metodología involucró la realización de pruebas experimentales en un banco de pruebas diseñado específicamente para evaluar los procesos de fusión y cristalización. Se utilizaron sensores para medir las temperaturas del PCM y del fluido caloportador, y se desarrolló un código en MATLAB para analizar los datos recopilados. Se evaluaron tres configuraciones geométricas de serpentines: cuadrada, en forma de U y en forma de L, tanto en cobre como en acero inoxidable. Los resultados principales indicaron que la geometría cuadrada obtuvo los valores más altos de coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ), lo que facilitó una fusión más rápida. La geometría en forma de U mostró un rendimiento similar con un menor uso de material. Además, se observó que, aunque el acero inoxidable podía ayudar a reducir costos, esto no compensaba su menor rendimiento en comparación con el cobre. La estearina de palma hidrogenada demostró potencial como PCM, a pesar de que su proceso de fusión fue más lento que el de la parafina. Ahora bien, este estudio proporcionó información valiosa sobre cómo la geometría y el material de los serpentines afectan el rendimiento de los sistemas de almacenamiento de energía solar térmica con PCM.

### Abstract

**Title:** Experimental evaluation of the melting and crystallization process of hydrogenated palm stearin for its use as PCM in casing-serpentine systems.

**Authors:** Valentina Aguilera Duarte and Anamaria Blanco Beltrán

**Keywords:** phase change material, hydrogenated palm stearin, kerosene wax, casing-serpentine systems, heat transfer coefficient.

**Description:** The present study focused on the experimental evaluation of hydrogenated palm stearin as a phase change material (PCM) in casing-coil systems with various geometrical configurations and different piping materials. The main objectives were to analyze the influence of coil geometry, compare the performance between copper and stainless steel as coil construction materials, and evaluate the performance of stearin compared to paraffin wax. The methodology involved performing experimental tests on a test rig specifically designed to evaluate the melting and crystallization processes. Sensors were used to measure PCM and heat transfer fluid temperatures, and MATLAB code was developed to analyze the data collected. Three coil geometry configurations were evaluated: square, U-shaped and L-shaped, in both copper and stainless steel. The main results indicated that the square geometry obtained the highest heat transfer coefficient ( $h$ ) values, which facilitated faster melting. The U-shaped geometry showed similar performance with lower material usage. In addition, it was noted that although stainless steel could help reduce costs, this did not compensate for its lower performance compared to copper. Hydrogenated palm stearin showed potential as a PCM, even though its melting process was slower than that of kerosene. However, this study provided valuable information on how coil geometry and material affect the performance of solar thermal energy storage systems with PCM.

## Introducción

En la actualidad, el cambio climático ha sido considerado como el mayor desafío social a nivel mundial al afectar el entorno físico, el ecosistema y sus interacciones con los seres humanos. En 2020 se reportó que la temperatura media del planeta había aumentado  $0.94^{\circ}\text{C}$  por encima del promedio de 1951-1980 (Zhao et al., 2022). Adicionalmente, el incremento de la población y sus elevadas demandas de energía anticipan una mayor emisión de gases de efecto invernadero y generación de residuos (Shen et al., 2022). En el caso colombiano, a pesar de que se ha implementado en gran medida la energía hidroeléctrica (Masum et al., 2021), se sigue utilizando combustibles fósiles, lo que fomenta las emisiones y deteriora el medio ambiente (Adebayo et al., 2021). Es por esto que actualmente, en Colombia se busca implementar una transición energética, impulsando proyectos basados principalmente en energía solar y eólica (Zapata et al., 2022). La energía solar puede aprovecharse para la producción de electricidad o calor (Mohammad et al., 2022), sin embargo, factores naturales como la lluvia, el viento y la duración del día, generan la necesidad de implementar sistemas avanzados de almacenamiento (Mofijur et al., 2019).

Una alternativa para el almacenamiento de la energía solar térmica es el uso de materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés) contenidos en intercambiadores de calor (Youssef et al., 2018). Los PCM son materiales que pasan de estado sólido a estado líquido a medida que almacenan calor, para posteriormente revertir el proceso a medida que liberan energía (Shen et al., 2022). El diseño de estos intercambiadores de calor debe procurar maximizar la velocidad de transferencia de energía para lo cual se emplean matrices de soporte, aditivos y modificaciones en la configuración geométrica (Momeni et al., 2023).

Respecto a la configuración geométrica las variantes más utilizadas son el intercambiador tubo carcasa con o sin aletas difusoras, mientras que solo algunos trabajos reportan el uso de la configuración carcasa-serpentín. Esta última presenta una ventaja respecto a los costos de construcción gracias a su simplicidad, menor cantidad de componentes y menor tiempo de ensamblado. Con respecto al material de tubería, el cobre es uno de los más utilizados en la fabricación de intercambiadores de calor debido a su alta conductividad térmica. (Klein et al., 2015). No obstante, el acero inoxidable es una alternativa adecuada para aletas y tubos al reducir los costos de fabricación en un 40% respecto a una construcción con cobre(Chaanaoui et al., 2020). En julio de 2022, el centro de investigación para el desarrollo sostenible en industria y energía (CIDES) inauguró la estación experimental de conversión de radiación solar en energía térmica para la transición energética en zonas de alta montaña, en alianza con la Universidad de Northumbria del Reino Unido, utilizando como material de cambio de fase la estearina de palma hidrogenada y una configuración carcasa-serpentín (Dirección de Comunicaciones - Universidad Industrial de Santander., 2022).

Por consiguiente, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar experimentalmente los procesos de fusión y cristalización de la estearina de palma hidrogenada para su uso como PCM en sistemas carcasa-serpentín. Teniendo en cuenta lo anterior es necesario comprender cuantitativamente ¿Cómo influye la geometría del serpentín y el material de construcción en el proceso de fusión y cristalización de la estearina de palma hidrogenada empleando un serpentín de perfil cuadrado, en forma de U y en forma de L?

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Evaluar experimentalmente el proceso de fusión y cristalización de estearina de palma hidrogenada para su uso como PCM en sistemas carcasa-serpentín

### **1.2 Objetivos específicos**

- Analizar la influencia de la geometría del serpentín en la transferencia de calor durante el proceso de fusión y cristalización de la estearina de palma hidrogenada.
- Comparar la transferencia de calor durante el proceso de fusión y cristalización de la estearina de palma hidrogenada cuando se emplea serpentín en cobre y en acero inoxidable.
- Evaluar el desempeño como PCM de la estearina de palma hidrogenada respecto a la cera de parafina durante el proceso de fusión y cristalización.

## 2 Marco teórico y Estado del arte

Las técnicas de almacenamiento de energía se dividen en tres grupos principales: calor sensible, calor latente y energía termoquímica. Ahora bien, los sistemas de almacenamiento de energía térmica por calor latente (LHTES) están ganando cada vez más interés debido a su alta densidad de almacenamiento y su capacidad de suministrar calor de forma constante a la temperatura de transición de fase del PCM (Sciacovelli et al., 2013). Los materiales de cambio de fase pueden ser compuestos orgánicos, como la parafina o grasas vegetales, inorgánicos como sales e hidratos de sal, y poliméricos, como el poli glicol y el polietileno (Kumar et al., 2021). También se destaca otro tipo de PCMs que son las mezclas eutécticas de naturaleza inorgánica y/u orgánica (Akeiber et al., 2016). Para el almacenamiento de calor latente, los PCMs deben tener algunas características como lo son una temperatura de fusión adecuada para la aplicación, estabilidad química y alta conductividad térmica (Liu et al., 2021). Algunas de estas características se encuentran en materiales orgánicos de origen natural como lo son la cera de abejas, la estearina de palma o la estearina de palma hidrogenada. Esta última se destaca por su temperatura de fusión de 59 °C, adecuada para aplicaciones de calefacción o suministro de agua caliente (Lizcano-González et al., 2023). A continuación, se muestran el punto de fusión y cristalización de la cera de parafina y la estearina de palma hidrogenada. Cabe destacar que la fusión de la estearina se da a dos temperaturas diferentes y la cristalización solo a una.

**Tabla 1**

*Temperaturas de fusión y cristalización de la cera de parafina y la estearina de palma hidrogenada*

PCM	Punto de fusión (°C)	Punto de cristalización(°C)
<b>Cera de parafina</b>	57	53
<b>Estearina de palma hidrogenada</b>	48 59	43

Nota: adaptado de (Chinome Chinome y Sánchez Sepúlveda, 2022)

Respecto al sistema de almacenamiento de calor latente, se han propuesto diferentes configuraciones geométricas para las carcasa de PCM: carcasa esféricas, carcasa rectangulares altas y tubos cilíndricos (Sciacovelli et al., 2013). Como se mencionó previamente, las variantes geométricas más estudiadas son el intercambiador tubo-carcasa con o sin aletas. Se ha reportado mejoras en el tiempo de fusión del ácido láurico para su uso como PCM utilizando un sistema LHTES de tubo-carcasa con cuatro arreglos diferentes. En los intercambiadores el mecanismo de transferencia de calor más común es la convección natural, que se caracteriza por el movimiento de un fluido debido a las diferencias de flotabilidad inducidas por variaciones en la temperatura del mismo (Amoo, 2020). Ahora bien, la convección desempeñó un papel importante en la fusión del ácido láurico, acelerando el proceso y reduciendo el tiempo de fusión en aproximadamente un 70% en las configuraciones donde los tubos se ubicaron al inferior de la carcasa (Mahdi et al., 2021). Se ha estudiado también el desempeño del ácido palmítico como PCM, en un sistema de almacenamiento de tubos circulares dispuestos en posición vertical y horizontal. Se concluyó que el tiempo de fusión se reducía significativamente cuando el tubo que contenía el PCM estaba posición horizontal. Esta mejora se debió que en esta orientación el frente de fusión tenía que recorrer una menor distancia en dirección radial en la parte superior del tubo, lo que facilitó la convección natural. Por otro lado, en el proceso de cristalización, se observó que los efectos de convección fueron mínimos puesto que la fase solidificada del PCM limitó la transferencia de calor. En consecuencia, la disposición horizontal de los tubos no produjo una reducción significativa en los tiempos de cristalización en comparación con la disposición vertical (Hasan, 1994). Se reportó un análisis del proceso de fusión de la cera de parafina en una unidad almacenamiento de calor latente (LHTES) de carcasa y tubos con aletas. El estudio determinó que

la velocidad de fusión del PCM era superior con los tubos sin aletas puestos en orientación horizontal (Mahdi et al., 2019). Ahora bien, un estudio numérico analizó los efectos de la convección natural en la cera de parafina cuando se varia la temperatura del fluido térmico (HTF). Se identificó que la convección natural y las condiciones del HTF de entrada afectan en gran medida el comportamiento fluidodinámico térmico de la unidad LHTES . Se concluyó que, a medida que aumenta de la temperatura de entrada del HTF se incrementa el flux de calor y se reduce el tiempo de fusión (Sciacovelli et al., 2013).

Un estudio experimental sobre el rendimiento térmico de un sistema LHTES con una carcasa multitubular vertical evaluó la influencia de parámetros operativos como la temperatura inicial de PCM, el caudal másico y la temperatura inicial de HTF en el desempeño del proceso de descarga para aplicaciones solares a temperatura media ( $\sim 200$  °C). Se observó que la energía liberada y la eficiencia del proceso de descarga mejoraron incrementando el caudal másico del HTF y la temperatura inicial de PCM, y reduciendo la temperatura de entrada de HTF (Raul et al., 2018). Por otra parte, se reportó un estudio sobre la mejora del proceso de cristalización alrededor de los tubos con aletas. Se determinó que el diámetro de la aleta y la baja temperatura de la pared del tubo mejoran la posición y la velocidad de la interfaz reduciendo el tiempo de cristalización (Dos Santos et al., 2020).

Así mismo, en otro trabajo se comparó numéricamente el efecto de la convección natural en la operación de un sistema LHTES de tubo-carcasa con arreglos de tubos horizontales y verticales, y diferentes sitios de entrada del fluido caloportador. Los resultados indicaron que el modelo vertical con una entrada del HTF en la parte inferior exhibió la mayor tasa de fusión del PCM. Esto se debe a que se genera un gradiente de temperatura vertical, que a su vez provoca la

presencia de fuerzas de flotación, que hacen que el material de cambio de fundido a una temperatura más elevada se desplace desde el fondo hacia la superficie del sistema (Han et al., 2017). Por otra parte, se ha estudiado y comparado el comportamiento térmico de un sistema de almacenamiento de calor tipo tubo-carcasa con arreglos de tubo en orientación vertical y horizontal. Los resultados mostraron que, durante el proceso de carga en la orientación horizontal, la transferencia de calor por convección natural tuvo un fuerte efecto sobre la fusión de la parte superior del sólido. No obstante, su influencia en la mitad inferior fue menos significativo. A medida que el PCM se derretía, los cambios en la densidad generaban fuerzas de flotación que resultaban en el ascenso del PCM fundido, afectando así la mitad superior de la unidad de almacenamiento. Con respecto a la orientación vertical, se observó un rendimiento térmico deficiente durante el proceso de carga. En el proceso de descarga, el comportamiento térmico no muestra ninguna diferencia entre sistemas horizontales y verticales debido a que en ambas configuraciones el material sólido formaba una barrera que limitaba la transferencia de calor (Seddegh et al., 2016a).

El coeficiente de transferencia de calor local ( $h$ ) es un parámetro que se determina de forma experimental y cuyo valor depende de la configuración geométrica, la naturaleza del fluido y la velocidad del mismo. Se utiliza para comparar la velocidad de transferencia de calor en sistemas diferentes. En general, los flujos alrededor de cilindros y esferas comprenden separación del flujo, el cual es difícil de manejar en forma analítica. Por lo tanto, los flujos de ese tipo deben estudiarse de manera experimental o numérica (Cengel y Ghajar, 2015). Para un sistema de almacenamiento de calor tipo tubo-carcasa con aletas se estimó experimental y teóricamente el coeficiente de transferencia de calor por convección natural ( $h$ ). Se determinó que en ciertos puntos las corrientes

convectivas de las superficies verticales y horizontales se intensifican entre sí y restringen la formación de corrientes de convección en la dirección vertical (Pakalka et al., 2021).

Solo algunos trabajos reportan el uso de la configuración carcasa-serpentin. Uno de estos, realizó un estudio experimental en un sistema de almacenamiento de PCM en frío con serpentin en tanque. El estudio demostró que el uso de serpentines en los diseños de unidades de almacenamiento resulta eficaz para transferir calor en grandes superficies (Castell et al., 2011). Ahora bien, un artículo investigó las características de transferencia de calor de un prototipo de sistema LHTES con una configuración que consistía en una carcasa cilíndrica vertical, un serpentin helicoidal e insertos metálicos (MI) con galio metálico líquido (Ga). Los resultados indicaron que la geometría y las inserciones de metal favorecieron la convección natural del PCM asegurando procesos de carga y descarga rápidos (Salyan et al., 2020) Se reportó una investigación experimental sobre el rendimiento de un sistema de almacenamiento de energía con xilitol como PCM en un intercambiador de calor con un serpentin en espiral. El PCM almacenó 450 kJ de calor en 35 minutos durante la carga y 345kJ en 50 minutos para el proceso de descarga. Se encontró que cuando el PCM se derretía, el PCM líquido de menor densidad creaba fuerzas de flotabilidad que resultaban en convección natural. Por otro lado, el proceso de descarga estuvo regido principalmente por la conducción (Anish et al., 2021). También, se destaca una falta notable de estudios cuando se analiza por separado la evaluación primaria de las propiedades termo físicas del PCM en cálculos analíticos, modelos numéricos y trabajos de diseño. Una evaluación más precisa de los PCM podría permitir reducir las fallas de los sistemas LHTES diseñados (Ali et al., 2019). Esto indica que el proceso de transferencia de calor depende tanto de la geometría como el PCM a utilizar. La configuración carcasa-serpentin presenta una ventaja respecto a los costos de

construcción gracias a su simplicidad, menor cantidad de componentes y menor tiempo de ensamblado. Su diseño implica definir la forma del serpentín y el material de construcción, de tal forma que se maximice la convección natural en el PCM.

### **3 Descripción metodológica**

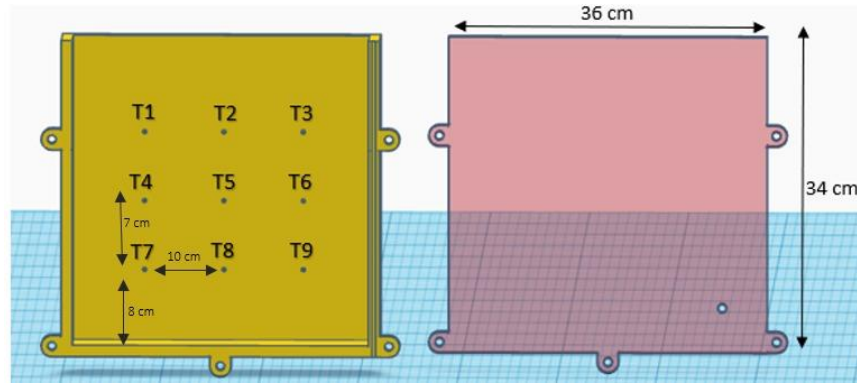
El desarrollo de este proyecto involucró varias etapas que incluyeron, la ejecución de pruebas experimentales en un banco de pruebas de fusión y cristalización para analizar la influencia de la geometría y material del intercambiador de calor en dos PCM, y la programación de un código empleando el software Matlab para el análisis de los datos.

#### **3.1 Equipo y recursos utilizados**

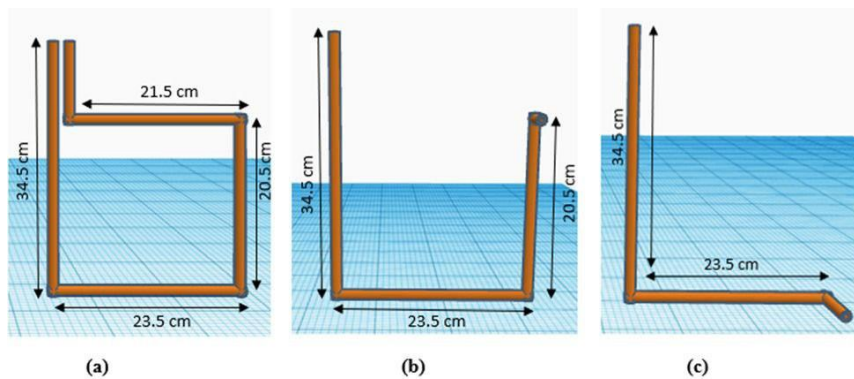
El sistema para el estudio experimental consiste en un banco de pruebas fabricado en material acrílico (ver Figura 1), diseñado específicamente para evaluar procesos de fusión y cristalización. El banco de pruebas fue equipado con un total de nueve sensores tipo DS18B20, posicionados estratégicamente para medir la temperatura del PCM. La disposición espacial de estos sensores dentro del banco de pruebas se describe en detalle en la Figura 1. Además, se incluyeron dos sensores adicionales para medir la temperatura del fluido caloportador tanto a la entrada como a la salida del sistema. Para la medición de flujo se empleó un medidor de efecto Hall. Para asegurar una temperatura constante del fluido caloportador entre 74-75 °C en los procesos de fusión, se empleó un baño térmico con sistema de recirculación de agua.

**Figura 1**

*Banco de pruebas y ubicación de los sensores.*

**Figura 2**

*a) Geometría de serpentín cuadrada b) Geometría de serpentín U c) Geometría de serpentín L*



Se emplearon tres configuraciones geométricas de serpentines de cobre y acero: una de forma cuadrada, una en forma de U y otra en forma de L, como se describe en detalle en la Figura 2. Como fluido caloportador, se utilizó agua para evaluar el proceso de fusión y cristalización. El sistema fue aislado mediante el uso de poliestireno expandido de 1.5 cm de grosor. Además, todo el sistema se instaló en el interior de una cámara cerrada para evitar corrientes de aire.

El sistema de medición y recolección de datos se programó en una tarjeta de desarrollo Arduino Uno (Arduino LLC). Para la visualización y almacenamiento de los datos se utilizó un

software Node-red (OpenJS Foundation), que permitió registrar las lecturas de los sensores del banco de pruebas, así como los valores de flujo y las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador, con un intervalo de registro de 3 segundos.

### Figura 3

*Banco de pruebas con geometría acero de serpentín completa y estearina de palma hidrogenada.*



Posteriormente, el procesamiento de los datos se llevó a cabo mediante un algoritmo programado en MATLAB (MathWorks, Inc).

## 3.2 Metodología experimental

La ejecución del componente experimental de esta propuesta constó de tres fases y un total de ocho actividades.

### 3.2.1 Análisis de la influencia de la geometría del serpentín en la transferencia de calor durante el proceso de fusión y cristalización de la estearina de palma hidrogenada.

La estearina de palma hidrogenada fue sometida a experimentos de fusión para cada configuración geométrica de los tubos en material cobre. Se empleó como fluido caloportador un flujo de agua constante de  $2.5 \pm 0.5$  L/min a una temperatura de  $75$  °C. La experimentación comenzó con el PCM a temperatura ambiente y finalizó una vez la prueba cumplió 24 horas. Se

realizó un procedimiento similar para evaluar el proceso de cristalización con un flujo de agua constante de  $2.5 \pm 0.5$  L/min y temperatura de  $[20-30]^{\circ}\text{C}$ . La prueba inició con el PCM a una temperatura de  $76^{\circ}\text{C}$  finalizó después de que transcurrieron 24 horas.

Para este análisis se creó un código de programación en MATLAB (MathWorks, Inc). ya que por cada ensayo se obtenían 270.000 lecturas de datos. El calor transferido del fluido caloportador al PCM y viceversa se calculó mediante la fórmula:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 1})$$

donde  $m$  representa el flujo másico,  $C_{p(T)}$  la capacidad calorífica y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del fluido. Es importante resaltar que el flujo másico y la capacidad calorífica son dependientes de la temperatura del fluido, por lo que dichas correlaciones fueron consideradas.

El coeficiente experimental de transferencia de calor por convección ( $h$ ) se calculó mediante la relación:

$$h_{PCM} = \frac{Q}{A_{PCM} \cdot (T_{HX} - T_{PCM})} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde  $Q$  denota el calor transferido durante el proceso,  $A_{PCM}$  corresponde área de transferencia de calor,  $T_{PCM}$  es la temperatura registrada en cada sensor y  $T_{HX}$  representa el promedio de las temperaturas de entrada y salida del fluido. (Pakalka et al., 2021). La evaluación de este coeficiente aportó información esencial sobre cómo afecta la geometría del sistema a la transferencia de calor, proporcionando así una visión clave de las características específicas del proceso experimental estudiado. Además de este parámetro se tuvieron en cuenta el tiempo en el

que los sensores alcanzaban de temperatura de fusión y cristalización, el número de sensores que registraban temperaturas estables al final de cada prueba y el calor transferido y cedido al PCM.

### **3.2.2 Estudio de la transferencia de calor durante el proceso de fusión y cristalización de la estearina de palma hidrogenada empleando serpentín en cobre y en acero inoxidable.**

Una vez que se analizó la influencia de la geometría utilizando serpentines de cobre, se realizaron experimentos similares de fusión y cristalización empleando serpentines de acero inoxidable. Se ejecutó el mismo procedimiento que en la actividad 3.2.1, bajo las mismas condiciones, con el cambio del material de los tubos por acero inoxidable. Con base en los resultados obtenidos de las actividades ya descritas, se ejecutó un análisis para definir el material que funde y cristaliza mejor el PCM. En este análisis se tuvieron en cuenta los parámetros mencionados en la actividad anterior con el fin de comparar el desempeño de las geometrías con los respectivos materiales (acero y cobre), basado en los valores del coeficiente experimental  $h$ .

### **3.2.3 Comparar el desempeño como PCM de la estearina de palma hidrogenada respecto a la cera de parafina durante el proceso de fusión y cristalización.**

A partir del análisis de los datos de las etapas anteriores, se seleccionó la geometría y el material del serpentín, tomando en consideración el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ), el calor transferido y cedido al material y las temperaturas registradas por los sensores al final de cada prueba. Posteriormente, se evaluó el proceso de fusión de la cera de parafina utilizando las mismas condiciones descritas en la sección 3.2.1. y el material de tubería seleccionado en la actividad 3.2.2. Ahora bien, para el proceso de cristalización se ejecutó un procedimiento similar al anterior con las condiciones descritas en las secciones 3.2.1 y 3.2.2. En esta actividad es preciso determinar el coeficiente  $h$ . Con base en los resultados obtenidos de las actividades ya descritas,

se ejecutó un análisis para definir de acuerdo con los parámetros establecido en la sección 3.2.1 para evaluar el desempeño de los PCMs, basado en los valores del coeficiente experimental  $h$ .

## 4 Resultados

### 4.1 Proceso de fusión de la estearina de palma empleando serpentines de cobre.

**Tabla 2**

*Tiempo en el que los sensores de cada una de las configuraciones geométricas alcanzaron la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada*

<b>Tiempo en el que los sensores alcanzaron una temperatura mayor a <math>T_F=48^\circ\text{C}</math> (h)</b>									
<b>Geometría</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>
<b>Cuadrada</b>	4	9	5	4	13	6	2	3	2
<b>Tipo U</b>	3	10	4	6	15	11	2	3	2
<b>Tipo L</b>	4	12	-	6	14	14	2	4	3

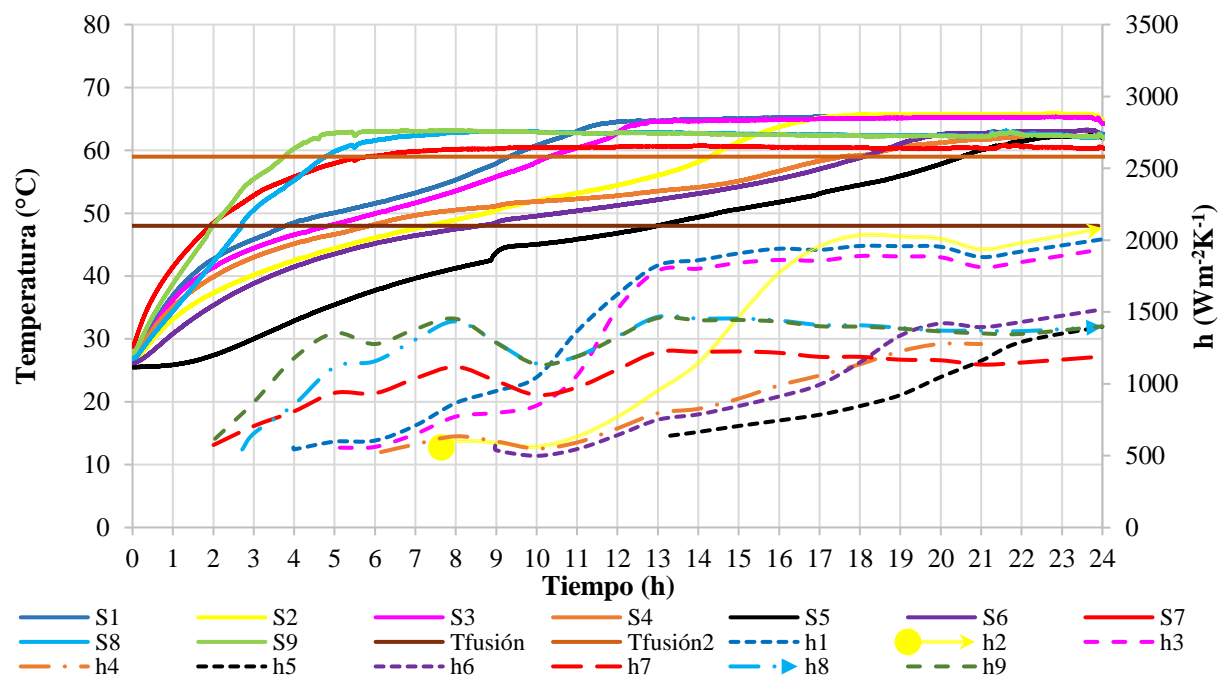
Para el análisis de la influencia del serpiente en la transferencia de calor durante el proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada se tuvo como criterio de selección el coeficiente de transferencia de calor local ( $h$ ) debido a que es un parámetro independiente del intercambiador a diferencia del calor transferido que resulta poco útil en la toma de decisiones al depender de la cantidad de PCM y el tipo de configuración (Cengel y Ghajar, 2015). También se tomaron en cuenta el número de sensores con PCM fundido alrededor a la hora 12 y 24, y la temperatura final en cada punto del banco al final de la prueba. Se observó cuantos y cuales sensores indicaban presencia de PCM en estado líquido a su alrededor a las 12 horas de prueba (ver Tabla 3), este límite de tiempo se fijó teniendo en cuenta que las pruebas tenían una duración de 24 horas y se esperaba que las geometrías presentaran valores de  $h$  a la mitad del proceso (superando los  $48^\circ\text{C}$ , temperatura a la que funde el PCM) en el caso de la fusión. Teniendo en cuenta lo anterior se descartó la geometría en forma de L (ver Apéndice A) debido a que solo se calcularon valores de

h para 5 sensores en la hora 12, esta cantidad no es factible para aplicaciones de energía solar térmica debido a que dichos procesos requieren velocidades de transferencia de calor altas. Por consiguiente, el análisis se centró en las dos geometrías restantes (cuadrada y en U), que presentaron coeficientes h para todos los puntos de medición a excepción de la ubicación de S5.

#### 4.1.1 Geometría serpiente tipo cuadrada.

**Figura 4**

*Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpiente cuadrada. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente h una vez el sensor alcanzó la T fusión 48°C.*

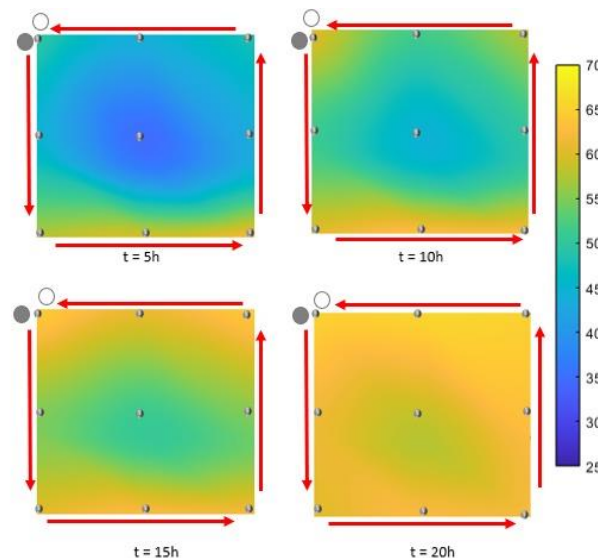


En la Figura 4 se muestran los valores de tiempo y temperaturas registrados durante las 24 horas de prueba en los nueve puntos de medición para la geometría cuadrada de cobre. Los coeficientes de transferencia de calor por convección (h) se calcularon una vez el sensor registraba una temperatura mayor a 48°C, temperatura a la que se funde el PCM. Todos los sensores

presentaron una temperatura máxima entre los 60-65°C: A las 5 horas, S9, registró 63°C. A continuación, a las 6 horas, S7 reportó una temperatura máxima de 60°C, seguido por S8 a las 7 horas, con 63°C. A las 13 horas, S3 alcanzó 65°C, mientras que S1 llegó a su temperatura máxima a las 14 horas con 65°C. Más tarde, a las 17 horas, S2 también alcanzó su máxima de 65°C. Los sensores S6, S5 y S4 registraron temperaturas de 62°C a las 22, 23 y 21 horas, respectivamente. Se observó un calentamiento en sentido vertical ascendente desde la parte inferior del PCM (Ver Figura 5) que maximiza la convección natural y en consecuencia la transferencia de calor. (Mahdi et al., 2021).

### Figura 5

*Distribución de temperatura en el proceso de fusión para geometría cuadrada en  $t=5h$ ,  $t=10h$ ,  $t=15h$  y  $t=20h$ . Trayectoria del fluido caloportador indicada.*



Con respecto a los valores de  $h$ , estos se analizaron por intervalos de tiempo, correspondientes (0-12) h y de (12-24h). Se evidenció que  $h7$ ,  $h8$  y  $h9$  presentaron un crecimiento acelerado después de las primeras 2 horas debido al tramo de tubería con orientación horizontal que se encontraba justo debajo de los sensores y promovía la fusión del material. El incremento se

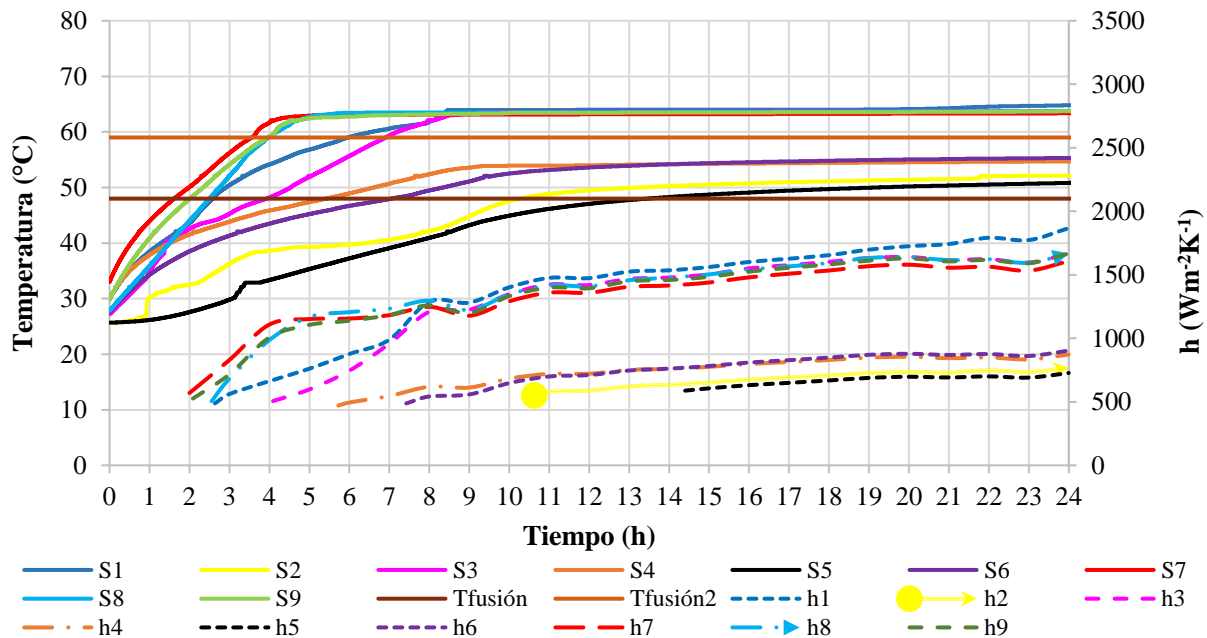
detuvo en la hora 8 ya que las temperaturas se estabilizaron. De la hora 12 a la 24 mantuvieron valores por encima de  $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$  con pequeñas fluctuaciones. Por otro lado,  $h_1$  y  $h_3$  en el primer tramo de tiempo presentaron un crecimiento lento debido a una menor convección natural por la ubicación de la entrada del fluido caloportador (sentido vertical descendente), al igual que con las  $h$  mencionadas en el párrafo anterior hubo un leve decrecimiento que coincidió con la estabilización de las temperaturas. No obstante, ambos coeficientes experimentaron un incremento durante el segundo intervalo de tiempo. Es preciso destacar que, al finalizar el segundo tramo se calcularon los valores más altos de  $h$  con respecto a todos los puntos de medición. Esto se debe que el PCM se hace menos denso a medida que se funde creando fuerzas de flotación que generan un movimiento ascendente, favoreciendo la convección natural (Seddegh et al., 2016b). Con relación a  $h_2$ , en la primera parte de la prueba crece lentamente en comparación a los sensores que lo rodean. Sin embargo, en el segundo tramo de tiempo presenta los valores de  $h$  más altos de toda la prueba, esto se explica en virtud de que se encontraba en medio de dos zonas que presentaban una gran cantidad de material fundido. Durante las primeras 12 horas de prueba,  $h_4$  y  $h_6$  crecieron lentamente. Ahora bien, en el segundo tramo de tiempo presentaron valores mayores a los  $500 \text{ W/m}^2\text{K}$ . No obstante, fueron coeficientes bajos en comparación con los que se calcularon para otros sensores. Así mismo, se evidenció una vez más un declive en los valores de  $h$  cuando las temperaturas se estabilizaron. Por otro lado, el coeficiente  $h_5$ , presentó valores únicamente en el segundo intervalo de tiempo, los cuales fueron los más bajos en comparación a todos los  $h$  calculados. Es relevante destacar que, para esta sección ( $h_4$ ,  $h_5$ ,  $h_6$ ) la ubicación no favoreció la convección por la orientación de la tubería cercana, como se mencionó previamente. Por consiguiente, el PCM permaneció en estado sólido por una gran cantidad de tiempo y en ese estado de agregación no conducía adecuadamente el calor (Mahdi et al., 2019).

#### 4.1.2 Geometría serpentín tipo U.

En la Figura 6 se muestran los valores de tiempo y temperaturas registrados durante las 24 horas de prueba en los nueve puntos de medición para la geometría en U de cobre. Los coeficientes de transferencia de calor por convección ( $h$ ) se calcularon una vez el sensor registraba una temperatura mayor a  $48^{\circ}\text{C}$ , temperatura a la que se funde el PCM. Para esta configuración la transferencia de calor tuvo mayor velocidad en sentido vertical ascendente. (Ver Apéndice A).

**Figura 6**

*Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín U. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente  $h$  una vez el sensor alcanzó la temperatura de  $48^{\circ}\text{C}$ .*



Todos los sensores presentaron una temperatura máxima entre los  $51\text{-}64^{\circ}\text{C}$ : A las 5 horas, S7 alcanzó su punto más alto, registrando  $63^{\circ}\text{C}$ . A continuación, a las 6 horas, S8 y S9 reportaron  $63^{\circ}\text{C}$ . seguido por S1 y S3 a las 9 horas, que registraron  $64^{\circ}\text{C}$  y  $63^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. A las 10 horas, S4 alcanzó su punto máximo de  $53^{\circ}\text{C}$ , mientras que S6 llegó a  $55^{\circ}\text{C}$  a las 19 horas. Más

tarde, a las 22 horas, S2 alcanzó 52°C. Finalmente, S5 registró una temperatura de 51°C a las 24 horas.

Con respecto a los valores de  $h$ , estos se analizaron por intervalos de tiempo, como se mencionó previamente. Se evidenció que  $h_7$ ,  $h_8$  y  $h_9$  presentaron un crecimiento acelerado después de las primeras 2 horas debido al tramo de tubería con orientación horizontal que se encontraba justo debajo de los sensores y promovía la fusión del material. El incremento se detuvo en la hora 4 ya que las temperaturas se estabilizaron. De la hora 12 a la 24 mantuvieron valores por encima de 1000 W/m<sup>2</sup>K con pequeñas fluctuaciones. Este comportamiento se explica por la ubicación de los sensores como lo evidenció el trabajo de (Hasan, 1994). Por otro lado,  $h_1$  y  $h_3$  en el primer tramo de tiempo presentaron menor convección natural, al igual que con las  $h$  mencionadas en el párrafo anterior hubo un leve decrecimiento que coincidió con la estabilización de las temperaturas. No obstante, ambos coeficientes experimentaron un incremento durante el segundo intervalo de tiempo. Es preciso destacar que, al finalizar el segundo tramo se calcularon los valores más altos de  $h$  para  $h_1$  y  $h_3$  con respecto a todos los puntos de medición. Esto se debe a las fuerzas de flotación que se indican en el trabajo de (Anish et al., 2021). Con relación a  $h_2$ , en la primera parte de la prueba crece lentamente en comparación a los sensores que lo rodean. En el segundo tramo de tiempo presenta los valores de  $h$  más bajos de toda la prueba, esto se explica en virtud de que no tenía tubería cerca y a pesar de se encontraba en medio de dos zonas que estaban teniendo una alta fusión no fue suficiente para que se fundiera el PCM en dicho punto. Durante las primeras 12 horas de prueba,  $h_4$  y  $h_6$  crecieron lentamente, comportamiento que se mantiene en el segundo tramo de tiempo. Además, no presentaron decrecimientos debido a que los sensores temperatura no alcanzaron la estabilización. Los valores de los coeficientes de  $h_4$  y  $h_6$  fueron bajos

en comparación con los que se calcularon para otros sensores. Por otro lado, el coeficiente  $h_5$ , presentó valores únicamente en el segundo intervalo de tiempo, los cuales fueron los más bajos en comparación a todos los  $h$  calculados. Es relevante destacar que, para esta sección ( $h_4$ ,  $h_5$ ,  $h_6$ ) la ubicación no favoreció la convección por la orientación de la tubería cercana, como se mencionó previamente. Por consiguiente, el PCM permaneció en estado sólido por una gran cantidad de tiempo lo que limitó la transferencia de calor (Mahdi et al., 2019). La geometría tipo U presentó valores bajos de  $h_2$  y  $h_5$  en comparación a la geometría cuadrada, debido a que la convección natural estaba influenciada únicamente por las fuerzas de flotación del PCM cuando este se fundía.

#### **4.1.3 Influencia de la geometría sobre el coeficiente transferencia de calor por convección (h).**

Las dos configuraciones permitieron lograr la fusión del PCM dentro de las 24 horas del experimento. Sin embargo, presentaron diferencias significativas en términos de la transferencia de calor y la homogeneidad del proceso. La geometría cuadrada mostró una fusión más completa y uniforme, logrando que todos los sensores alcanzaran la temperatura de fusión ( $T_F$ ) de  $60^\circ\text{C}$  al finalizar la prueba. Esto sugiere una distribución más uniforme en todo el volumen del PCM. En contraste, la geometría en forma de U presentó una fusión menos uniforme, con solo cinco sensores alcanzando temperaturas superiores a los  $60^\circ\text{C}$ . Algunos sensores (S2, S4, S5, S6) no lograron alcanzar la temperatura de fusión del PCM, indicando que la transferencia de calor fue menos homogénea en ciertas ubicaciones del sistema. Este comportamiento muestra el efecto positivo que tiene la fusión rápida de la capa superior del PCM sobre la velocidad de transferencia de calor; debido a que crea una zona de libre movimiento para el PCM líquido lo que permite tener valores altos de convección natural. Ahora bien, los valores de  $h$  para la geometría cuadrada fueron mucho

mayores que los de la configuración tipo U a las 12 y 24 horas (Ver Tabla 3). En esta actividad se seleccionó la geometría cuadrada debido a sus altos valores de  $h$ .

#### 4.1.4 Comparación de los resultados de las pruebas experimentales para las tuberías en acero inoxidable y cobre.

**Tabla 3**

*Análisis de temperatura y valores de coeficiente  $h$  a las horas 24 y 14 en experimentos de fusión de la estearina de palma hidrogenada*

Geometría	Material	No. de sensores con PCM fundido (12h)	Promedio coeficientes $h$ ( $Wm^{-2}K^{-1}$ ) (12h)	No. Sensores estables con $T_{max}=60^{\circ}C$ (24h)	Promedio coeficientes $h$ ( $Wm^{-2}K^{-1}$ ) (24h)	$Q_{Total}$ transferido al PCM (kJ)
Cuadrada	Cobre	8	999	9	1595	42.496
Cuadrada	Acero	8	677	8	1168	11.558
U	Cobre	8	844	5	1305	37.060
U	Acero	7	1168	9	1731	40.855
L	Cobre	5	710	8	1813	24.233
L	Acero	4	846	6	1004	28.892

En la Tabla 3, se presentan los datos relacionados con las pruebas de fusión de las tres diferentes configuraciones de geometría de serpentín de material acero y cobre.

La geometría cuadrada presentó el mismo número de sensores con PCM fundido a las 12 horas en los dos materiales. Esto sugiere que, en términos de sensores iniciales, no existió una diferencia significativa entre los dos materiales. Sin embargo, al evaluar la estabilidad de los sensores durante un período de 24 horas y los rangos de los coeficientes  $h$ , el cobre superó al acero. Además, el rango del coeficiente  $h$  del cobre fue un 71.50% más alto que el de acero al final de la prueba. En este caso, el cobre fue el material más adecuado para la geometría cuadrada.

Para el caso de la geometría tipo U, el cobre presentó un mayor número de sensores que el acero a las 12 horas de prueba. Sin embargo, al finalizar la experimentación, el cobre reportó 5 sensores, en contraste con el acero, donde todos alcanzaron la temperatura máxima. En cuanto a los valores de  $h$ , el cobre mostró un rango un 31.17% más bajo que el acero a las 24. En este caso, el acero tuvo un mejor desempeño en la transferencia de calor.

Finalmente, respecto a la geometría L, al completar las 24 horas de prueba, el cobre presentó un rango de coeficiente  $h$  con un porcentaje de 71.59% más alto que el rango de acero.

#### 4.2 Proceso de cristalización de la estearina de palma hidrogenada en geometrías de material cobre.

**Tabla 4**

*Tiempo en el que los sensores de cada una de las configuraciones geométricas alcanzaron la temperatura de cristalización de la estearina de palma hidrogenada*

<b>Tiempo en el que los sensores alcanzaron una temperatura menor a <math>T_c=43^\circ\text{C}</math> (h)</b>									
<b>Geometría</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>
Cuadrada	7	10	2	11	15	7	7	10	4
Tipo U	3	8	4	4	11	6	3	7	4
Tipo L	12	17	15	7	14	13	4	9	7

Para el análisis de la influencia de la geometría del serpiente en la transferencia de calor durante el proceso de cristalización de la estearina de palma hidrogenada se tomó como criterio de selección una vez más el coeficiente  $h$ , el número de sensores con PCM cristalizado en las horas 6 y 12, y las temperaturas finales de los sensores a las 24 horas de prueba. Ahora bien, se observó si a las 12 horas de prueba aún se calculaban valores de  $h$  para todos los puntos de medición, ya que el hecho de presentar coeficientes indicaría que en ese punto aún no había presencia de PCM cristalizado. Teniendo en cuenta lo anterior se descartó la geometría en forma de L (ver Tabla 4 y



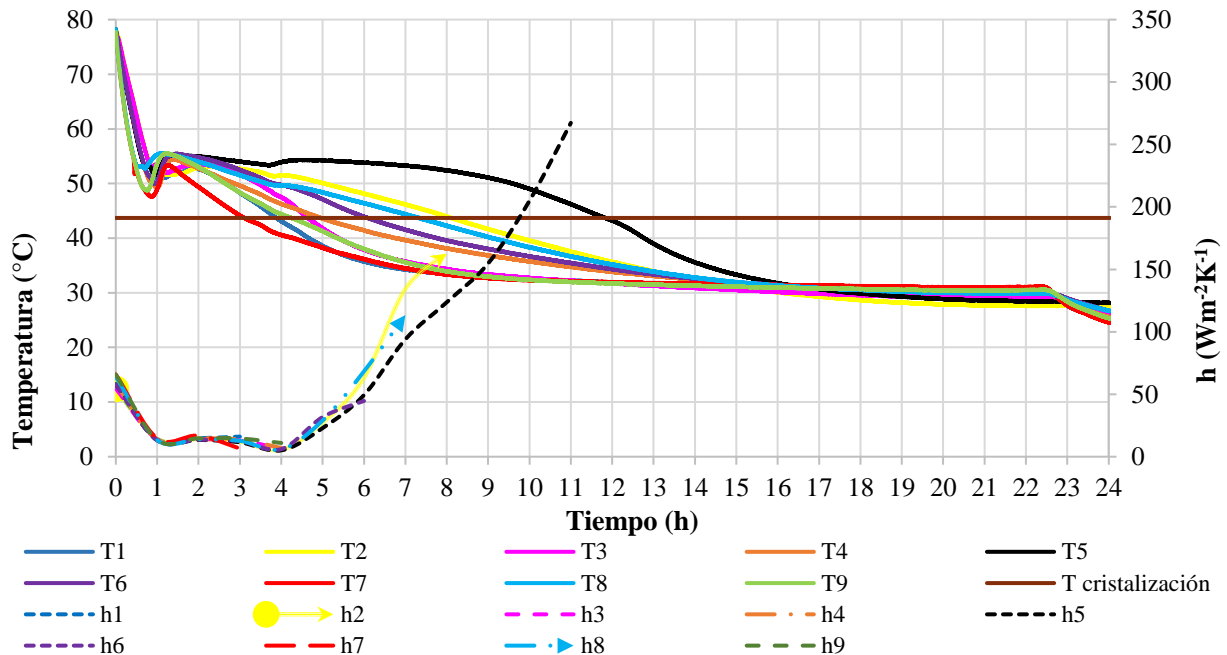
A diferencia de la fusión en el proceso de descarga no hay un comportamiento térmico marcado de la dirección de la transferencia de calor con respecto a los tramos de tubería verticales y horizontales como ocurrió en el trabajo de (Seddegh et al., 2016b). Al finalizar la prueba se observaron temperaturas mínimas en todos los sensores en un rango de 23-28°C. Después de 24 horas, S3 alcanzó su punto más bajo, registrando 24°C mientras que S9 reportó 25°C. A las 23 horas, S1, S2, S6 y S7 registraron 26°C, seguidas por S2 con la misma temperatura mínima. S5 tuvo 29°C, mientras que S4 y S7 registraron 27°C a las 7 horas.

Con respecto a los coeficientes de transferencia de calor ( $h$ ), estos se analizaron en dos intervalos de tiempo: de 0 a 6 horas y de 6 a 12. Durante el primer tramo de tiempo todos los valores de  $h$  en los puntos de medición presentaron un decrecimiento alrededor de la hora uno que coincidió con una leve estabilización de las temperaturas en un rango de 40-60°C. Se evidenció que  $h_3$  presentó un crecimiento acelerado, en comparación con otros puntos, y en la hora 2 se dejaron de calcular valores para este ya que su temperatura fue menor a los 43°C. Durante la hora 3 todos los valores de  $h$  presentaron un crecimiento. En la hora 4,  $h_9$  dejó de presentar valores de coeficientes, debido a su posición cerca de una esquina de serpentín como en el caso de  $h_3$ . En el segundo tramo de tiempo los coeficientes fluctuaron. Ahora bien,  $h_1$ ,  $h_7$  y  $h_6$  crecieron desde la hora 3 y dejaron de presentar valores  $h$  en la hora 7. Para el caso de  $h_1$ , esta rápida cristalización se debió que estaba en una esquina de tubería. Con respecto a  $h_7$  y  $h_8$ , la falta de valores después de la hora 7 puede atribuirse a su proximidad a una tubería horizontal y una de las zonas que presentaron mayores tasas de cristalización en el primer intervalo de tiempo.

### 4.2.2 Geometría de serpentín tipo U.

**Figura 8**

*Temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín U. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente  $h$  siempre y cuando el sensor alcanzara una temperatura mayor de  $47^{\circ}\text{C}$ .*



Todos los sensores presentaron una temperatura mínima entre los  $25\text{-}28^{\circ}\text{C}$ : A las 24 horas, S1, S7 y S9 alcanzaron su punto más bajo, registrando  $25^{\circ}\text{C}$ ; S3 y S4 reportaron  $26^{\circ}\text{C}$ ; S6 y S8 registró  $27^{\circ}\text{C}$ , seguido por S2 y S5 que reportaron  $26^{\circ}\text{C}$ ; S2 llegó a su punto mínimo con  $27.5^{\circ}\text{C}$  y S5 con  $28^{\circ}\text{C}$ . La distribución de temperaturas se muestra en el Apéndice A.

Con respecto a los valores de  $h$  observados en la Figura 8. Todos los valores de  $h$  en los puntos de medición presentaron un decrecimiento alrededor de la hora uno que coincidió con una leve estabilización de las temperaturas en un rango de  $40\text{-}60^{\circ}\text{C}$ . En la hora 3 se dejaron de calcular valores para h1 y h7, seguidos de h3, h4 y h9 en la hora 4. Durante la hora 5 los valores restantes

de h presentaron un crecimiento. Ahora bien, h6 dejó de presentar valores en la hora 6, h8 en la hora 7, h2 en la 8 y por último h5 en la hora 11.

#### **4.2.3 Influencia de la geometría a través del coeficiente transferencia de calor por convección.**

Ambas configuraciones geométricas lograron cristalizar a la estearina de palma hidrogenada en 24 horas. Cabe destacar que se fijó la temperatura mínima del PCM en 26°C, teniendo en cuenta la temperatura de la habitación donde se encontraba el banco de pruebas, para comparar el desempeño de las dos geometrías. La geometría en forma de U demostró un buen rendimiento al alcanzar rápidamente la temperatura mínima en siete sensores, mientras que la configuración cuadrada presentó seis sensores en 26°C en el mismo intervalo de tiempo. En términos de los coeficientes de transferencia de calor (h), las dos configuraciones presentaron resultados similares con decrecimientos alrededor de la hora uno seguidos de incrementos en los valores de h. Sin embargo, en la geometría cuadrada ocurrieron variaciones notables como el crecimiento acelerado de h3 y h9. Ahora bien, en esta actividad también se seleccionó la geometría cuadrada.

#### **4.2.4 Comparación de los resultados de las pruebas experimentales para las tuberías en acero inoxidable y cobre.**

**Tabla 5**

*Análisis de temperatura y coeficientes h de la hora 0 a la 6 y de la 6 a la 12 en experimentos de cristalización de la estearina de palma hidrogenada*

Geometría	Material	No de sensores con PCM cristalizado (6h)	Promedios coeficiente h ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) (0h-6h)	No de sensores con PCM cristalizado (12h)	Promedios coeficiente h ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) (6h-12h)	No de sensores estables $T_{\text{min}}=26$ °C (24h)	Qtotal cedido del PCM (kJ)
<b>Cuadrada</b>	Cobre	2	54	8	115	6	5.708
<b>Cuadrada</b>	Acero	2	15	8	81	8	4.783
<b>Tipo U</b>	Cobre	6	25	9	156	7	10.019
<b>Tipo U</b>	Acero	3	31	8	106	7	5.829
<b>Tipo L</b>	Cobre	1	50	5	376	2	5.535
<b>Tipo L</b>	Acero	1	17	7	476	5	8.257

En la Tabla 5, se presentan los datos relacionados con las pruebas de cristalización de las tres diferentes geometrías de serpentín de material acero y cobre. En la geometría cuadrada, no hubo diferencias significativas en el número de sensores cristalizados entre los dos materiales. Con respecto a el coeficiente de transferencia de calor (h), el rango del material de cobre fue 95.74% más amplio que el de acero en el primer intervalo de tiempo. Esto cambió de las 6 a las 12 horas donde el rango del acero fue un 66.36% más amplio que el del cobre. No obstante, el cobre presentó los valores más altos de coeficiente h en ambas ventanas de tiempo con un máximo de  $164 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  en el segundo tramo.

Para el caso de la geometría tipo U si se presentó una gran diferencia entre los materiales con respecto al número de sensores cristalizados. La configuración con el material de cobre cristalizó seis sensores de las 0h a las 6h y nueve de las 6h a las 12h. En relación con los rangos de coeficiente h el del acero fue más amplio por un 20.63% en el primer intervalo, mientras que el rango del cobre fue un 68.18% más grande en segundo tramo de tiempo. Sin embargo, los valores para el serpentín de cobre fueron en promedio más altos en ambas ventanas de tiempo

Con respecto a la geometría tipo L, ocurrió lo mismo que en el caso anterior, el rango de coeficiente  $h$  del acero fue más amplio en un 10.67% en el primer tramo, mientras que en el segundo el rango más grande lo tuvo el cobre por una diferencia del 0.93%. En esta configuración el acero presentó los mayores valores de  $h$  en promedio.

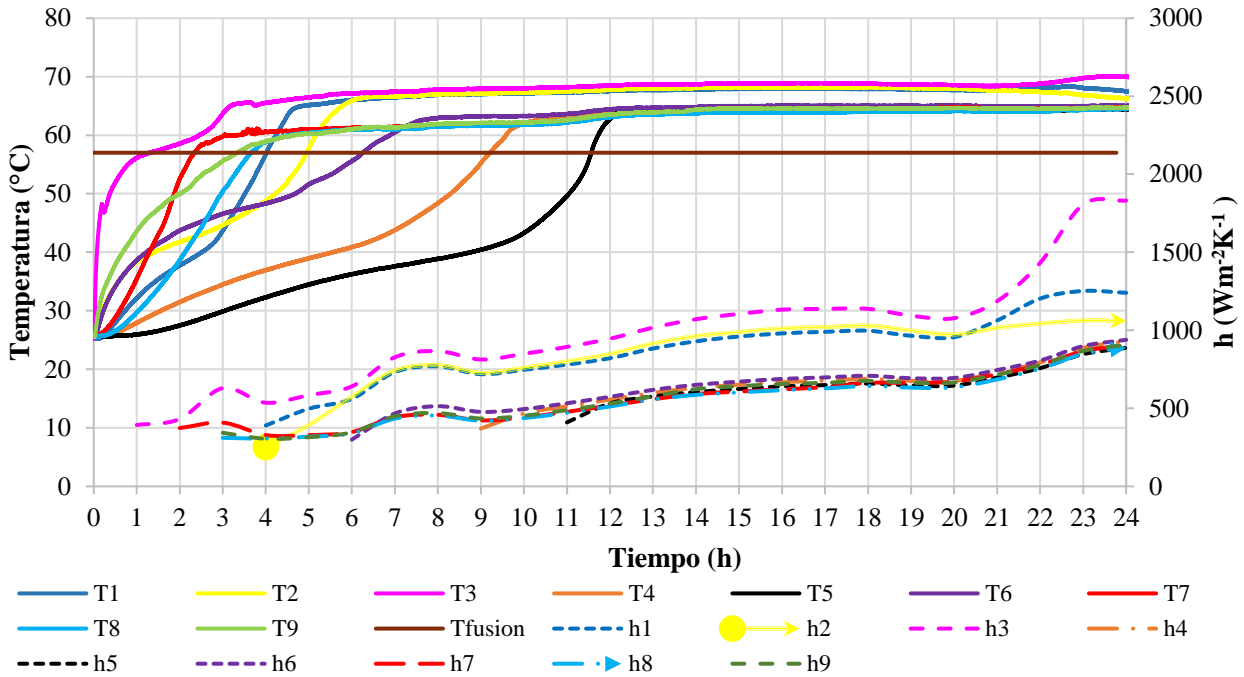
Con respecto a la estabilidad a bajas temperaturas ( $T_{\min}=26^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas), no se observó una tendencia clara en cuanto al material. Ahora bien, el cobre tuvo un buen rendimiento en cuanto a la transferencia de calor en las geometrías cuadrada y tipo U, con coeficientes  $h$  altos en ambos casos. En la configuración tipo L el mejor material fue el acero. No obstante, como se mencionó previamente esta geometría se descartó al presentar valores de coeficiente  $h$  a las 12 horas de prueba para varios puntos de medición. Por consiguiente, se seleccionó el cobre como el mejor material para el proceso de cristalización.

### **4.3 Procesos de fusión y cristalización de la cera de parafina**

#### **4.3.1 Proceso de fusión con geometría serpentín cuadrada de material cobre.**

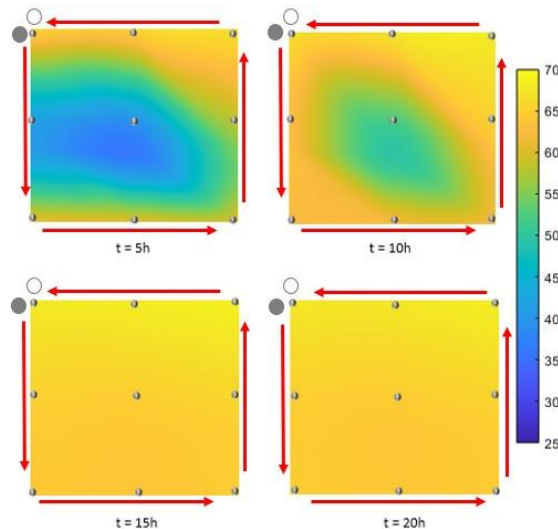
**Figura 9**

Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín completa. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores y el valor del coeficiente  $h$  una vez el sensor alcanzó la temperatura de  $57^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 10**

Distribución de temperatura en el proceso de fusión para geometría cuadrada en  $t=5\text{h}$ ,  $t=10\text{h}$ ,  $t=15\text{h}$  y  $t=20\text{h}$ .



Con respecto a los valores de  $h$ , estos se analizaron por intervalos de tiempo, correspondientes a la hora 0 a la 12 y de la hora 12 a la 24. En el primer tramo de tiempo, se evidenció que  $h_3$  y  $h_7$  presentaron un crecimiento después de las primeras 2 horas. Este incremento se detuvo en la hora 3 ya que las temperaturas se estabilizaron. Sin embargo, se reanudo después la hora 4. Por otro lado, los coeficientes  $h_8$  y  $h_9$  mostraron un aumento en la hora 3, que se vio interrumpido debido a la estabilización de las temperaturas a las 8 horas. En el segundo tramo de tiempo los valores de  $h$  de los sensores mencionados incrementaron. En la hora 4,  $h_1$  y  $h_2$  comenzaron a mostrar un aumento, y en la hora 8 sus temperaturas se estabilizaron. Seguidamente  $h_6$  mostró un crecimiento en la hora 6 y disminuyó en la hora 9, para luego volver a aumentar. En la hora 9,  $h_4$  experimento una subida, seguido por  $h_5$  en la hora 11. De la hora 12 a la 24 los valores del coeficiente  $h$  se mantuvieron por encima de  $800 \text{ W/m}^2\text{K}$  con pequeñas fluctuaciones.

#### **4.3.2 Proceso de cristalización con geometría serpentín cuadrada de material cobre.**

Como se observa en la Figura 11 se presentan valores de coeficiente de transferencia de calor local para los distintos puntos de medición. Como se mencionó previamente los valores de  $h$  para la cristalización se dejaban de calcular una vez los sensores registraban temperaturas menores al punto de cristalización de la parafina ( $53^\circ\text{C}$ ). Los valores presentaron una disminución en la hora 1 que coincidió con una leve estabilización de las temperaturas, luego de crecieron aceleradamente. A diferencia de la estearina de palma, en este caso los valores de  $h$  dejaron de calcularse a las seis horas de prueba exhibiendo una gran capacidad de descarga por parte de la parafina. Sin embargo, es preciso destacar que al inicio de la prueba la cera registró temperaturas entre los  $60\text{-}65^\circ\text{C}$ , mientras que la estearina presentaba valores entre los  $70\text{-}75^\circ\text{C}$ . Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando que durante la cristalización el material solido forma una barrera



### 4.3.3 Comparación del desempeño como PCM de estearina de palma con cera de parafina por medio del coeficiente de transferencia de calor (h).

La Tabla 6 registra la comparación entre los tiempos en los que los materiales de cambio de fase evaluados alcanzaron su respectiva  $T_F$  con la misma geometría. Para este parámetro, los resultados fueron iguales en cinco sensores.

**Tabla 6**

*Comparación de los tiempos de fusión para la estearina de palma hidrogenada (48°C) y la parafina (57°C)*

		<b>Tiempo en el que los sensores alcanzaron la <math>T_F</math> de su respectivo PCM (h)</b>								
<b>PCM</b>	<b>Geometría</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>	<b>S5</b>	<b>S6</b>	<b>S7</b>	<b>S8</b>	<b>S9</b>
Estearina	Cuadrada	4	9	5	4	13	6	2	3	2
Parafina	Cuadrada	4	4	1	9	11	6	2	3	3

En la Tabla 7 se exponen los valores del número de sensores fundidos a las 12 horas de prueba, número de sensores estables con temperatura máxima a las 24 horas de prueba y los rangos de coeficiente h a las 24 horas. Se puede observar que, a la Cera de Parafina a las 12 horas, registraba a todos los sensores por encima de su temperatura de fusión, en contraste con la Estearina de Palma Hidrogenada que solo presentaba ocho sensores fundidos. Una vez transcurridas las 24 horas de prueba los nueve sensores de ambos PCMs marcaban una temperatura mayor a la temperatura máxima (60°C). Con respecto a los valores de los coeficientes h, el rango de la cera de parafina fue un 47.27% más amplio que el rango de la estearina de palma, en términos de diferencia entre sus valores mínimos y máximos. No obstante, el calor transferido al PCM en la parafina fue un 61% menor con respecto al de la estearina de palma hidrogenada.

La cera de parafina presentó una mayor fusión con respecto a la estearina, a pesar de tener un punto de fusión mayor (57°C). Sin embargo, la estearina de palma logró obtener valores altos

de h y fundir todos los sensores en el mismo intervalo de tiempo siendo un residuo industrial renovable en comparación a la parafina de origen petroquímico

**Tabla 7**

*Proceso de fusión de estearina de palma hidrogenada y cera de parafina en geometría serpentín cuadrada de material cobre*

Geometría serpentín cuadrada cobre				
PCM	No. de Sensores con PCM fundido (12h)	No. de Sensores estables con T <sub>max</sub> =60°C (24h)	Rangos coeficientes h (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ) (24h)	Q <sub>total</sub> transferido al PCM (kJ)
Estearina de palma	8	9	1006-1647	42496
Cera de parafina	9	9	887-1831	16480

**Tabla 8**

*Comparación de los tiempos en los que la estearina (43°C) y la parafina (53°C) alcanzaron la temperatura de cristalización.*

Tiempo en el que los sensores alcanzaron una temperatura menor a la T <sub>c</sub> de su respectivo PCM (h)										
PCM	Geometría	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Estearina	Cuadrada	7	10	2	11	15	7	7	10	4
Parafina	Cuadrada	2	2	2	2	6	4	1	3	2

**Tabla 9**

*Comparación del proceso de cristalización de estearina de palma hidrogenada y cera de parafina en geometría de serpentín cuadrado y tubería de cobre.*

Geometría serpentín cuadrada cobre						
Tipo de PCM	No de sensores con PCM cristalizado (6h)	Rangos coeficiente h (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ) (0h-6h)	No de sensores con PCM cristalizado (12h)	Rangos coeficiente h (Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ) (6h-12h)	No de sensores estables con T <sub>min</sub> =26°C (24h)	Q <sub>total</sub> cedido del PCM (kJ)
Estearina de palma	2	23-70	8	128-164	6	5708
Parafina	8	7.5-64	9	-	4	5770

En la Tabla 9 se exponen los valores del número de sensores cristalizados a las 6 y 12 horas de prueba, los rangos de coeficiente h de la 0-6 horas y de las 6-12 horas y numero de sensores

estables con temperatura mínima a las 24 horas de prueba. En la hora 6 de las pruebas la parafina presentaba ocho de nueve sensores cristalizados, en contraste con la estearina que solo tuvo 2. En el intervalo de las 0 a las 6 horas, el rango de los coeficientes  $h$  de la cera de parafina fue un 41.49% más amplio que el de la estearina. A la hora 12, la cera de parafina contaba con todos los sensores cristalizados, mientras que la estearina presentaba ocho de nueve. Es preciso tener en cuenta que la estearina de palma tiene un punto de cristalización de  $43^{\circ}\text{C}$ , diez grados más bajo que el de la cera de parafina ( $53^{\circ}\text{C}$ ). Por lo tanto, se puede afirmar que la estearina tuvo un buen rendimiento con respecto al número de sensores cristalizados, ya que evidenció resultados muy similares a la parafina en un intervalo de doce horas. Con respecto a los rangos de  $h$  en el rango de tiempo de 6 a 12 horas, la parafina no registró ningún valor de  $h$  debido a que todos los sensores ya estaban por debajo de la temperatura de cristalización. A pesar del buen rendimiento de la parafina, al finalizar la prueba solo 4 sensores alcanzaron la temperatura mínima ( $26^{\circ}\text{C}$ ), en contraste con la estearina que registro 6.

## 5 Conclusiones

La geometría cuadrada presentó la mayor velocidad de transferencia de calor en el proceso tanto para serpentín en cobre y en acero inoxidable, representado en apariciones tempranas y valores altos del coeficiente de convección natural. Esto muestra la importancia de garantizar una rápida fusión de la parte superior del PCM con el fin de permitir el movimiento natural provocado por las diferencias verticales de temperatura.

Cuando se empleó la geometría en forma de U, esta almacenó solo un 13% menos de calor en comparación a la cuadrada. Esto muestra que es posible alcanzar valores similares de velocidades de transferencia de calor, empleando hasta un 25% menos de material en el serpentín,

lo cual representa un ahorro en los costos de construcción. Ahora bien, la geometría en forma de U, tanto en acero inoxidable como en cobre, presentó valores del coeficiente de transferencia de calor que fueron solo un 24.93% menores que cuando se empleó la geometría cuadrada. Respecto a la geometría tipo L, se presentan valores altos de  $h$  únicamente en las últimas ventanas de tiempo, y a pesar de ahorrar más material almacena un 43% menos de calor que la cuadrada.

Al comparar el uso de cobre con el uso de acero inoxidable en el serpentín, aunque el primero obtuvo un mejor desempeño, el uso de acero inoxidable permitió alcanzar velocidades de transferencia de calor similares tanto durante la fusión como la cristalización. Este resultado es importante al considerar que el costo unitario de la tubería en acero inoxidable es hasta 3 veces menor que el costo de la tubería en cobre.

La estearina de palma hidrogenada tiene potencial como PCM, a pesar de que su proceso de fusión no es tan rápido como el de la parafina, este residuo industrial tiene la capacidad de almacenar un 61% más de calor que la parafina, además de registrar valores de  $h$  elevados y reportar casi el mismo número de sensores con PCM fundido que la parafina, que es de origen petroquímico. En cuanto a la cristalización, se observa una gran rapidez por parte de la parafina al inicio de las experimentaciones, pero eventualmente ambos PCM muestran tasas eficientes de cristalización en el mismo intervalo de tiempo.

### Referencia Bibliográficas

Adebayo, T. S., & Kirikkaleli, D. (2021). Impact of renewable energy consumption, globalization, and technological innovation on environmental degradation in Japan: application of wavelet tools. *Environment, Development and Sustainability*, 23(11). <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01322-2>

Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Zeynali Famileh, I., Calautit, J. K., Hughes, B. R., & Zaki, S. A. (2016). A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1470–1497. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.03.036>

Ali, S., & Deshmukh, S. P. (2019). An overview: Applications of thermal energy storage using phase change materials. *Materials Today: Proceedings*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.247>

Amoo, L. M. (2020). On a selection of the applications of thermodynamics. *Applications of Heat, Mass and Fluid Boundary Layers*, 383–412. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817949-9.00021-9>

Anish, R., Mariappan, V., Suresh, S., Joybari, M. M., & Abdulateef, A. M. (2021). Experimental investigation on the energy storage/discharge performance of xylitol in a compact spiral coil heat exchanger. *International Journal of Thermal Sciences*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106633>

Castell, A., Belusko, M., Bruno, F., & Cabeza, L. F. (2011). Maximisation of heat transfer in a coil in tank PCM cold storage system. *Applied Energy*, 88(11).  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.046>

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2015). Heat and mass transfer : fundamentals & applications / Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar. In *Heat and mass transfer :*

Chaanaoui, M., Ettahi, K., Abderafi, S., Vaudreuil, S., & Bounahmidi, T. (2020). Comparative analysis between optimum configurations of finned tube heat exchanger: Application for solar drying. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22.  
<https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100750>

Chinome Chinome, A. G., & Sánchez Sepúlveda, M. A. (2022). *Evaluación del potencial de la estearina de palma hidrogenada para su uso como material de cambio de fase*. 39–40.  
<https://noesis.uis.edu.co/items/b9519552-c443-43c5-8b0d-d71817a74746>

Dirección de Comunicaciones - Universidad Industrial de Santander. (2022). *Alianza UIS y Universidad de Northumbria de Inglaterra trae grandes beneficios para zonas de alta montaña en Colombia*. <https://uis.edu.co/alianza-uis-y-universidad-de-northumbria-de-inglaterra-trae-grandes-beneficios-para-zonas-de-alta-montana-en-colombia/>

dos Santos, F. S., Ismail, K. A. R., Lino, F. A. M., Arabkoohsar, A., & Lago, T. G. S. (2020). Parametric investigation of the enhancing effects of finned tubes on the solidification of PCM. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119485>

Han, G. S., Ding, H. S., Huang, Y., Tong, L. G., & Ding, Y. L. (2017). A comparative study on the performances of different shell-and-tube type latent heat thermal energy storage units including the effects of natural convection. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 88, 228–235. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2017.09.009>

Hasan, A. (1994). Phase change material energy storage system employing palmitic acid. *Solar Energy*, 52(2). [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90064-7)

Klein, S., Weber, S., & Theisen, W. (2015). Effect of heat treatment on phase structure and thermal conductivity of a copper-infiltrated steel. *Journal of Materials Science*, 50(10). <https://doi.org/10.1007/s10853-015-8919-y>

Kumar, N., Gupta, S. K., & Sharma, V. K. (2021). Application of phase change material for thermal energy storage: An overview of recent advances. *Materials Today: Proceedings*, 44, 368–375. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.09.745>

Liu, Y., Zheng, J., Deng, Y., Wu, F., & Wang, H. (2021). Effect of functional modification of porous medium on phase change behavior and heat storage characteristics of form-stable composite phase change materials: A critical review. In *Journal of Energy Storage* (Vol. 44). <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103637>

Lizcano-González, V. A., Kafarov, V., Mahkamov, K., Arciniegas, C., & Socha Rojas, M. P. (2023). *CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS Potential Application of Renewable Eutectic Mixtures as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage*. Potential. <https://doi.org/10.3303/CES2399066>

Mahdi, M. S., Hasan, A. F., Mahood, H. B., Campbell, A. N., Khadom, A. A., Karim, A. M. em A., & Sharif, A. O. (2019). Numerical study and experimental validation of the effects of orientation and configuration on melting in a latent heat thermal storage unit. *Journal of Energy Storage*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.04.013>

Mahdi, M. S., Mahood, H. B., Campbell, A. N., & Khadom, A. A. (2021). Natural convection improvement of PCM melting in partition latent heat energy storage: Numerical study with experimental validation. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105463>

Mahdi, M. S., Mahood, H. B., Khadom, A. A., & Campbell, A. N. (2021). Numerical simulations and experimental verification of the thermal performance of phase change materials in a tube-bundle latent heat thermal energy storage system. *Applied Thermal Engineering*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117079>

Masum, M. F. H., Dwivedi, P., & De La Torre, R. (2021). Assessing economic and environmental feasibility of wood-based electricity generation in South America: A case study from Colombia. *Forest Policy and Economics*, 124, 102381. <https://doi.org/10.1016/J.FORPOL.2020.102381>

Mofijur, M., Mahlia, T. M. I., Silitonga, A. S., Ong, H. C., Silakhori, M., Hasan, M. H., Putra, N., & Ashrafur Rahman, S. M. (2019). Phase change materials (PCM) for solar energy usages and storage: An overview. In *Energies* (Vol. 12, Issue 16). <https://doi.org/10.3390/en12163167>

Mohammad, S. S., Iqbal, S. J., & Lone, R. A. (2022). Improved Utilization of Solar Energy Using Estimated Optimal Tilt Factor and Trackers. *Energy Reports*, 8, 175–183. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2022.10.392>

Momeni, M., & Fartaj, A. (2023). Numerical thermal performance analysis of a PCM-to-air and liquid heat exchanger implementing latent heat thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 58, 106363. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2022.106363>

Pakalka, S., Valančius, K., & Streckienė, G. (2021). Experimental and theoretical investigation of the natural convection heat transfer coefficient in phase change material (Pcm) based fin-and-tube heat exchanger. *Energies*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/en14030716>

Raul, A. K., Bhavsar, P., & Saha, S. K. (2018). Experimental study on discharging performance of vertical multitube shell and tube latent heat thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.09.022>

Salyan, S., B, P., Singh, H., Suresh, S., & Reddy, A. S. (2020). Liquid Metal Gallium in Metal Inserts for Solar Thermal Energy Storage: A Novel Heat Transfer Enhancement Technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.110365>

Sciacovelli, A., Colella, F., & Verda, V. (2013). Melting of PCM in a thermal energy storage unit: Numerical investigation and effect of nanoparticle enhancement. *International Journal of Energy Research*, 37(13), 1610–1623. <https://doi.org/10.1002/er.2974>

Seddegh, S., Wang, X., & Henderson, A. D. (2016a). A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change

materials. *Applied Thermal Engineering*, 93, 348–358.

<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.09.107>

Seddegh, S., Wang, X., & Henderson, A. D. (2016b). A comparative study of thermal behaviour of a horizontal and vertical shell-and-tube energy storage using phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 93, 348–358.

<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2015.09.107>

Shen, R., Liu, L., Cao, Y., Zhang, L., Sheng, X., & Chen, Y. (2022). Biomass modified boron nitride/polyimide hybrid aerogel supported phase change composites with superior energy storage capacity and improved flame retardancy for solar-thermal energy storage. *Solar Energy*, 242, 287–297. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2022.07.036>

Youssef, W., Ge, Y. T., & Tassou, S. A. (2018). CFD modelling development and experimental validation of a phase change material (PCM) heat exchanger with spiral-wired tubes. *Energy Conversion and Management*, 157.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.036>

Zapata, S., Castaneda, M., Aristizabal, A. J., & Dyner, I. (2022). Renewables for supporting supply adequacy in Colombia. *Energy*, 239, 122157.

<https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122157>

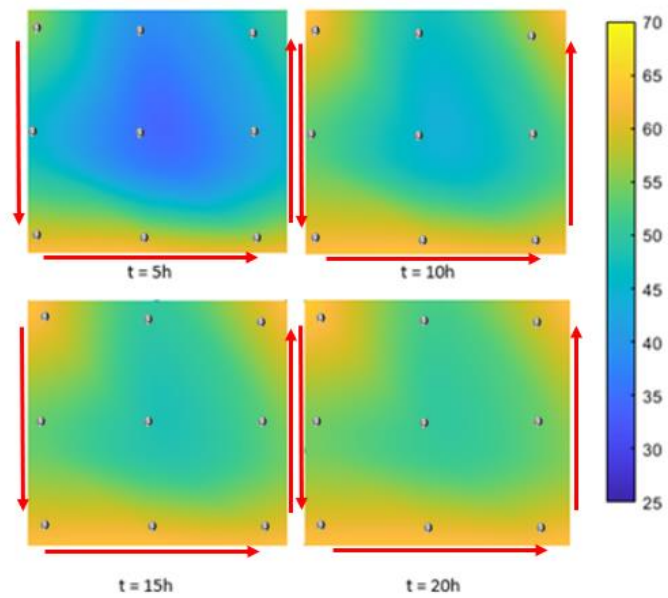
Zhao, Q., Yu, P., Mahendran, R., Huang, W., Gao, Y., Yang, Z., Ye, T., Wen, B., Wu, Y., Li, S., & Guo, Y. (2022). Global climate change and human health: Pathways and possible solutions. *Eco-Environment & Health*, 1(2), 53–62.

<https://doi.org/10.1016/J.EEHL.2022.04.00>

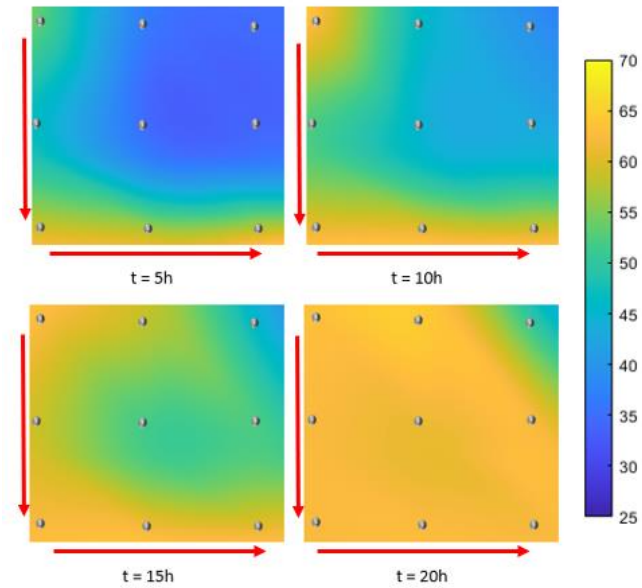
## Apéndices

## Apéndice A

Distribución de temperaturas geometría serpentín U de material cobre para proceso de fusión

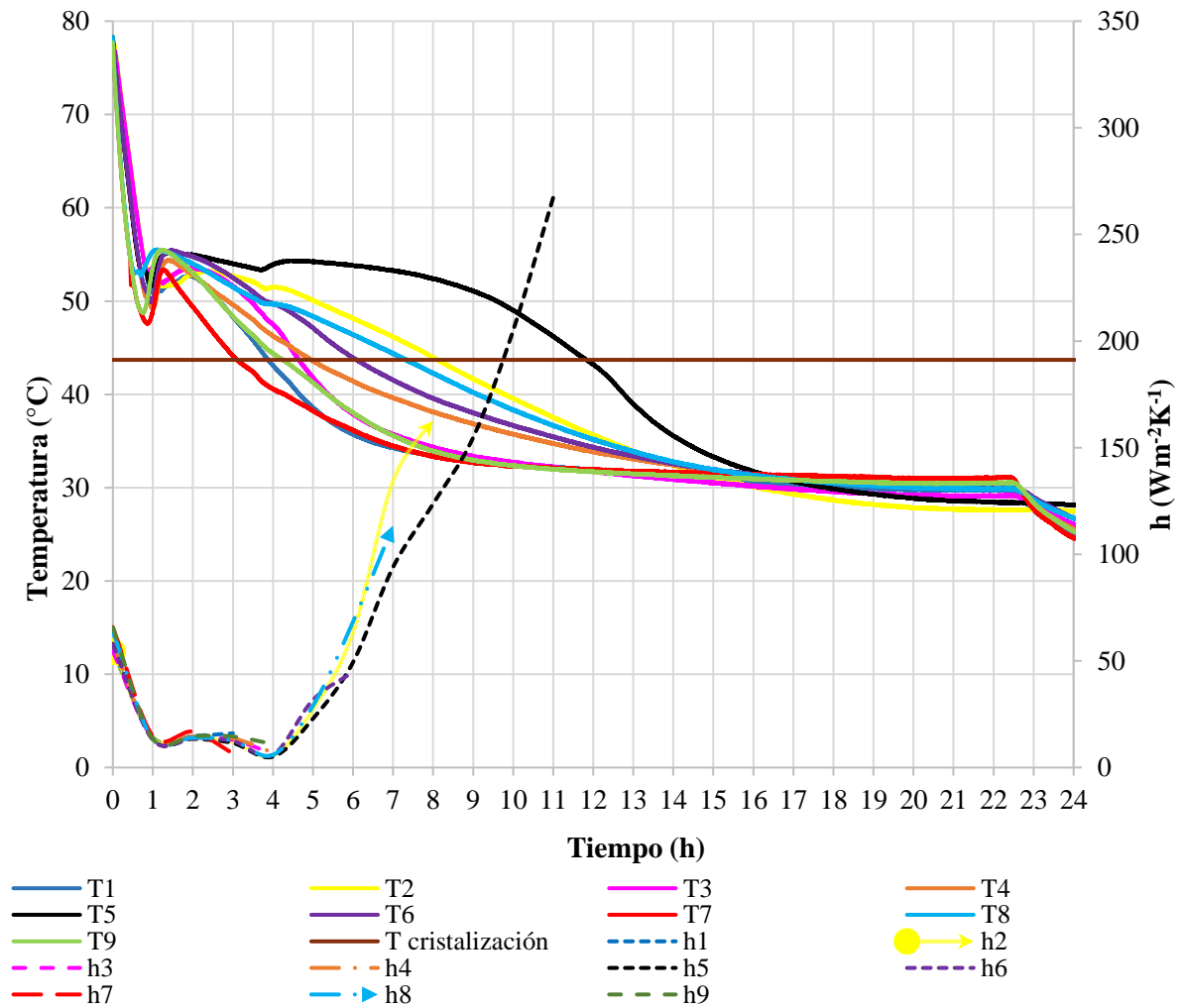


**Distribución de temperaturas geometría serpentín L de material cobre para proceso  
de fusión**

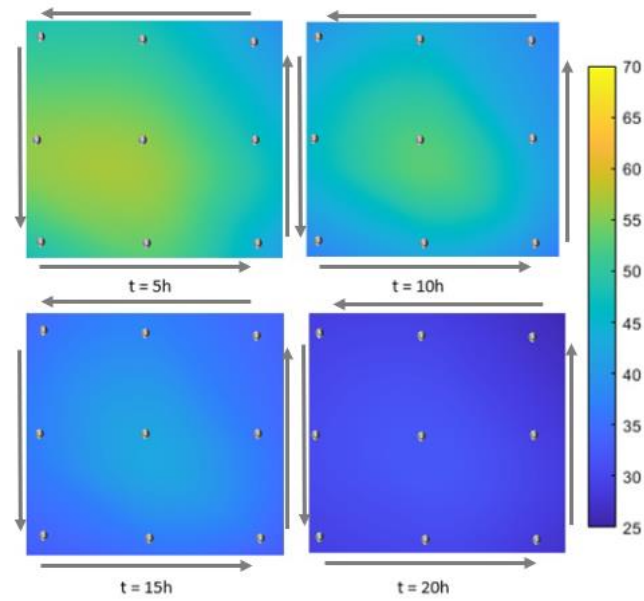




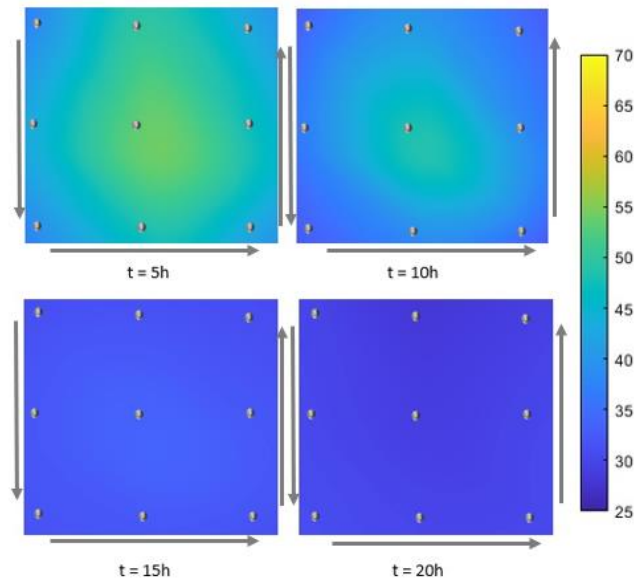
**Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín L de material cobre en proceso de cristalización.**



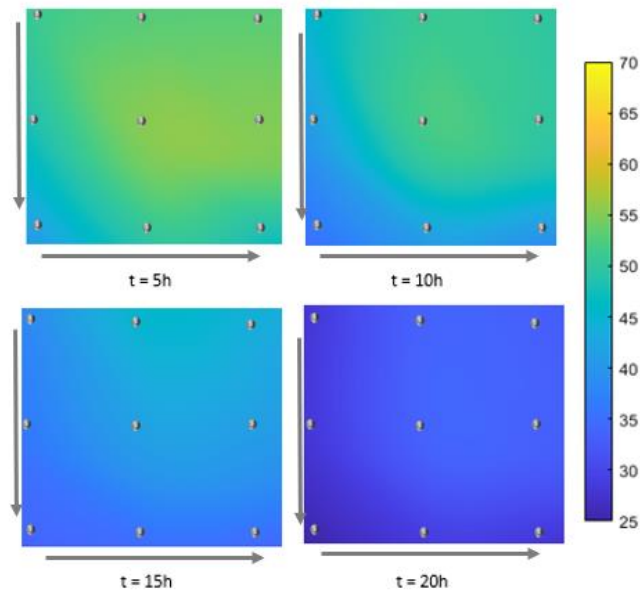
**Distribución temperaturas geometría cuadrada de cobre con estearina de palma en proceso  
de cristalización**



**Distribución temperaturas geometría U de cobre con estearina de palma en proceso de cristalización**

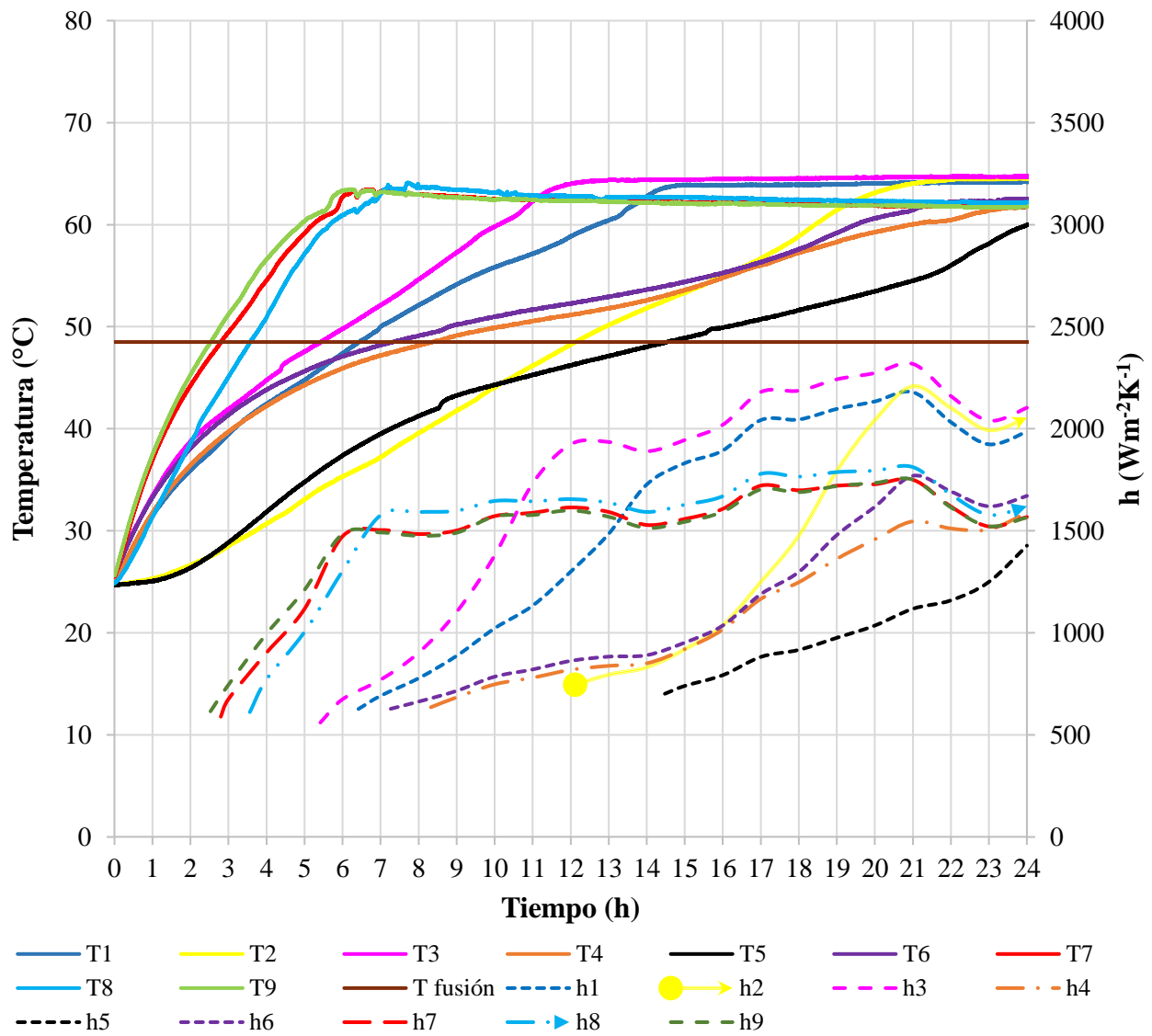


**Distribución temperaturas geometría cuadrada de cobre con parafina en proceso de cristalización**





**Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín U de material acero en proceso de fusión**



**Variación de temperatura y coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín L de material acero en proceso de fusión.**

