

Estudio del proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada en sistemas carcasa serpentín  
con adición de matrices de soporte

Juan Sebastián Suarez Ríos y María Luisa Prada Quiñones  
Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Química

Director

Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov

Codirector

Ing M.Sc Víctor Alexis Lizcano González

Universidad Industrial de Santander  
Facultar de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

La finalización de esta etapa de mi vida y esta meta alcanzada, la dedico por completo a mi familia la cual siempre me apoyo y me guio con las palabras y los abrazos correctos, gracias por no dejar de creer en mí, por toda su confianza y orgullo el cual nunca olvidare, por cada una de las grandes y pequeñas nimiedades que me han enseñado las cuales me han convertido en el ser humano que soy y que ha logrado este mérito.

A mis amigos y compañeros de vida, por apoyarme siempre en mis emprendimientos y locuras, por creer en mí, por escucharme y guiarme, por siempre estar presentes cuando más necesite ese oído y mano amiga, gracias por dar de más y ser más para conmigo y mis sueños.

***Juan Sebastián Suarez Ríos.***

### **Dedicatoria**

Con humildad y gratitud dedico este proyecto a Dios, fuente de toda sabiduría y guía en cada paso de mi camino. A ti, que has sido mi fuerza en los momentos de incertidumbre y mi luz en los momentos de oscuridad. Gracias por ser mi roca y por sostenerme en cada desafío. Este logro es tuyo tanto como mío.

A mis padres, quienes han sido mis pilares inquebrantables desde el primer día. Su dedicación, sacrificio y amor incondicional han sido el motor que me impulsó a alcanzar mis sueños. Sin sus palabras de aliento, no habría podido llegar hasta aquí.

A mis queridos hermanos, compañeros de vida y cómplices en esta aventura. Su presencia ha sido un bálsamo en los momentos difíciles y una fuente de alegría en los momentos felices. Gracias por estar siempre a mi lado, por creer en mí y por ser mi familia en el verdadero sentido de la palabra.

Finalmente, a mis amigos, con quienes he compartido risas, lágrimas y largas horas de estudio. Su compañía ha sido un regalo invaluable en este viaje universitario. A través de nuestras conversaciones, debates y momentos de distracción, encontré inspiración y motivación para seguir adelante.

Que este logro sea un testimonio de nuestro amor, unidad y perseverancia. Que Dios bendiga a cada uno y que juntos sigamos celebrando los triunfos que la vida nos regala.

*María Luisa Prada Quiñones.*

### **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestra profunda gratitud a Dios por iluminar nuestro camino en cada etapa de nuestra trayectoria y por unir nuestros destinos para emprender este proyecto.

Agradecemos a nuestros seres queridos por su constante apoyo y aliento que nos han brindado fuerza en los momentos más desafiantes. Queremos reconocer especialmente al Dr. Sc. Viatcheslav V. Kafarov y al Ing. M. Sc. Víctor Alexis Lizcano Gonzáles por su invaluable aporte de conocimientos, dirección y respaldo fundamental durante el desarrollo de esta iniciativa. Asimismo, extendemos nuestro reconocimiento a la Universidad Industrial de Santander por abrirnos sus puertas y proveernos de las herramientas necesarias para nuestro crecimiento profesional. También expresamos nuestro agradecimiento a la Escuela de Ingeniería Química y a todos sus miembros por impartirnos saberes y ofrecernos experiencias enriquecedoras, así como al grupo de investigación CIDES por permitirnos llevar a cabo nuestro proyecto de investigación. Por último, queremos expresar nuestro reconocimiento a todas las personas que participaron en este proceso y que fueron piezas fundamentales en su realización.

*Juan Sebastián Suarez R. y María Luisa Prada Q.*

**Tabla de contenido**

<b>Introducción</b> .....	13
<b>1. Objetivos</b> .....	15
1.1. Objetivo general .....	15
1.2. Objetivos específicos .....	15
<b>2. Marco teórico y Estado del arte</b> .....	16
<b>3. Descripción metodológica</b> .....	23
3.1. Equipo y recursos utilizados.....	23
3.1.1. Selección de matrices de soporte.....	23
3.1.2. Equipo.....	24
3.2. Metodología experimental.....	26
3.2.1. Evaluación y análisis del proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada en función de la geometría del serpentín y la cantidad de matriz de soporte aplicada. ....	26
3.3. Elaboración de recomendaciones para la implementación de mejoras en el proceso de fusión empleando matrices de soporte. ....	28
<b>4. Resultados</b> .....	29
4.1. Proceso de fusión de la estearina de palma con adición de matriz de soporte de hierro.....	29
4.2. Proceso de fusión de la estearina de palma con adición de matriz de soporte de cobre.....	33
4.3. Proceso de fusión de la estearina de palma con adición de matriz de soporte de acero inoxidable.....	37
4.4. Comparación de los resultados de las pruebas experimentales para la tubería cuadrada con ambas configuraciones de adición para cada matriz de soporte .....	41
<b>5. Conclusiones</b> .....	44

**Referencias Bibliográficas** ..... 46

**Apéndices** ..... 52

### Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Resumen de pruebas de fusión a realizar. ....	25
<b>Tabla 2.</b> Tiempo en horas en el que los sensores, en ambas geometrías de estudio, alcanzaron la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada con adición de viruta de hierro en todas las variaciones de porcentaje. ....	31
<b>Tabla 3.</b> Tiempo en horas en el que los sensores, en ambas geometrías de estudio, alcanzaron la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada con adición de viruta de cobre en todas las variaciones de porcentaje. ....	36
<b>Tabla 4.</b> Tiempo en horas en el que los sensores, en ambas geometrías de estudio, alcanzaron la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada con adición de viruta de acero inoxidable en todas las variaciones de porcentaje. ....	40
<b>Tabla 5.</b> Registro de las temperaturas de cada sensor en un intervalo de 3 horas para las pruebas de fusión en cada configuración de estudio de tubería de cobre cuadrada con adición de matrices de soporte. ....	41

### Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> Imagen apreciativa de las matrices de soporte utilizadas como adición del proceso de fusión.....	18
<b>Figura 2.</b> Esquema del banco de pruebas de fusión.....	24
<b>Figura 3.</b> Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de hierro al 100%. .....	29
<b>Figura 4.</b> Variación del coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de hierro al 100% .....	30
<b>Figura 5.</b> Representación gráfica del tiempo en horas en el que cada sensor alcanza el punto de fusión de la estearina en cada configuración de estudio con adición de viruta de hierro. ....	32
<b>Figura 6.</b> Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de cobre al 100%. .....	33
<b>Figura 7.</b> Variación del coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de cobre al 100% .....	34
<b>Figura 8.</b> Representación gráfica del tiempo en horas en el que cada sensor alcanza el punto de fusión de la estearina en cada configuración de estudio con adición de viruta de cobre.....	37
<b>Figura 9.</b> Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de Acero inoxidable al 100%.....	37
<b>Figura 10.</b> Variación del coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de acero inoxidable al 100% .....	39

**Figura 11.** Representación gráfica del tiempo en horas en el que cada sensor alcanza el punto de fusión de la estearina en cada configuración de estudio con adición de viruta de acero inoxidable.

..... 40

**Figura 12.** Comparación del tiempo en horas en el que cada sensor alcanza el punto de fusión de la estearina en cada configuración de estudio geometría cuadrada con adición de matrices de soporte..... 42

### Lista de Apéndices

<b>Apéndice A.</b> Aislamiento del banco de pruebas.....	52
<b>Apéndice B.</b> Distribución de temperaturas geometría serpentín cuadrada de material cobre para proceso de fusión con adición de matriz al 100%.....	54
<b>Apéndice C.</b> Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín Cuadrada en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 30%. .....	56
<b>Apéndice D.</b> Variación del coeficiente de calor local (h) en diferentes puntos para geometría de serpentín Cuadrada en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 30% .....	57
<b>Apéndice E.</b> Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín ele en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 100%. .....	59
<b>Apéndice F.</b> Variación del coeficiente de calor local (h) en diferentes puntos para geometría de serpentín ele en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 100%. .....	60
<b>Apéndice G.</b> Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín ele en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 30%. .....	62
<b>Apéndice H.</b> Variación del coeficiente de calor local (h) en diferentes para geometría de serpentín ele en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 30%. .....	63

## Resumen

**Título:** Estudio del proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada en sistemas carcasa serpentín con adición de matrices de soporte

**Autor:** Juan Sebastián Suarez Ríos y María Luisa Prada Quiñones

**Palabras clave:** Material de cambio de fase, matrices de soporte, estearina de palma hidrogenada, transferencia de calor, proceso de fusión, coeficiente de transferencia de calor.

**Descripción:** Una estrategia para mejorar la conductividad térmica de los sistemas de almacenamiento de calor latente (LHTES) implica el uso de materiales de materiales metálicos como matrices de soporte. En este contexto, este estudio se enfocó en evaluar el proceso de fusión de la estearina de palma, como PCM (material de cambio de fase), al adicionar como matriz de soporte virutas metálicas de cobre, hierro y acero inoxidable, para dos geometrías de intercambiador de calor. Los experimentos se realizaron utilizando un banco de pruebas diseñado para evaluar procesos de fusión, con sensores que monitoreaban las temperaturas del fluido caloportador y del PCM. Se evaluaron dos niveles de viruta metálica correspondientes a 100% y 30%, de distribución en el volumen ocupado por el PCM. Las pruebas se realizaron durante 12 horas con un flujo de fluido caloportador de 2 l/min a una temperatura de 75 °C. Los resultados indicaron que el tiempo de fusión se redujo en un 42,81% y 41,27% con la incrustación de virutas de acero inoxidable y cobre respectivamente, en comparación con la prueba de fusión del PCM sin adición de matrices de soporte. Sin embargo, aunque se esperaba que el cobre mostrara un mayor impacto en la conducción de calor, demostrando valores más altos de coeficiente de transferencia de calor (h), al considerar los resultados y el factor costo-beneficio destacó el acero inoxidable.

### Abstract

**Title:** Study of the melting process of hydrogenated palm stearin in serpentine casing systems with the addition of support matrices.

**Author:** Juan Sebastián Suarez Ríos y María Luisa Prada Quiñones

**Keywords:** Phase change material, support matrices, hydrogenated palm stearin, heat transfer, melting process, heat transfer coefficient.

**Description:** A strategy to improve the thermal conductivity of latent heat storage systems (LHTES) involves the use of metallic materials as support matrices. In this context, this study focused on evaluating the melting process of palm stearin, as PCM (phase change material), by adding copper, iron and stainless-steel metallic chips as support matrix, for two heat exchanger geometries. The experiments were carried out using a test bench designed to evaluate melting processes, with sensors monitoring the temperatures of the heat transfer fluid and the PCM. Two levels of metal chips were evaluated, corresponding to 100% and 30% distribution in the volume occupied by the PCM. The tests were carried out for 12 hours with a heat transfer fluid flow rate of 2 l/min at a temperature of 75 °C. The results indicated that the melting time was reduced by 42.81% and 41.27% with the embedding of stainless steel and copper chips, respectively, compared to the PCM melt test without the addition of support matrices. However, although copper was expected to show a greater impact on heat conduction, demonstrating higher heat transfer coefficient (h) values, when considering the results and the cost-benefit factor stainless steel stood out.

## Introducción

La era industrial marco la revolución más importante y rápida que hemos vivido como especie desde que habitamos la tierra, mientras al mismo tiempo y daba paso al enemigo a vencer en el siglo 21, la crisis climática mundial. Las concentraciones de carbono, ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ) han crecido precipitadamente un 47% y 156% respectivamente en los últimos 30 años, marcando al siglo 21 como el más caluroso de la historia humana (Zhao et al., 2022). La OMM ha confirmado que la temperatura media anual del planeta en el año 2023 fue  $1,45 \pm 0,12$  °C superando los niveles preindustriales (1850-1900) (WMO Strategic Communication Office Media Contact, 2024). (Estrategia Colombia Carbono Neutral, 2021), desde el gobierno nacional se ha creado y establecido una política de transición energética, abandonando paulatinamente los combustibles fósiles para dar paso a la energía limpia, generada en hidroeléctricas, campos solares y eólicos (Zapata et al., 2022). La energía solar fue aprovechada mundialmente para producir energía renovable con un 20,6% a nivel mundial en el año 2018 (Idir et al., 2022).

Colombia atraviesa por 2 fenómenos climáticos anualmente, lluvias intensas las cuales son aprovechadas en hidroeléctricas, y periodos de sequía en los cuales las temperaturas suben favoreciendo dispositivos fotovoltaicos, estos fenómenos repercuten en el suministro de energía limpia disponible, lo cual impera la necesidad de implementar sistemas de almacenamiento de energía eficientemente (Mofijur et al., 2019).

Los materiales de cambio de fase (PCM) son ampliamente utilizados en el almacenamiento de calor latente (LSH), mostrando un gran potencial en la mejora del rendimiento de un sistema fotovoltaico (Youssef et al., 2018). Los PCM almacenan energía térmica, a través de la carga y descarga de la misma, implicando que el material cambie de fase sólida a líquida. Desafortunadamente estos por sí mismos no poseen una buena conductividad (Togun et al., 2024).

Es por ello que se usan matrices de soporte para mejorar la baja conductividad térmica que presentan los PCM, estas pueden ser materiales porosos, como esponjas y espumas metálicas, grafito expandido, aerogeles de grafeno, nanotubos de carbono y diferentes minerales porosos (Huang et al., 2019). También es posible utilizar virutas metálicas, que provienen del residuo de procesos metalmecánicos, la forma y tamaño de esta dependen de la herramienta con la que se esté cortando, taladrando o mecanizando dicho material, estas destacan por su facilidad de aplicación y estabilidad (Deshpande et al., 2023).

Se reporto que la configuración geométrica óptima para la conducción de calor, en el banco de estearina, es una geometría cuadrada que recorre la totalidad del perímetro del banco, maximizando el intercambio de calor, en contraposición de una geometría en L que apenas recorre 2/4 de dicho perímetro, proporcionando un intercambio regular y más lento. Con respecto al material del serpentín, su principal parámetro de elección fue la conductividad de este, hallándose que, según disponibilidad y precio, el material más redituable que logra cumplir con estas especificaciones es el cobre, que presenta una conductividad térmica significativamente mayor con respecto a otros materiales como el acero inoxidable.(Aguilera, 2023)

Por consiguiente, esta investigación busca optimizar el proceso de carga y descarga de energía de la estearina de palma hidrogenada con la adición de diferentes virutas metálicas que actúan como matrices de soporte, mejorando la conductividad térmica del PCM en sistemas carcasa serpentín, respondiendo a la pregunta ¿Cómo influye la incrustación de matrices de soporte en el proceso de fusión de estearina de palma hidrogenada cuando se emplean sistemas carcasa serpentín?

## 1. Objetivos

### 1.1. Objetivo general

Estudio del proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada en sistemas carcasa-serpentín con adición de matrices de soporte.

### 1.2. Objetivos específicos

- Seleccionar tres matrices de soporte metálicas de producción nacional con base en características físicas y de mercado.
- Evaluar el proceso de fusión de estearina de palma hidrogenada en sistema carcasa serpentín en función de la geometría del serpentín y del porcentaje de matriz aplicada.
- Establecer un conjunto de recomendaciones para la aplicación de matrices de soporte metálicas de producción local para la mejora del proceso de fusión de estearina de palma hidrogenada empleada como PCM.

## 2. Marco teórico y Estado del arte

La energía térmica se puede almacenar de diversas maneras, en forma de calor sensible, calor latente y/o termoquímico. El almacenamiento de energía térmica sensible es un tipo de TES que se da gracias al cambio de temperatura, durante el proceso de carga y descarga, del material. El calor específico es la medida de calor almacenado en función de la cantidad de la cantidad de material y del cambio de temperatura; por otro lado, el almacenamiento de energía térmica latente se ocupa del cambio de fase sólido a líquido y líquido a gas o viceversa (Pandey et al., 2018). Diversos estudios han demostrado que, de todas las técnicas de almacenamiento de calor térmico, el almacenamiento de energía térmica de calor latente (LHTES) es especialmente atractivo debido a su capacidad para proporcionar una alta densidad de almacenamiento de energía; además de demostrar la característica de almacenar calor a temperaturas constantes relacionadas con la temperatura de transición de fase del material PCM utilizado (Mousavi et al., 2019). Existen gran variedad de materiales funcionales que actúan como PCM, orgánicos e inorgánicos, como la parafina, ácidos grasos, materiales poliméricos y sal e hidratos de sales respectivamente (Kumar et al., 2021).

La funcionalidad de los PCM radica en la regulación de la temperatura, teniendo así la capacidad de almacenar energía térmica en forma de calor latente, energía que será aprovechada en cada cambio de fase del PCM (Umair et al., 2019). Ciertos materiales orgánicos naturales comparten las características anteriormente mencionadas, como lo son la cera de abejas, la estearina de palma y la estearina de palma hidrogenada, destacándose esta última por una temperatura de fusión de 59 °C, la cual posee una mejor estabilidad térmica y capacidad calorífica en comparación con los materiales orgánicos mencionados anteriormente (Lizcano-González et al., 2023). Este material es de fácil acceso comercial, debido a la desarrollada industria de palma de

aceite presente en Colombia. Varios autores concuerdan en que, a pesar de que las PCM orgánicas son considerados como materiales con aplicaciones eficientes y económicas para el almacenamiento de energía en forma de calor latente, presentan propiedades desfavorables como lo son la baja conductividad térmica, poca estabilidad de forma y tendencias a fuga de líquido (Guo et al., 2022; NematpourKeshteli et al., 2022; Pandey et al., 2018). De esta manera, diversas investigaciones se han concentrado en el estudio de diferentes materiales con el fin de mejorar la tasa de transferencia de energía, optimizando el proceso de cambio de fase y el almacenamiento de energía. Los principales materiales de estudio son los porosos, que suponen áreas superficiales altas, baja densidad del material, y la capacidad de variar número de poros y fracción de volumen, lo que permite un abanico significativo de configuraciones del sistema LHS, al emplear estos materiales (Huang et al., 2019). El uso de estos materiales concede a los PCM propiedades de durabilidad, conductividad y estabilidad térmica, alcanzándose en muchos casos una alta afinidad química entre el PCM y el material poroso insertado, lo cual facilita la optimización del sistema presentado (Zhang et al., 2016). Estos materiales se pueden dividir en aditivos como grafito expandido (EG), grafeno y nanotubos de carbono (CNT) o matrices de soporte como espumas metálicas y aletas. El EG es un material inteligente que reacciona conforme a la temperatura, de esta manera se pueden obtener propiedades como gran volumen de poros, una baja densidad, alta conductividad térmica y buen desempeño a altas temperaturas. Tiene como principal desventaja la dificultad de aplicación, requiriéndose en muchos casos un mezclado en condiciones de vacío y con control de temperatura (Lv et al., 2016).

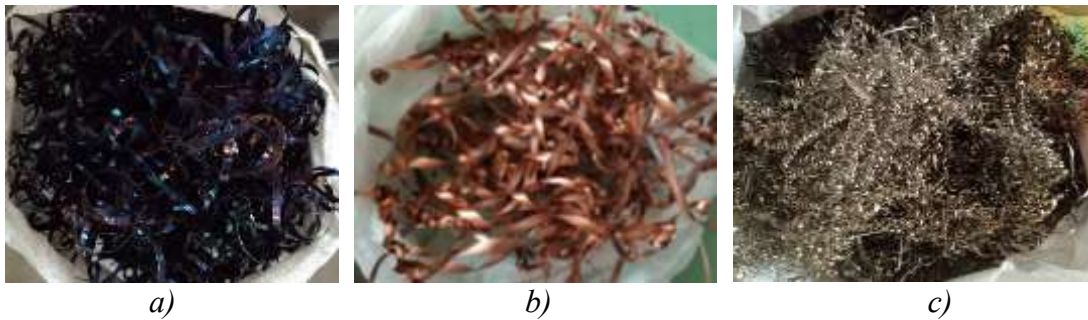
Los CNT representan unos de los materiales con una conductividad térmica extremadamente alta, de  $6600 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  de pared simple, los CNT de pared múltiple llegan a alcanzar conductividades térmicas de hasta  $3000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , excepcionalmente destacado por encima de la

media. Algunos posibilitan hasta un 65% más de conductividad térmica en comparación con el PCM puro (Kim et al., 2001). Sin embargo, su elevado costo imposibilita su aplicación práctica. El grafeno presenta una alta conductividad que oscila entre 3000–5000 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, y una alta superficie específica de 2630 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>, esto debido a su estructura de panal hexagonal de carbono en 2D con enlaces sp<sup>2</sup> (D. Stoller et al., 2008). Su principal limitante para aplicaciones como aditivo para la mejora de la conductividad térmica, sigue siendo su complejidad de producción y alto costo.

Las matrices de soporte se presentan como una gran herramienta, ya que al ser un esqueleto continuo a lo largo de la matriz facilita la transferencia de calor en el PCM, estas conllevan una alta resistencia-densidad, la posibilidad de variar la porosidad y el número de poros; también cuentan con una amplia variedad de materiales tales como espumas de cobre (Xu et al., 2017; Zhang et al., 2017), níquel (Xiao et al., 2013, 2014; Xu et al., 2017), aluminio (Atal et al., 2016; Fleming et al., 2015) y acero inoxidable (Li et al., 2013). Las matrices de soporte como la viruta metálica, que proceden del residuo de las actividades metalmecánicas, las cuales implican toda actividad en la que se corte, taladre o mecanice dicho material. El material de la viruta dependerá del material del cual proceda la misma, siendo los más comunes en el área metropolitana de Bucaramanga, los materiales ferrosos, cúpricos y aceros inoxidables, se debe tener en cuenta que esto depende del tipo y la clase de productos que ofrecen las metaméricas, la conductividad térmica del hierro es 80,4 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, del cobre es 387 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>, del acero inoxidable 15,5 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> (Cortés et al., s/f), su precio es \$500, \$6.000 y \$1.500, por kilogramo respectivamente, el tamaño y largo de cada viruta depende únicamente de la herramienta que se utilizó en su corte.

### **Figura 1**

*Imagen apreciativa de las matrices de soporte utilizadas como adición del proceso de fusión. a) Viruta de hierro b) Viruta de cobre c) Viruta de acero inoxidable.*



Con respecto al diseño del sistema de almacenamiento, se han planteado diferentes configuraciones geométricas para las carcassas que transportaran el fluido caloportador; carcassas esféricas, carcassas rectangulares altas y tubos cilíndricos (Sciacovelli et al., 2013).

Las variantes geométricas más evaluadas son del tipo intercambiador tubo-carcasa con o sin aletas. Por ello con diferentes arreglos de un sistema LHTES de tubo-carcasa, se han evidenciado mejores significativas en el tiempo de fusión del ácido láurico como PCM. En las geometrías que transportan el fluido caloportador, el mecanismo de transferencia de calor más común se da por convección natural, que se lleva a cabo por el movimiento de dicho fluido debido a la diferencia de flotabilidad producidas por diferencias de temperatura en el mismo (Amoo, 2020). También hay evidencia de la influencia de la convección en la fusión del ácido láurico, acelerando el proceso contribuyendo a la reducción del tiempo de fusión hasta en un 70% en configuraciones donde los tubos se ubicaron al inferior de la carcasa (Mahdi et al., 2021). En el estudio el desempeño del ácido palmítico como PCM, con un sistema carcasa serpentín de tubos circulares dispuestos en posición vertical y horizontal, se redujo el tiempo de fusión de forma significativa cuando el tubo que contenía el PCM era ubicado en posición horizontal. Esta reducción en el tiempo de fusión se debe a que en esa orientación el frente de fusión recorre una menor distancia en dirección axial, facilitando con ello la convección natural (Hasan, 1994). En un estudio que analizó el proceso de fusión de la parafina en una unidad de almacenamiento de

calor latente LHTES de carcasa y tubos con aletas, determino que la mejor orientación que favorece de manera significativamente la velocidad de fusión de la parafina es la posición horizontal y con una geometría de tubos sin aletas (Mahdi et al., 2019). Un estudio numérico analizo los efectos de la convección natural en la cera de parafina cuando se varia la temperatura del HTF, logrando identificar que el comportamiento fluidodinámico térmico de la unidad LHTES es influido en gran medida por la convección natural y la temperatura del HTF, concluyendo que al aumentar la temperatura de entrada del fluido caloportador se incrementa el flux de calor, reduciendo así el tiempo de fusión (Sciacovelli et al., 2013).

Ahora bien, un estudio experimental que evaluó el rendimiento térmico de un sistema LHTES con una carcasa multitubular vertical, y como diversos parámetros como lo son la temperatura inicial del PCM, el caudal masico y la temperatura inicial del HTF inciden en el desempeño del proceso de descarga energética en aplicaciones solares a temperatura media de (~200 °C). Evidenciando que la energía liberada y la eficiencia del proceso de descarga se optimizaron al incrementar el caudal masico del fluido caloportador y reduciendo la temperatura de este, y aumentando la temperatura inicial del PCM (Raul et al., 2018). De igual forma se estudió numéricamente un sistema LHTES de tubo-carcasa con geometrías de tubos horizontales y verticales variando las zonas de entrada del HTF y el efecto de estas variables sobre la convección natural, se encontró que al colocar la entrada del fluido caloportador en la zona inferior en un modelo vertical se presentan la mayor tasa de fusión del PCM, debido a la generación de gradiente de temperatura vertical creando fuerzas de flotación que por densidad provocan que el PCM fundido se desplace de zonas inferiores a superiores (Han et al., 2017).

El coeficiente de transferencia de calor local ( $h$ ) se establece mediante la experimentación y varía según la configuración geométrica, las propiedades del fluido y su velocidad. Es usado para evaluar la eficiencia de transferencia de calor en diversos sistemas. Es complicado analizar analíticamente los flujos alrededor de cilindros y esferas debido a la separación del flujo, por lo que es necesario abordar estos casos mediante experimentación o simulación numérica (Cengel & Ghajar, 2019). Se llevó a cabo una evaluación experimental y teórica del coeficiente de transferencia de calor por convección natural ( $h$ ) en un sistema de almacenamiento de calor de tipo tubo-carcasa con aletas. Se observó que, en algunas ubicaciones específicas, las corrientes convectivas en las superficies verticales y horizontales se refuerzan mutuamente, limitando así la formación de corrientes de convección en la dirección vertical (Pakalka et al., 2021).

Solo algunos estudios mencionan la utilización de geometrías carcasa-serpentín. Entre ellos, un trabajo que llevó a cabo una investigación experimental en un sistema de almacenamiento de PCM en frío con un serpentín dispuesto en un tanque. Este estudio evidenció que la inclusión de serpentines en los diseños de unidades de almacenamiento es una estrategia efectiva para facilitar la transferencia de calor en áreas extensas (Castell et al., 2011).

Un artículo reciente, examino las propiedades de transferencia de calor de un modelo de sistema LHTES que empleaba una disposición conformada por una carcasa cilíndrica vertical, un serpentín helicoidal e insertos metálicos (MI) conteniendo galio metálico líquido (Ga). La investigación reveló que tanto la configuración geométrica como la presencia de los insertos metálicos líquidos contribuyeron positivamente a la convección natural del PCM, lo que facilitó procesos ágiles de carga y descarga (Salyan et al., 2020). Se llevó a cabo un estudio experimental para evaluar el desempeño de un sistema de almacenamiento de energía que utilizaba xilitol como material de cambio de fase (PCM), implementando un intercambiador de calor con un serpentín en

espiral. Durante la fusión del PCM, se observó que el PCM en estado líquido, al tener una densidad menor, generaba fuerzas de flotabilidad que inducían convección natural. Entre tanto el proceso de descarga predominaba la conducción como mecanismo de transferencia de calor (Anish et al., 2021). Con lo anterior se concluye que no se han llevado a cabo estudios que involucren un material residual y asequible que se desempeñe como matriz de soporte usando una configuración geométrica de carcasa-serpentin, ya que esta representa un costo menor para su construcción debido a su simplicidad y menor tiempo de ensamblado. Para mejorar el proceso de transferencia de calor en un sistema LHTES, optimizando la convección natural en el PCM.

### **3. Descripción metodológica**

La realización de este proyecto abarcó diversas fases, las cuales comprendieron, la selección de 3 matrices de soporte, mediante la construcción de una base de datos de las empresas metalmecánicas ubicadas en el área metropolitana de Bucaramanga, que conllevó la elección de la empresa Inal S.A, la cual nos proveyó de las mismas y su composición, la conductividad de estas se encontró en reportes de la literatura. Posteriormente se llevaron a cabo pruebas de fusión de la estearina de palma hidrogenada en función de la geometría del serpentín y la cantidad de matriz de soporte aplicada y finalmente se elaboraron recomendaciones para la implementación de mejoras en el proceso de fusión empleando matrices de soporte.

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

##### ***3.1.1. Selección de matrices de soporte***

##### **Actividad 1.1. Construcción de base de datos de empresas metalmecánicas ubicadas en el área metropolitana de Bucaramanga.**

Se consultaron bases de datos de empresas disponibles en la Cámara de comercio de Bucaramanga y herramientas web como LegisComex con el fin de identificar empresas metalmecánicas de la región las cuáles pueden ser fuente de producción de viruta metálica como subproducto de sus actividades. Una vez consultada la base de datos existente se filtraron las empresas que presentaban una mayor facilidad de comunicación y acceso, creando así una base de datos más a fin con objetivo del proyecto. Finalmente se realizaron visitas a la empresa INAL S.A, seleccionada desde la base de datos construida, con el fin de recabar información sobre el tipo y cantidad de material generado.

### **Actividad 1.2. Caracterización de la viruta metálica para uso como matriz de soporte**

La empresa Inal S.A nos proveyó de 3 matrices de soporte (viruta metálica) cada una de las cuales posee una composición de hierro, cobre y acero inoxidable puro, la densidad y conductividad de estas se encontraron en la literatura.

#### **3.1.2. Equipo**

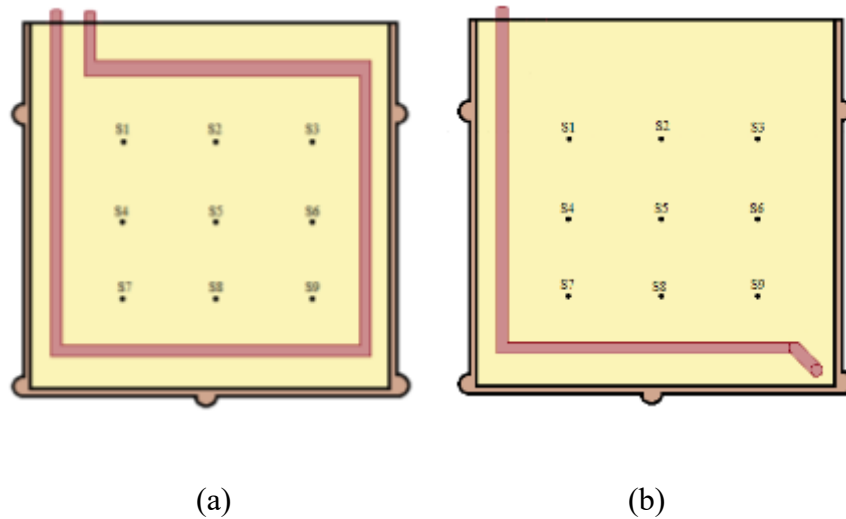
El sistema utilizado en la investigación experimental se compone de un banco de pruebas construido con material acrílico, específicamente diseñado para analizar los procesos de fusión y cristalización. Este banco de pruebas está equipado con un total de nueve sensores tipo DS18B20, dispuestos de manera estratégica para monitorear la temperatura del material de cambio de fase (PCM). Se incorporaron dos sensores adicionales para medir la temperatura del fluido caloportador tanto en la entrada como en la salida del sistema. Para la medición del flujo, se utilizó un medidor de efecto Hall. Con el objetivo de mantener una temperatura constante del fluido caloportador en el rango de 74 a 75 °C durante los procesos de fusión, se implementó un baño térmico con un sistema de recirculación de agua.

Empleando el banco de pruebas de fusión disponible en el grupo de investigación CIDES, ejemplificado en la Figura 2, se realizaron las pruebas de fusión empelando fluido caloportador a un flujo de  $2 \pm 0.5$  L/min a una temperatura de  $75 \text{ °C} \pm 5\text{°C}$ .

En la Figura 2 se muestra la vista exterior del banco de pruebas y las dos geometrías de serpentín utilizadas.

#### **Figura 2.**

*Esquema del banco de pruebas de fusión. a) Geometría cuadrada. b) Geometrías en ele.*



Se realizó una prueba de fusión para cada geometría, variando la cantidad de matriz de soporte empleada. Para cada geometría se identificó con anterioridad (Resultados en proceso de publicación por el grupo CIDES) la zona o zonas de difícil fusión. El volumen de la zona o zonas identificadas como de difícil fusión corresponderá a un 100% de matriz de soporte. En la Tabla 1 se muestra el esquema experimental, con un total de 12 pruebas de fusión por realizar. Cada prueba tendrá una duración de 12 horas.

**Tabla 1.**

*Resumen de pruebas de fusión a realizar.*

Geometría	Variación de la cantidad de Matriz de soporte					
	Matriz de soporte 1 (Hierro)		Matriz de soporte 2 (Cobre)		Matriz de soporte 3 (Acero Inoxidable)	
	Porcentaje	Peso (g)	Porcentaje	Peso (g)	Porcentaje	Peso (g)
Cuadrada	100	175,54	100	75,57	100	146,88
	30	52,66	30	22,85	30	44,06
Ele	100	175,54	100	75,57	100	146,88
	30	52,66	30	22,85	30	44,06

Se aisló al sistema utilizando una capa de poliestireno expandido con un grosor de 0.5 cm, en cada una de las caras frontal, superior, laterales, inferior y posterior. Además, se colocó todo el sistema dentro de una cámara sellada de poliestireno expandido (Apéndice A) para prevenir la circulación de aire y las pérdidas de calor. Primero, se tomaron medidas de cada una de las caras del banco de fusión, esto teniendo en cuenta los nueve sensores de la cara posterior, y el cambio de posición la salida del fluido caloportador con respecto a las geometrías del serpentín. Seguidamente se construyó un aislamiento externo.

Con el aislamiento interno nos aseguramos de que toda la energía que está aportando el fluido caloportador se transfiera al PCM favoreciendo el proceso de convección a lo largo del banco, mientras con el aislamiento externo se elimina cualquier pérdida de calor debida al ambiente.

El sistema de captura y registro de datos se configuró en una placa de desarrollo Arduino Uno (Arduino LLC). Para la visualización y almacenamiento de los datos se empleó un software Node-red (OpenJS Foundation), el cual permitió la grabación de 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 una frecuencia de registro de 3 segundos. El procesamiento y visualización de los datos se llevó a cabo usando un código programado en MATLAB (MathWorks, Inc) y Excel.

## **3.2. Metodología experimental**

### ***3.2.1. Evaluación y análisis del proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada en función de la geometría del serpentín y la cantidad de matriz de soporte aplicada.***

Se llevaron a cabo pruebas de fusión con estearina de palma hidrogenada en las diferentes configuraciones geométricas de tubos de cobre cuadrada y ele. Se utilizó un flujo constante de agua a una velocidad de  $2 \pm 0.5$  L/min como fluido caloportador a una temperatura de 75 °C. El

experimento comenzó con el material de cambio de fase (PCM) a temperatura de entre 20 a 30 °C y se prolongó durante 12 horas. Se utilizó la siguiente fórmula para calcular la transferencia de calor entre el fluido caloportador y el PCM.

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

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. El flujo másico y la capacidad calorífica son dependientes de la temperatura del fluido, 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  $Q$  representa el calor transferido durante el proceso,  $A_{PCM}$  corresponde área de transferencia de calor,  $T_{PCM}$  es la temperatura registrada en cada sensor y  $T_{HX}$  denota el promedio de las temperaturas de entrada y salida del fluido (Pakalka et al., 2021). La determinación de este coeficiente ofreció detalles fundamentales sobre cómo la geometría del sistema impacta en la transferencia de calor, ofreciendo una comprensión crucial de las particularidades del proceso experimental bajo estudio.

Para la evaluación del proceso de fusión se tomaron en cuenta el número de sensores con PCM fundido alrededor de la hora 6 y 12, y la temperatura final en cada punto del equipo al final de la prueba. Se priorizó observar cuales, y cuantos sensores mostraban presencia de PCM en estado líquido a su alrededor a las 6 horas de prueba, es preciso aclarar que el límite de tiempo se fijó teniendo en cuenta que las pruebas tenían una duración de 12 horas y se esperaba que las configuraciones de matrices de soporte ayudaran al sistema a superar los 48°C (temperatura a la que se funde el PCM) en la mitad del tiempo y, por consiguiente, presentaran valores de  $h$ .

Teniendo en cuenta que, en pruebas previas (Resultados en proceso de publicación por el grupo CIDES), se descarta la geometría en forma de L debido a que solo se calcularon valores de h para 5 sensores en la hora 12, se calculó el porcentaje de mejora respecto a los datos reportados al adicionar matrices de soporte a dicha geometría.

### **3.3. Elaboración de recomendaciones para la implementación de mejoras en el proceso de fusión empleando matrices de soporte.**

Se formularon recomendaciones fundamentales que representan un aporte significativo en el proceso de fusión de la estearina de palma. Estas recomendaciones se basaron en un exhaustivo análisis de la literatura especializada y en las experiencias adquiridas durante las pruebas.

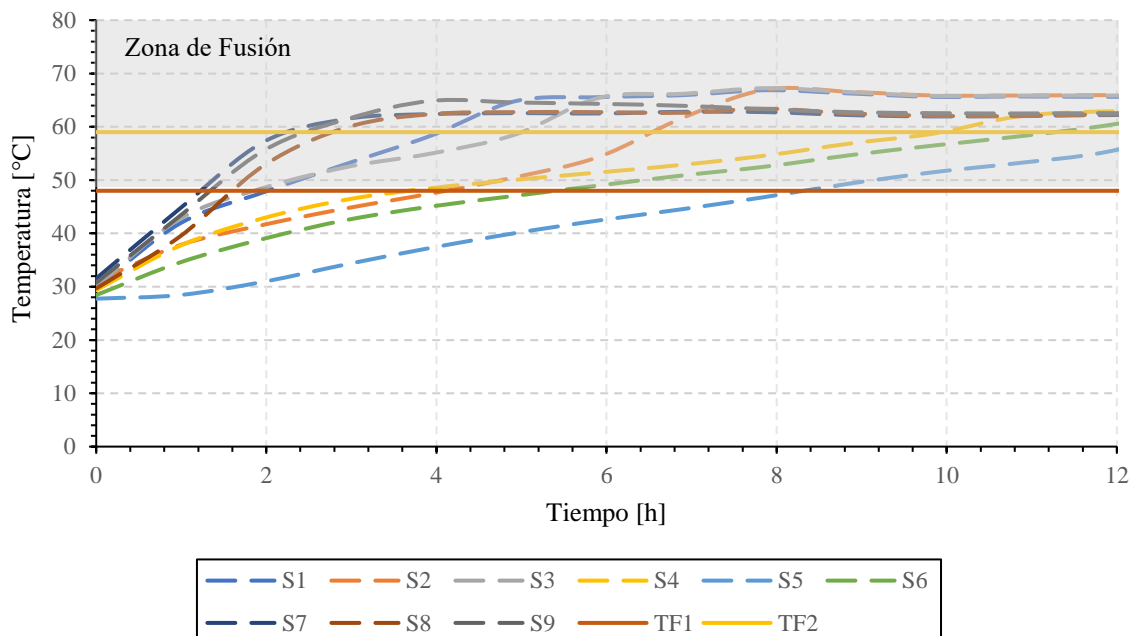
## 4. Resultados

### 4.1. Proceso de fusión de la estearina de palma con adición de matriz de soporte de hierro.

En la Figura 3, se muestran los valores de temperatura y tiempo registrados durante las 12 horas de prueba en los nueve puntos de medición para la geometría cuadrada con adición de viruta de hierro al 100%. Para esta configuración se presentaron valores superiores a TF1 (48°C) desde la primera hora hasta las 8 horas de prueba. La temperatura máxima alcanzada fue de 67,25°C por S3 a las 8h y la temperatura mínima reportada al final de la prueba fue de 55,13°C por S5.

#### Figura 3.

*Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de hierro al 100%. Se presenta la evolución de la temperatura en los nueve sensores.*

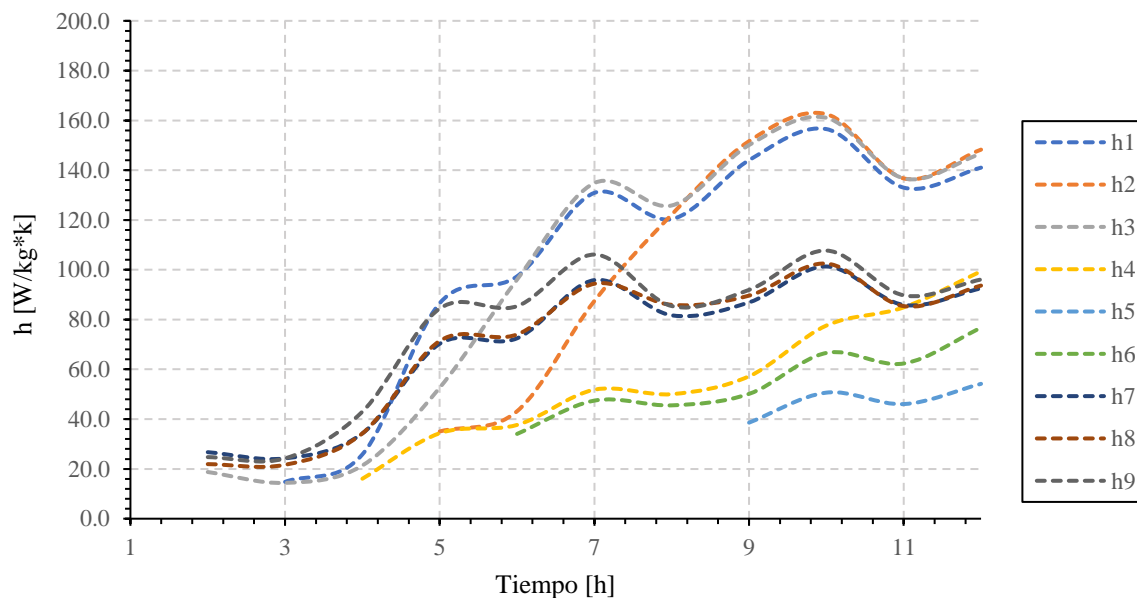


Aunque para las 6 horas de prueba, 8 de los 9 sensores habían alcanzado una temperatura superior a la esperada, la adición de viruta de hierro produjo una reducción del 30,8% en el tiempo

necesario para alcanzar la temperatura de fusión del material en el punto de medición de mayor dificultad para la geometría, S5. Respecto al resto de los resultados obtenidos, y en comparación con las primeras 12 horas de fusión de la estearina de palma sin adición de matriz de soporte, se obtuvo una reducción promedio de entre el 28,14% en el tiempo de fusión. Se tomo en cuenta un estudio experimental (Sun et al., 2016) el cual mostró que el tiempo de fusión se redujo entre un 18,8% y un 50,8%, dependiendo de las condiciones variables de la convección natural para el cambio de fase (de sólido a líquido), por consiguiente, la reducción alcanzada al agregar la matriz de soporte al sistema, en este caso, no muestra valores significativos de tiempo de reducción.

#### Figura 4.

*Variación del coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de hierro al 100%*



En adición lo anterior, 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 y se graficó su tendencia, tal como se muestra en la Figura 4. Se muestran que los

valores de  $h$  en diferentes puntos de medición disminuyen al comienzo del proceso de fusión y, a partir de cierto punto en el tiempo (según la ubicación de la medición), comienzan a aumentar. Es importante señalar que el aumento de  $h$  ocurre una vez que la temperatura supera los  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a las 4 horas de prueba, a diferencia del caso del PCM sin adición de matrices de soporte que ocurre a partir de la décima hora. Esto significa que desde el punto de referencia ( $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), el cambio de fase ocurre en teoría, pero solo está en una etapa temprana (una capa delgada de PCM líquido), por lo que la convección natural tiene poca influencia en el proceso de transferencia de calor, pero la adición de matriz de soporte de hierro ayuda al proceso de transferencia de manera moderada. Una vez que la temperatura supera los  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la convección natural influye más en la transferencia de calor porque el PCM está completamente fundido en el punto de medición y las corrientes convectivas se forman o comienzan a formarse, cosa que junto con el trabajo adicional de la matriz lleva a valores de  $h$  mayores.

La anterior configuración (Tubería de geometría cuadrada con matriz de soporte de hierro al 100%) mostró los datos más relevantes en cuanto a la reducción del tiempo de fusión del PCM. Por consiguiente, los perfiles de tiempo y temperatura de las demás configuraciones de porcentaje de matriz aplicada de material de hierro se mostrarán en los anexos, sin embargo, en la tabla 2 se resumen los datos registrados por dichas configuraciones, permitiendo hacer una comparación del tiempo en horas en el que cada sensor tarda en llegar al punto de referencia ( $48^{\circ}\text{C}$ ), junto con la representación gráfica de dichos datos en la Figura 5.

**Tabla 2.**

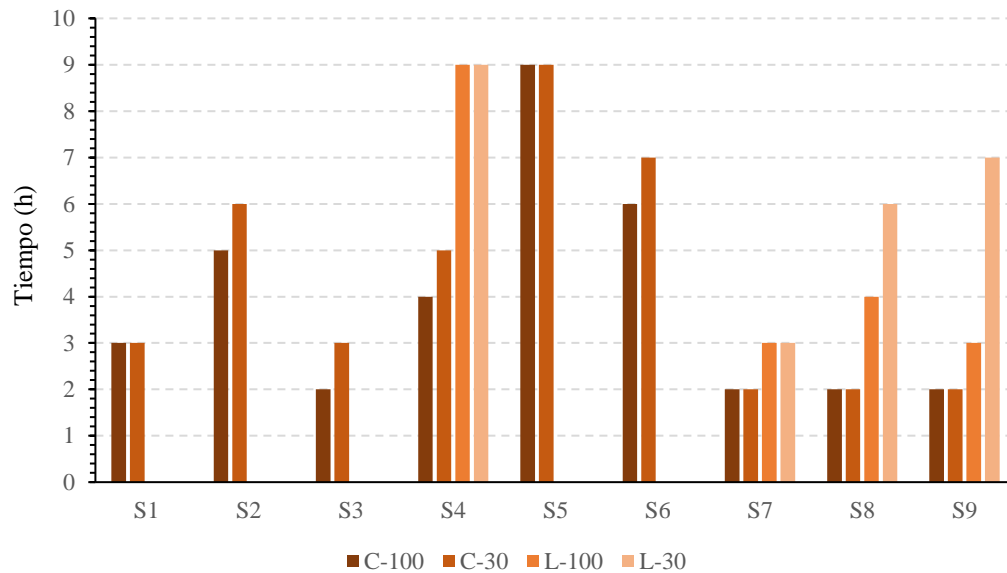
*Tiempo en horas en el que los sensores, en ambas geometrías de estudio, alcanzaron la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada con adición de viruta de hierro en todas las variaciones de porcentaje.*

**Tiempo (h) en el que los sensores alcanzaron una temperatura superior a 48°C implementando Viruta de Hierro**

Geometría	Porcentaje de viruta	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
		Cuadrada	100	3	5	2	4	9	6	2
	30	3	6	3	5	9	7	2	2	2
Geometría "L"	100	-	-	-	9	-	-	3	4	3
	30	-	-	-	9	-	-	3	6	7

**Figura 5.**

*Representación gráfica del tiempo en horas en el que cada sensor alcanza el punto de fusión de la estearina de palma en cada configuración de estudio con adición de viruta de hierro.*



La Figura 5 nos permite visualizar la diferencia en tiempos de fusión del PCM en las diferentes configuraciones, corroborando que los datos más relevantes, con respecto a la reducción de dicho tiempo, corresponden a la configuración de tubería cuadrada con adición de matriz de soporte de hierro al 100%.



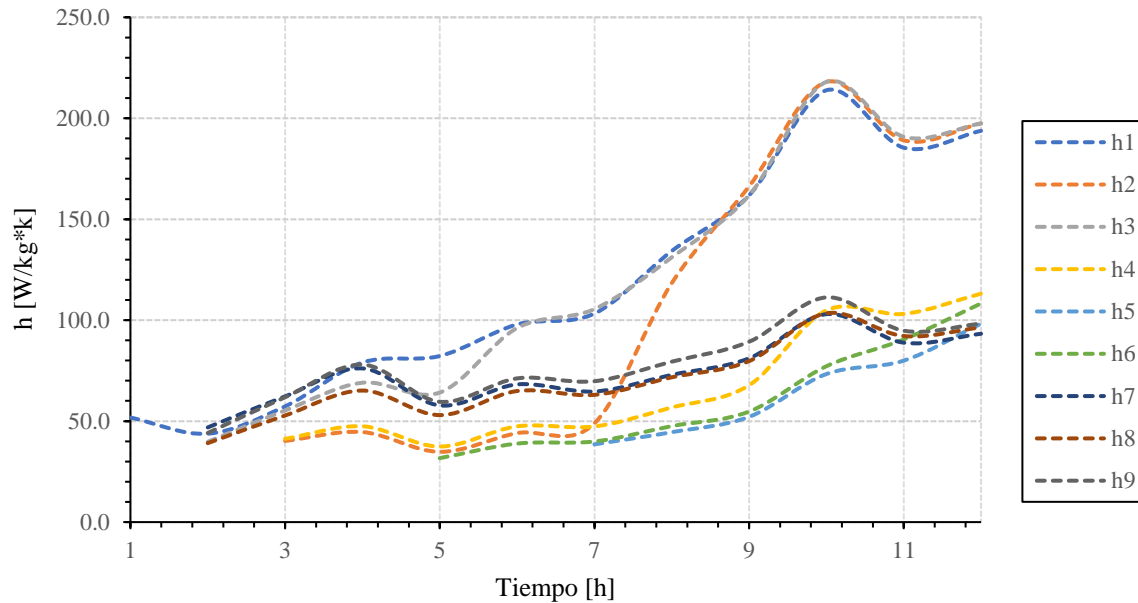
Al utilizar la adición de matrices de soporte de cobre se obtuvo el resultado esperado en cuanto al tiempo estimado que le tomaría a todos los sensores llegar al punto de referencia (48°C); siendo que a la mitad de la prueba, 6 horas, el material se encontraba en la etapa temprana del cambio de fase, caracterizada por la delgada capa de PCM líquido formada alrededor de los sensores, permitiendo que en las horas subsiguientes el material alcanzara la temperatura suficiente para que la convección natural influyera más en la transferencia de calor. La tendencia de aumento de las temperaturas también mostro que la matriz de cobre proporciono más uniformidad de transferencia de calor en los puntos de medición para la geometría utilizada.

Una vez establecidos los perfiles de temperatura de la configuración, se observó que durante la prueba y en comparación con las primeras 12 horas de fusión de la estearina de palma hidrogenada sin adición de matriz de soporte, se obtuvo una reducción de 46,15% del tiempo en el punto de mayor dificultad de transferencia de calor para la geometría, y una reducción promedio de 41,27% en el tiempo de fusión para el resto de los puntos de medición. Teniendo en cuenta el rango de 18,8% y 50,8% de reducción del tiempo de fusión, del estudio (Sun et al., 2016), la adición de matrices de soporte de cobre mostró resultados de mayor interés en la reducción del tiempo de fusión del material de cambio de fase.

Al igual que con las configuraciones de adición de matriz de soporte de hierro, los coeficientes de transferencia de calor por convección (h) se calcularon una vez el sensor registraba una temperatura mayor a 48°C y se graficaron tal como se muestra en la Figura 7.

**Figura 7.**

*Variación del coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de cobre al 100%*



Se observa que los valores de  $h$  en diferentes puntos de medición mantienen una tendencia creciente desde el comienzo del proceso de fusión, destacando el aumento pronunciado en los valores de  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h_3$  a partir de cierto punto en el tiempo. Vale la pena resaltar que la uniformidad en la tendencia durante este proceso de fusión puede relacionarse con la mejora en el sistema de aislamiento con poliestireno expandido que se utilizó para este y las pruebas consiguientes, este se desempeña perfectamente como aislante térmico en el sistema LHTES, no solo contribuyendo a mejorar el proceso de fusión evitando fugas de calor, si no al mismo tiempo optimizando de manera óptima el consumo de energía, ya que debido a que el aislamiento logra mantener una temperatura constante durante el proceso, no es necesaria un exceso de energía para cargar el PCM, reduciendo a lo largo del proceso de fusión la energía necesaria para calentar el fluido caloportador, lo que se traduce en un consumo más óptimo (Dylewski & Adamczyk, 2011); también, presuntamente ayudaría a que los valores promedios obtenidos del coeficiente de transferencia de calor durante el proceso de fusión para la configuración con adición de matrices de cobre en tubería cuadrada

fueron de  $87,02 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , 9% mayor al valor promedio de  $h$  en la configuración de adición de matrices de hierro en tubería cuadrada ( $78,82 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ).

Tal como sucedió en el inciso anterior, esta configuración (Tubería de geometría cuadrada con matriz de soporte de cobre al 100%) contó los datos más relevantes en cuanto a la reducción del tiempo de fusión del PCM. Por consiguiente, se optó por resumir, en la tabla 3, los datos registrados por el resto de las configuraciones de matrices de cobre, aportando una comparación del tiempo en horas en el que cada sensor tarda en llegar al punto de referencia ( $48^\circ\text{C}$ ), junto con la representación gráfica de dichos datos en la Figura 8.

**Tabla 3.**

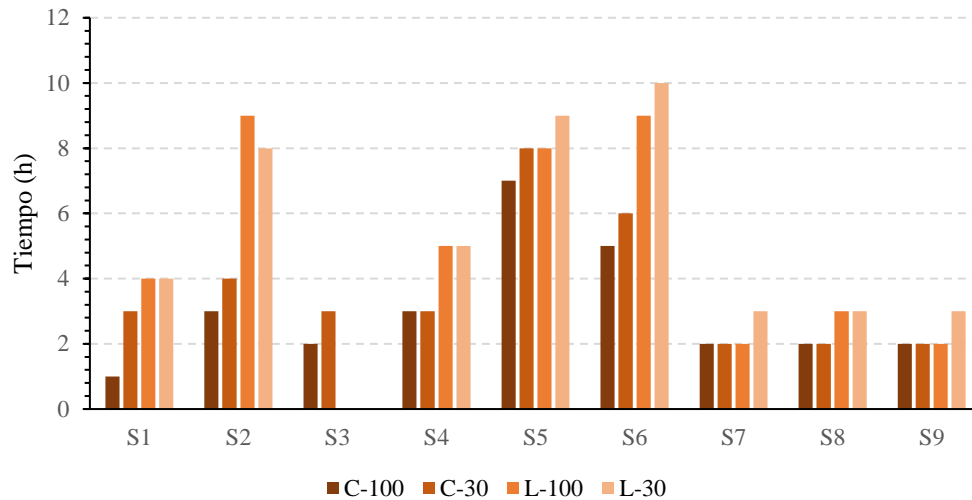
*Tiempo en horas en el que los sensores, en ambas geometrías de estudio, alcanzaron la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada con adición de viruta de cobre en todas las variaciones de porcentaje.*

<b>Tiempo (h) en el que los sensores alcanzaron una temperatura superior a <math>49^\circ\text{C}</math> implementando Viruta de Cobre</b>										
Geometría	Porcentaje de viruta	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Cuadrada	100	1	3	2	3	7	5	2	2	2
	30	3	4	3	3	8	6	2	2	2
Geometría "L"	100	4	9	-	5	8	9	2	3	2
	30	4	8	-	5	9	10	3	3	3

La Figura 8 nos permite observar que los datos más relevantes, con respecto a la reducción de dicho tiempo, corresponden a la configuración de tubería cuadrada con adición de matriz de soporte de cobre al 100% (C-100).

**Figura 8.**

*Representación gráfica del tiempo en horas en el que cada sensor alcanza el punto de fusión de la estearina de palma en cada configuración de estudio con adición de viruta de cobre.*

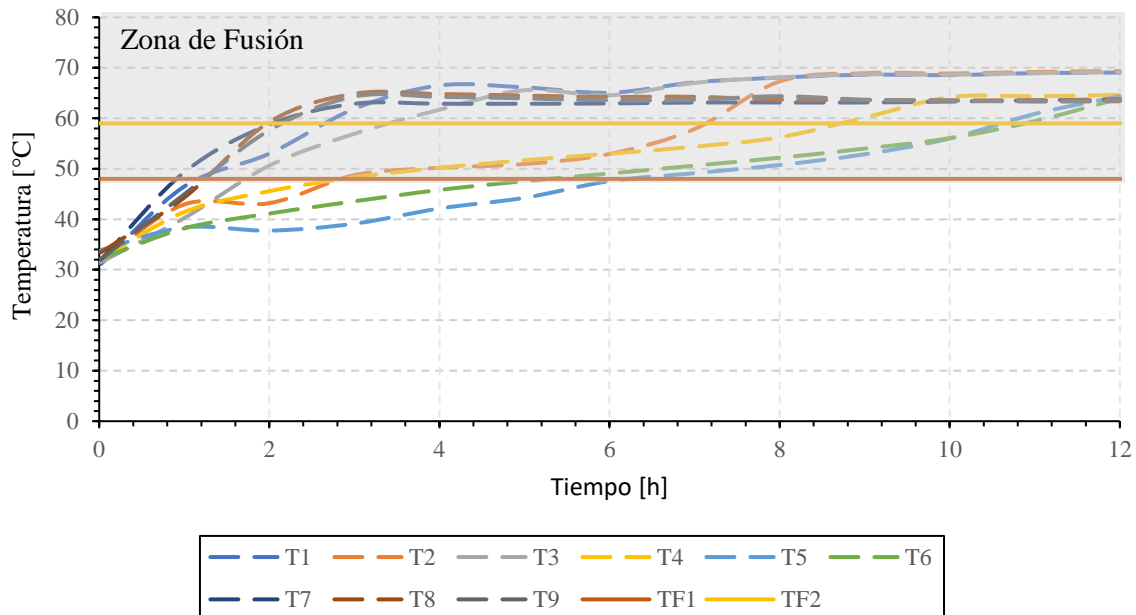


#### **4.3. Proceso de fusión de la estearina de palma con adición de matriz de soporte de acero inoxidable.**

En la Figura 9, se exhiben los datos de temperatura y tiempo recopilados durante las 12 horas de experimentación en los nueve puntos de medición para la configuración de geometría cuadrada con la incorporación del 100% de virutas de acero inoxidable. Durante este período, se observaron valores de temperatura superiores al valor de referencia TF1 desde la primera hora hasta las 8 horas de prueba. La temperatura máxima registrada fue de 69,35°C en el punto S2, mientras que la temperatura mínima al final de la prueba fue de 63,38°C en el punto S9.

**Figura 9.**

*Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de Acero inoxidable al 100%.*



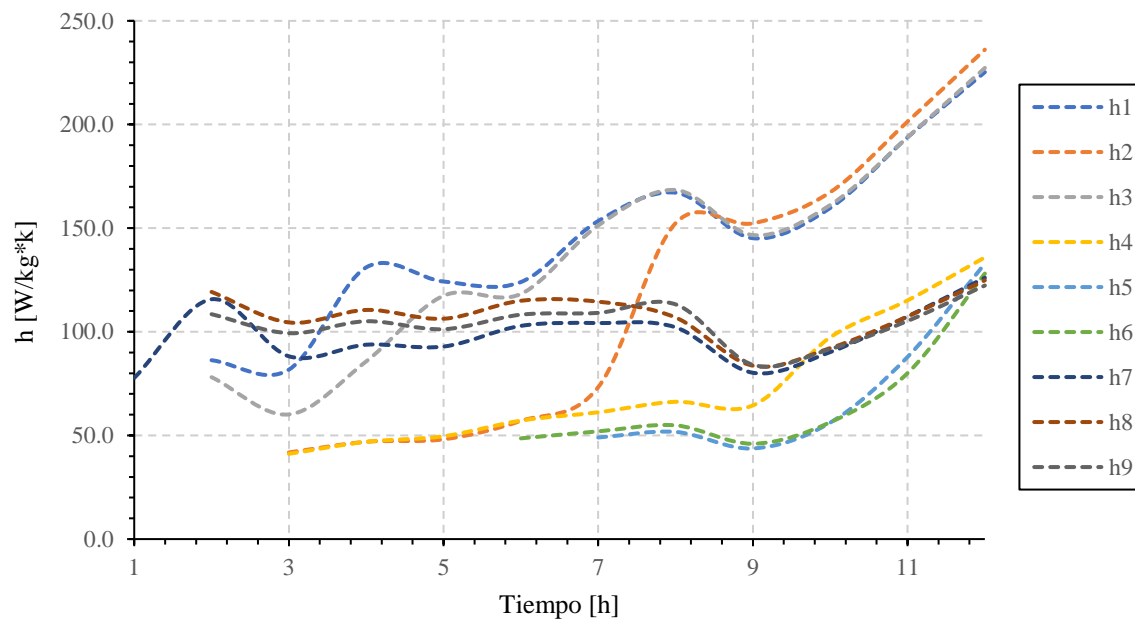
Los perfiles de temperatura obtenidos de esta configuración son muy parecidos a los resultados de la configuración de tubería cuadrada con adición de matrices de soporte de cobre, en términos de tiempos en los que se alcanza el punto de referencia para la fusión del material ambas pruebas alcanzaron la etapa temprana de fusión a la mitad de la prueba (6 horas). Al igual que con las matrices de soporte de cobre, el acero inoxidable proporciona uniformidad en el aumento de las temperaturas en los puntos de medición para la geometría utilizada, manteniendo dicha tendencia al tener configuraciones de porcentaje y tubería diferentes a la cuadrada.

Al implementar matrices de soporte de acero no solo se obtienen perfiles de temperaturas parecidos a los obtenidos con la matriz de cobre, sino que también se obtuvo una reducción de 46,15% del tiempo en el punto de mayor dificultad de transferencia de calor para la geometría (S5), y una reducción promedio de 42,81% en el tiempo de fusión para el resto de los puntos de medición.

Respecto a los valores promedios obtenidos del coeficiente de transferencia de calor durante el proceso de fusión para la configuración con adición de matrices de acero inoxidable en tubería cuadrada, fueron de  $105,78 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , 25,5% mayor al valor promedio de  $h$  en la configuración de adición de matrices de hierro en tubería cuadrada ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ). Sabiendo que el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) es el coeficiente de proporcionalidad entre el flujo de calor y la fuerza impulsora termodinámica para el flujo de calor (la diferencia de temperatura,  $\Delta T$ ) podemos asociar el aumento el valor promedio del coeficiente como una mejora al proceso de transferencia de calor desde el fluido caloportador al material de cambio de fase PCM.

### Figura 10.

*Variación del coeficiente de transferencia de calor local en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín cuadrada con adición de matriz de soporte de acero inoxidable al 100%*



La tendencia mostrada por la Figura 10, nos permite ver los valores de h en diferentes puntos de medición, calculados una vez los puntos de medición designados alcancen el valor de referencia (48°C).

Tal como sucedió en los incisos anteriores, se decidió comparar el resto de las configuraciones para la adición de matrices de acero inoxidable como se puede ver en la Tabla 4, aportando una comparación del tiempo en horas en el que cada sensor tarda en llegar al punto de referencia, junto con la representación gráfica de dichos datos en la Figura 11.

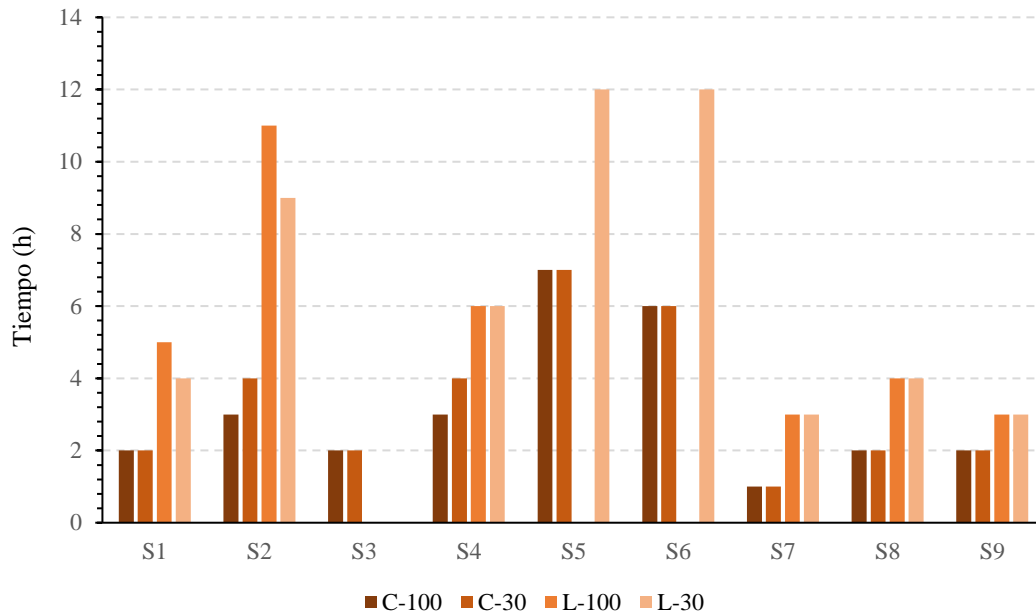
**Tabla 4.**

*Tiempo en horas en el que los sensores, en ambas geometrías de estudio, alcanzaron la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada con adición de viruta de acero inoxidable en todas las variaciones de porcentaje.*

<b>Tiempo (h) en el que los sensores alcanzaron una temperatura superior a 49°C implementando Viruta de Acero inoxidable</b>										
Geometría	Porcentaje de viruta	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Cuadrada	100	2	3	2	3	7	6	1	2	2
	30	2	4	2	4	7	6	1	2	2
Geometría "L"	100	5	11	-	6	-	-	3	4	3
	30	4	9	-	6	12	12	3	4	3

**Figura 11.**

*Representación gráfica del tiempo en horas en el que cada sensor alcanza el punto de fusión de la estearina de palma en cada configuración de estudio con adición de viruta de acero inoxidable.*



#### 4.4. Comparación de los resultados de las pruebas experimentales para la tubería cuadrada con ambas configuraciones de adición para cada matriz de soporte

Una vez realizados los estudios y análisis del efecto de la adición de matriz de soporte, de los tres materiales, en el proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada se percató que de manera similar los tres materiales desempeñaron un aporte mayor al proceso de transferencia de calor durante las pruebas de configuración de tubería cuadrada con adición de matriz al 100%, devolviendo así tiempos de fusión menores. Por tanto, la comparación de las tres matrices de soporte se organizó como muestra la Tabla 5, para las pruebas con adición al 100%, y en la Figura 12, para ambas configuraciones de adición de matriz.

##### Tabla 5.

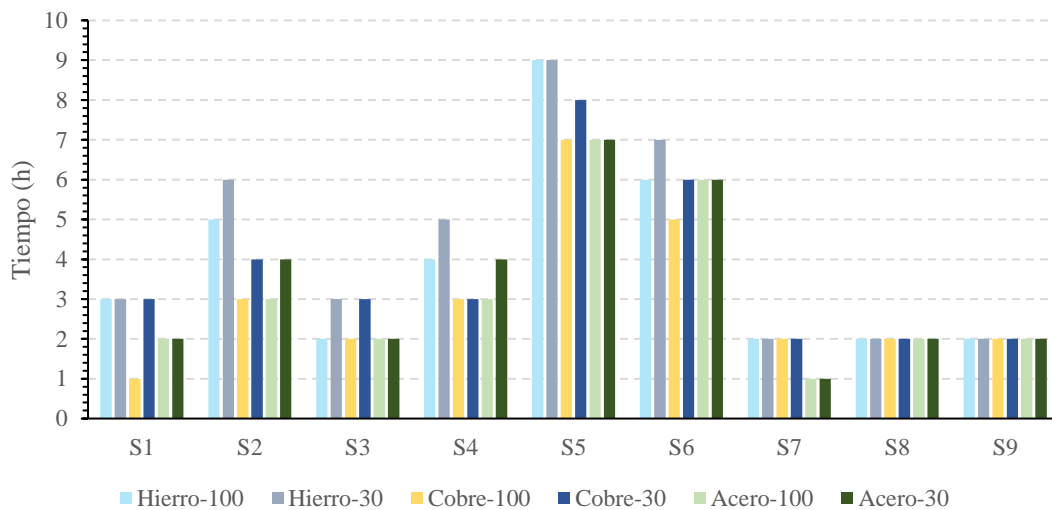
*Registro de las temperaturas de cada sensor en un intervalo de 3 horas para las pruebas de fusión en cada configuración de estudio de tubería de cobre cuadrada con adición de matrices de soporte al 100%.*

**Temperaturas (°C) registradas por los sensores en las pruebas de Fusión en periodos de tres horas**

Matriz de soporte	Tiempo (h)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
<b>Hierro</b>	3	53	45	53	46	34	43	62	60	62
	6	66	54	65	51	42	49	63	63	64
	9	66	67	67	57	49	55	62	63	63
	12	66	66	66	63	59	63	62	62	63
<b>Cobre</b>	3	56	48	56	49	40	45	58	55	58
	6	66	53	66	55	48	50	61	60	62
	9	69	69	69	59	54	55	62	61	63
	12	69	70	70	65	63	64	62	63	63
<b>Acero inoxidable</b>	3	62	49	57	48	39	44	63	65	64
	6	65	53	65	53	48	49	63	64	64
	9	69	69	69	60	53	54	63	64	64
	12	69	69	69	65	64	64	64	64	63

**Figura 12.**

*Comparación del tiempo en horas en el que cada sensor alcanza el punto de fusión de la estearina de palma en cada configuración de estudio de tubería de cobre cuadrada con adición de matrices de soporte.*



Teniendo en cuenta la ubicación de los sensores, dentro de la geometría cuadrada, el porcentaje de aplicación de matriz no debería representar diferencias significativas para aquellos sensores que se encuentran cerca de la geometría, estos sensores corresponden a S1, S3, S4, S6, S7, S8 y S9. Sin embargo, por las diferencias en densidades entre los materiales de las matrices, la cantidad de masa añadida entre pruebas es distinta y a pesar de que se intentó distribuir la matriz en las mismas áreas, estas diferencias en peso se ven reflejadas en las variaciones de tiempo presentadas en la Figura 12 en los sensores S1, S3 y S4.

Ahora, al centrarse en los sensores S2 y S5, los cuales representan las áreas con mayor dificultad para la transferencia de calor, se puede observar que las matrices que representaron una mayor reducción en el tiempo de fusión corresponden a los materiales de cobre y acero inoxidable en los porcentajes de viruta al 100%. Puesto que ambos materiales devolvieron valores similares de tiempo y de temperatura a lo largo del proceso de fusión del PCM se deben evaluar factores adicionales al rendimiento durante las pruebas, factores como el precio del material y la disponibilidad de este.

## 5. Conclusiones

Se seleccionaron matrices de soporte de hierro, cobre y acero inoxidable para el estudio, teniendo en cuenta que durante la caracterización se constató que estos tres materiales compartían un rango parecido de densidades y puntos de fusión lo suficientemente altos para no interferir en el proceso de fusión del PCM seleccionado. Además de esto, al valorar su maleabilidad, factor crucial para la manipulación de las matrices durante los cambios de configuraciones en las pruebas experimentales, se probó lo adecuado de los materiales. Aparte de las propiedades físicas del hierro, cobre y acero inoxidable, se tomó en consideración su disponibilidad en el entorno industrial cercano, lo cual proporcionó un rango de precios que se integraron en los análisis posteriores.

Una vez realizada la evaluación del proceso de fusión con diferentes configuraciones se estableció que, para todos los materiales de matriz utilizados, la geometría de serpentín cuadrada junto con la adición del 100% de viruta mostraron el mejor panorama para la reducción del tiempo en el proceso de fusión, arrojando porcentajes de mejora de entre 28,14 y 42,81 con respecto al tiempo de fusión de la estearina de palma sin adición de matriz de soporte. Además, aplicar las matrices de soporte de cobre y acero inoxidable a la geometría de serpentín en él permitió que, a las 12 horas de prueba, 8 de los 9 sensores registrarán valores de temperatura superiores al punto de fusión del PCM permitiendo calcular coeficientes de calor local ( $h$ ), valores que en 24 horas de prueba no se habían podido calcular para esta geometría sin adición de matrices de soporte.

Se percató que las matrices de cobre y acero inoxidables mostraron porcentajes de mejora en el tiempo muy cercanos (41,27 y 42,81 respectivamente) y compartieron también similitudes en la uniformidad de la distribución de temperaturas en el banco de pruebas a lo largo de las 12 horas de duración del proceso, por lo que ambos materiales resaltan como matrices de soporte

prometedoras para la aplicación en una escala mayor; sin embargo, se debe tener en cuenta que el valor promedio del coeficiente de calor local ( $h$ ) difiere para ambos casos, siendo que para el cobre es 1.22 veces menor que para el acero inoxidable, adicional a esto, por temas de disponibilidad el precio del cobre es 4 veces el del acero inoxidable. Ambos datos se deben tener en cuenta a la hora de seleccionar uno de los dos materiales.

El presente estudio ha proporcionado una comprensión más profunda del proceso de fusión de la estearina de palma, destacando la importancia de considerar diversos factores, como la geometría del sistema y la matriz de soporte. Por lo que, al finalizar el desarrollo de este proyecto se estableció, como recomendación para la aplicación de matrices de soporte metálicas con el fin de mejorar del proceso de fusión de un material PCM, que se considere adicionar más de un material como matriz de soporte durante la prueba de fusión, esto para estudiar no solo la reducción del tiempo en el proceso sino, analizar la optimización de la transferencia de calor en el sistema y observar su repercusión en la capacidad de almacenamiento calor del PCM en el banco de pruebas. También, se recomienda poner en consideración la implementación de matrices de soporte lo suficientemente largas para que entren en contacto con la geometría desde la parte superior a la inferior, supeditando la transferencia de calor por convección directa desde el tubo a la matriz, la cual atraviesa por completo el sistema LHTES, el largo de la matriz ocupa un papel crucial al momento de aplicar y situar la matriz de soporte, agregando que la actuación combinada de la geometría cuadrada junto con la presión que ejerce el banco al sellarse ayuda a mantener la matriz de soporte en los lugares de difícil fusión para el sistema.

### Referencias Bibliográficas

- Aguilera, V. B. A. (2023). *Evaluación experimental del proceso de fusión y cristalización de estearina de palma hidrogenada para su uso como PCM en sistemas carcasa-serpentin*. 64.
- 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, 106633. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2020.106633>
- Atal, A., Wang, Y., Harsha, M., & Sengupta, S. (2016). Effect of porosity of conducting matrix on a phase change energy storage device. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 93, 9–16. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2015.09.033>
- 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), 4120–4127. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2011.03.046>
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2019). *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. (McGraw Hill Education, Ed.; 6a ed.).
- Cortés, L. L., Duarte, S. G., Lángo, E. M., & González Durán, E. (s/f). *CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE METALES*.
- D. Stoller, M., Park, S., Zhu, Y., An, J., & S. Ruoff, R. (2008). Graphene-Based Ultracapacitors. *Nano Letters*, 8(10), 3498–3502. <https://doi.org/10.1021/nl802558y>
- Deshpande, A., Agiwal, H., Baumann, C., Krall, S., Bleicher, F., & Pfefferkorn, F. E. (2023). Recycling metal cutting chips into a consolidated deposition with friction surfacing. *Manufacturing Letters*, 35, 743–749. <https://doi.org/10.1016/J.MFGLET.2023.08.093>
- Dylewski, R., & Adamczyk, J. (2011). Economic and environmental benefits of thermal insulation of building external walls. *Building and Environment*, 46(12), 2615–2623. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2011.06.023>

Estrategia Colombia Carbono Neutral, Plan de desarrollo (2021).

Fleming, E., Wen, S., Shi, L., & Da Silva, A. K. (2015). Experimental and theoretical analysis of an aluminum foam enhanced phase change thermal storage unit. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 273–281. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2014.11.022>

Guo, P., Zhao, C., Sheng, N., Zhu, C., & Rao, Z. (2022). Enhancement of solar thermal storage properties of phase change composites supported by modified copper foam. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 247, 111950. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2022.111950>

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), 143–154. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)90064-7)

Huang, X., Chen, X., Li, A., Atinafu, D., Gao, H., Dong, W., & Wang, G. (2019). Shape-stabilized phase change materials based on porous supports for thermal energy storage applications. *Chemical Engineering Journal*, 356, 641–661. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.013>

Idir, A., Perier-muzet, M., Aymé-perrot, D., & Stitou, D. (2022). Thermodynamic Optimization of Electrical and Thermal Energy Production of PV Panels and Potential for Valorization of the PV Low-Grade Thermal Energy into Cold. *Energies*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/en15020498>

Kim, P., Shi, L., Majumdar, A., & McEuen, P. L. (2001). Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes. *Physical Review Letters*, 87(21), 215502-1-215502–215504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.215502>

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>

- Li, W. Q., Qu, Z. G., Zhang, B. L., Zhao, K., & Tao, W. Q. (2013). Thermal behavior of porous stainless-steel fiber felt saturated with phase change material. *Energy*, *55*, 846–852. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.02.064>
- Lizcano-González, V. A., Kafarov, V., Mahkamov, K., Arciniegas, M. P. C., & Rojas, N. D. S. (2023). Potential Application of Renewable Eutectic Mixtures as Phase Change Materials for Thermal Energy Storage. *Chemical Engineering Transactions*, *99*, 391–396. <https://doi.org/10.3303/CET2399066>
- Ly, Y., Zhou, W., & Jin, W. (2016). Experimental and numerical study on thermal energy storage of polyethylene glycol/expanded graphite composite phase change material. *Energy and Buildings*, *111*, 242–252. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2015.11.042>
- 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*, 456–468. <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*, 105463. <https://doi.org/10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2021.105463>
- 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. En *Energies* (Vol. 12, Número 16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en12163167>
- Mousavi, S., Siavashi, M., & Heyhat, M. M. (2019). Numerical melting performance analysis of a cylindrical thermal energy storage unit using nano-enhanced PCM and multiple horizontal fins. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, *75*(8), 560–577. <https://doi.org/10.1080/10407782.2019.1606634>
- NematpourKeshteli, A., Iasiello, M., Langella, G., & Bianco, N. (2022). Enhancing PCMs thermal conductivity: A comparison among porous metal foams, nanoparticles and finned surfaces in

- triplex tube heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 212, 118623. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.118623>
- 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>
- Pandey, A. K., Hossain, M. S., Tyagi, V. V., Abd Rahim, N., Selvaraj, J. A. L., & Sari, A. (2018). Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 281–323. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.043>
- 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, 279–288. <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, 110365. <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>
- Sun, X., Zhang, Q., Medina, M. A., & Lee, K. O. (2016). Experimental observations on the heat transfer enhancement caused by natural convection during melting of solid–liquid phase change materials (PCMs). *Applied Energy*, 162, 1453–1461. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.03.078>
- Togun, H., Sultan, H. S., Mohammed, H. I., Sadeq, A. M., Biswas, N., Hasan, H. A., Homod, R. Z., Abdulkadhim, A. H., Yaseen, Z. M., & Talebizadehsardari, P. (2024). A critical review on phase change materials (PCM) based heat exchanger: Different hybrid techniques for the enhancement. *Journal of Energy Storage*, 79, 109840. <https://doi.org/10.1016/J.EST.2023.109840>

- Umair, M. M., Zhang, Y., Iqbal, K., Zhang, S., & Tang, B. (2019). Novel strategies and supporting materials applied to shape-stabilize organic phase change materials for thermal energy storage—A review. *Applied Energy*, *235*, 846–873. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.11.017>
- WMO Strategic Communication Office Media Contact. (2024, enero 12). *La Organización Meteorológica Mundial confirma que en 2023 la temperatura mundial batió todos los récords*. Comunicado de prensa.
- Xiao, X., Zhang, P., & Li, M. (2013). Preparation and thermal characterization of paraffin/metal foam composite phase change material. *Applied Energy*, *112*, 1357–1366. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.04.050>
- Xiao, X., Zhang, P., & Li, M. (2014). Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage. *International Journal of Thermal Sciences*, *81*(1), 94–105. <https://doi.org/10.1016/J.IJTHERMALSCI.2014.03.006>
- Xu, Y., Ren, Q., Zheng, Z. J., & He, Y. L. (2017). Evaluation and optimization of melting performance for a latent heat thermal energy storage unit partially filled with porous media. *Applied Energy*, *193*, 84–95. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.02.019>
- 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*, 498–510. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2017.12.036>
- Zapata, S., Castaneda, M., Aristizabal, A. J., & Dyrer, I. (2022). Renewables for supporting supply adequacy in Colombia. *Energy*, *239*, 122157. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122157>
- Zhang, P., Ma, F., & Xiao, X. (2016). Thermal energy storage and retrieval characteristics of a molten-salt latent heat thermal energy storage system. *Applied Energy*, *173*, 255–271. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.04.012>

Zhang, P., Meng, Z. N., Zhu, H., Wang, Y. L., & Peng, S. P. (2017). Melting heat transfer characteristics of a composite phase change material fabricated by paraffin and metal foam. *Applied Energy*, *185*, 1971–1983. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.10.075>

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.2022.04.004>

## Apéndices

### Apéndice A. Aislamiento del banco de pruebas

#### Aislamiento Interior.

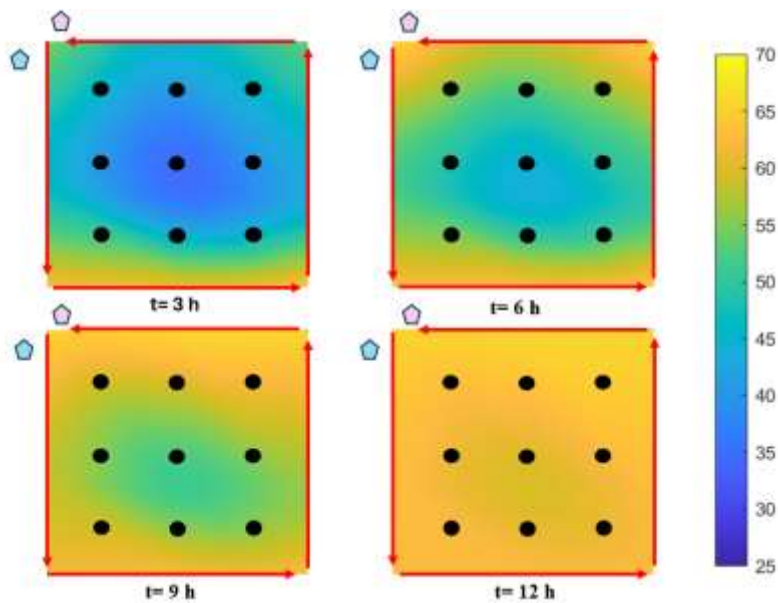


**Aislamiento Exterior.**

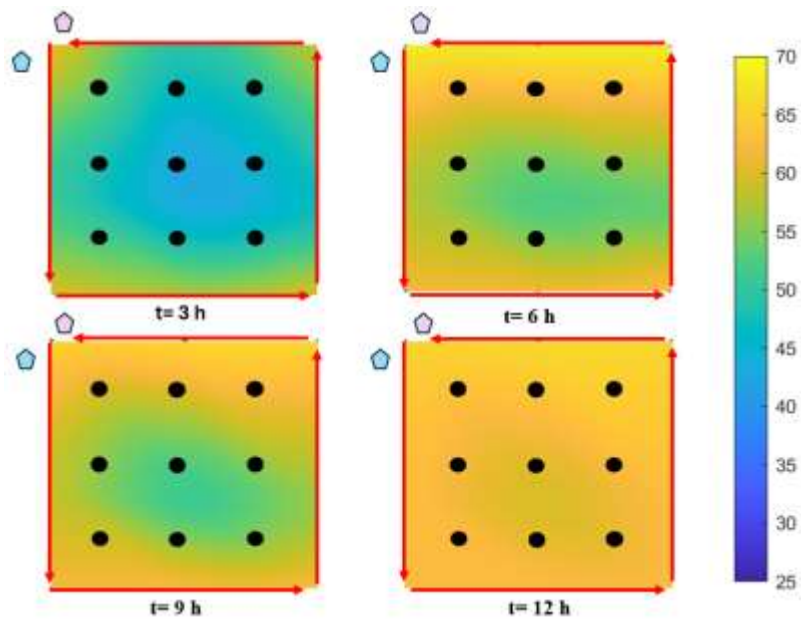


**Apéndice B. Distribución de temperaturas geometría serpentina cuadrada de material cobre para proceso de fusión con adición de matriz al 100%**

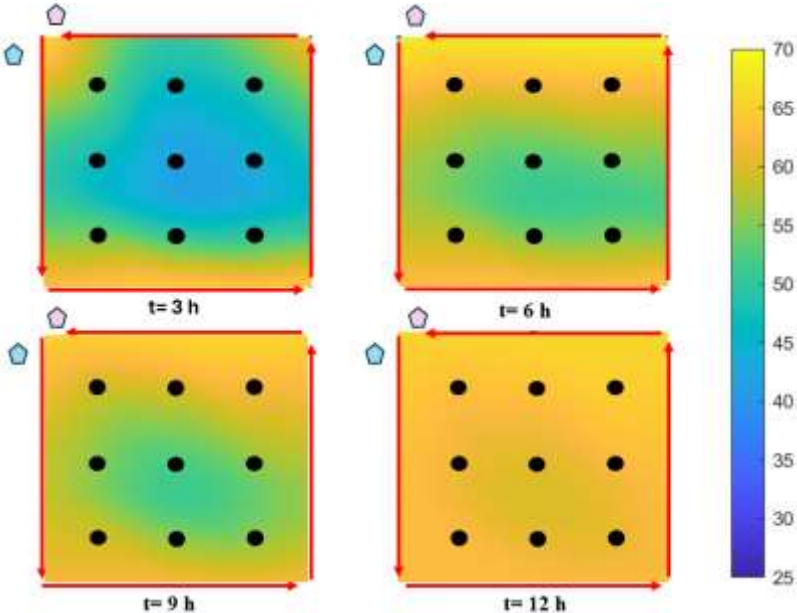
**Adición de matriz de hierro al 100%**



**Adición de matriz de cobre al 100%**

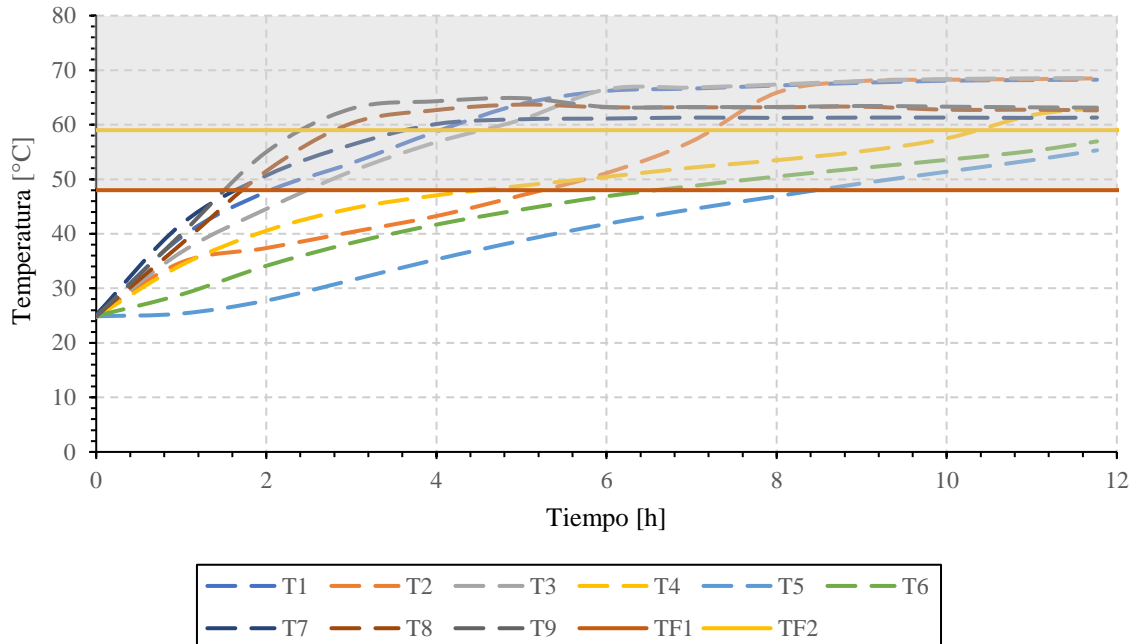


Adición de matriz de acero inoxidable al 100%

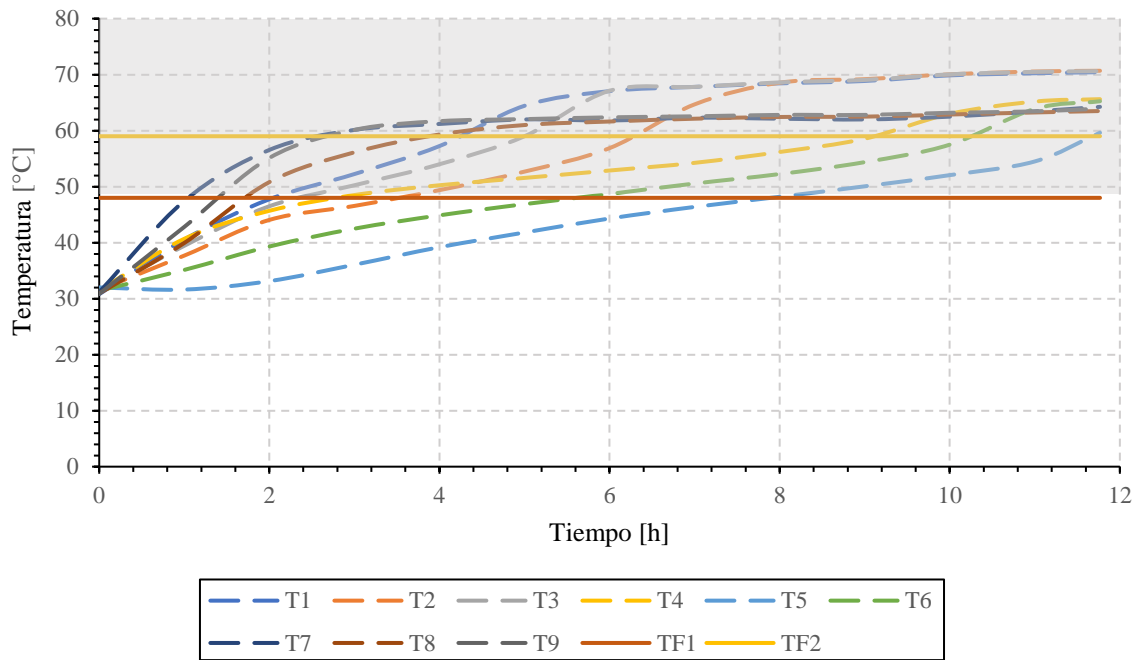


**Apéndice C. Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpiente Cuadrada en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 30%.**

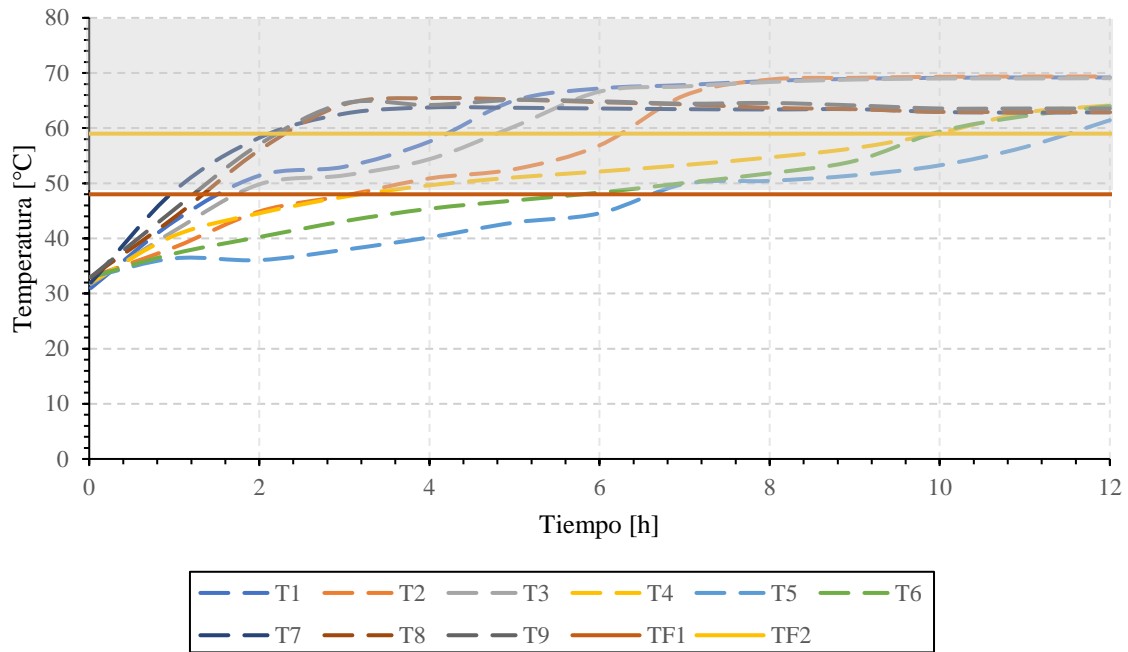
**Adición de matriz de soporte de hierro al 30%.**



**Adición de matriz de soporte de cobre al 30%.**

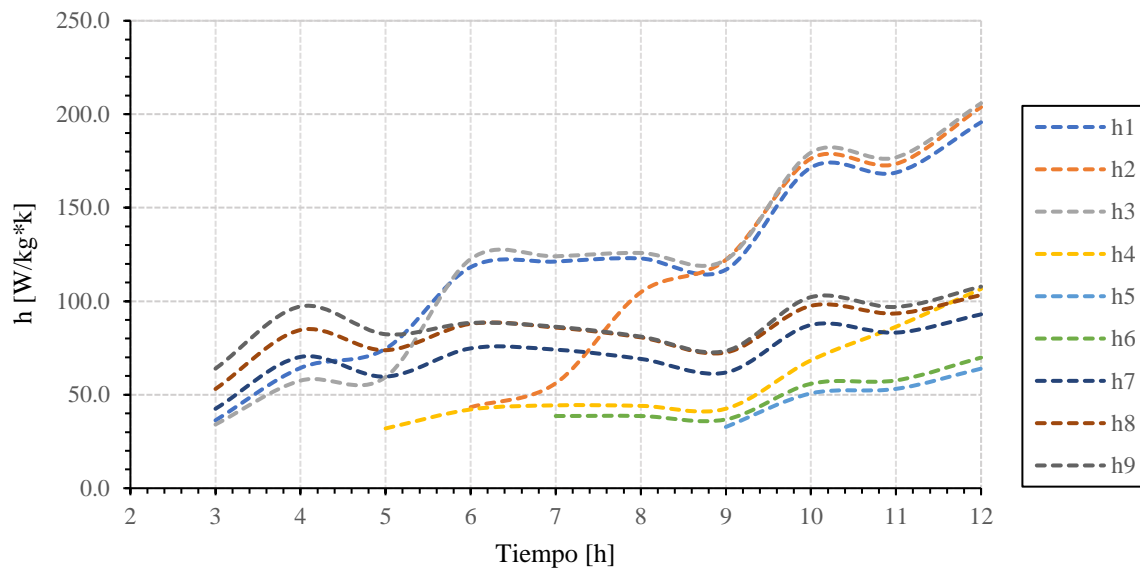


**Adición de matriz de soporte de acero inoxidable al 30%.**

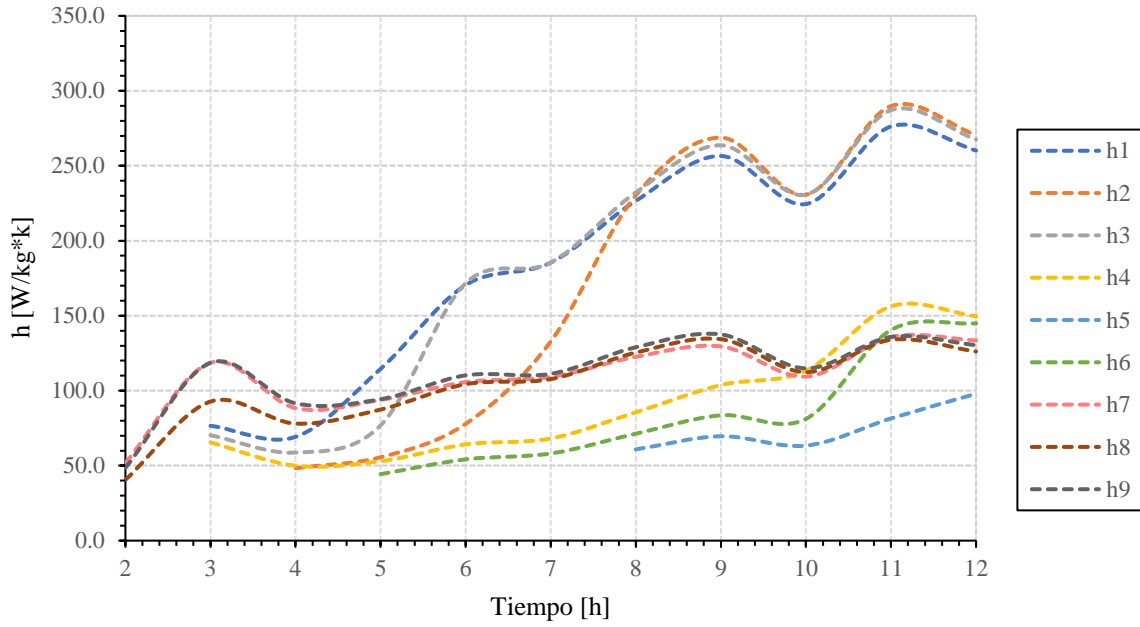


**Apéndice D. Variación del coeficiente de calor local (h) en diferentes puntos para geometría de serpentín Cuadrada en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 30%**

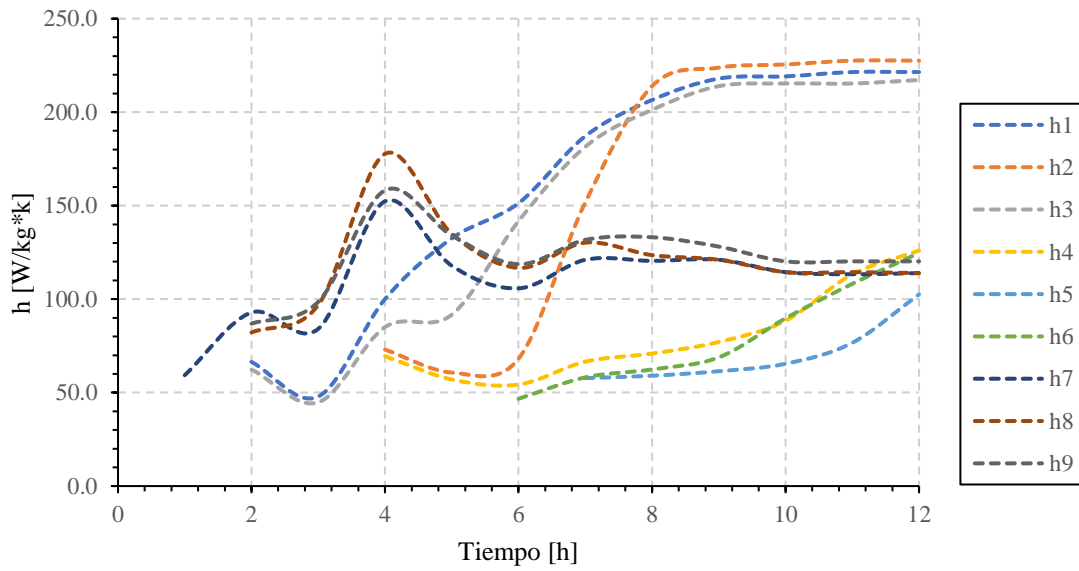
**Adición de matriz de soporte de hierro al 30%.**



**Adición de matriz de soporte de cobre al 30%.**

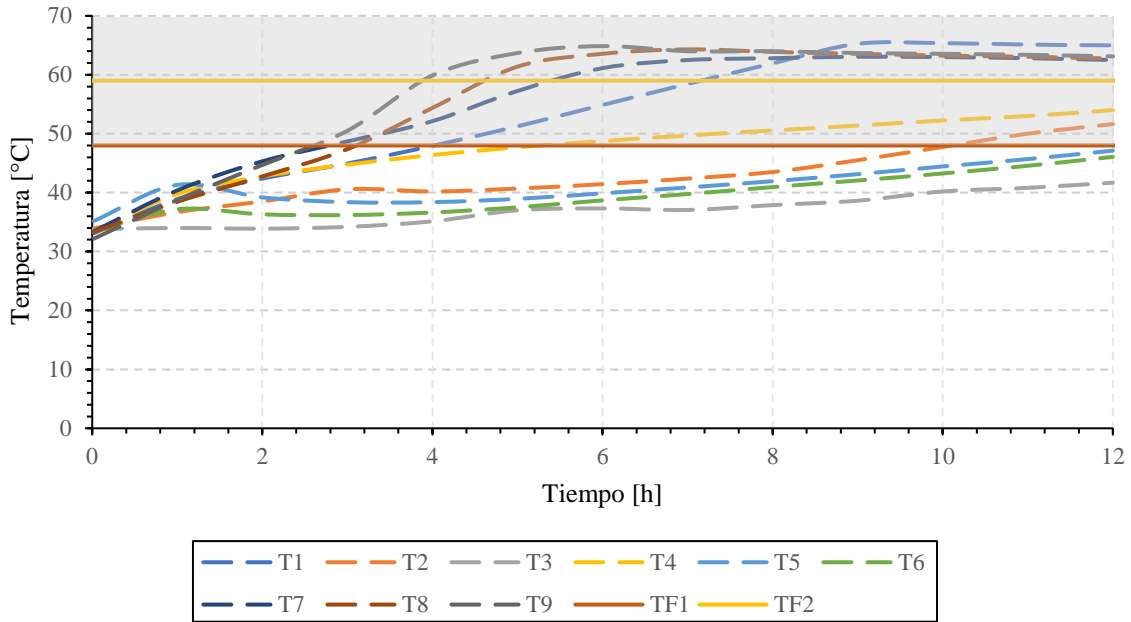


**Adición de matriz de soporte de acero inoxidable al 30%.**



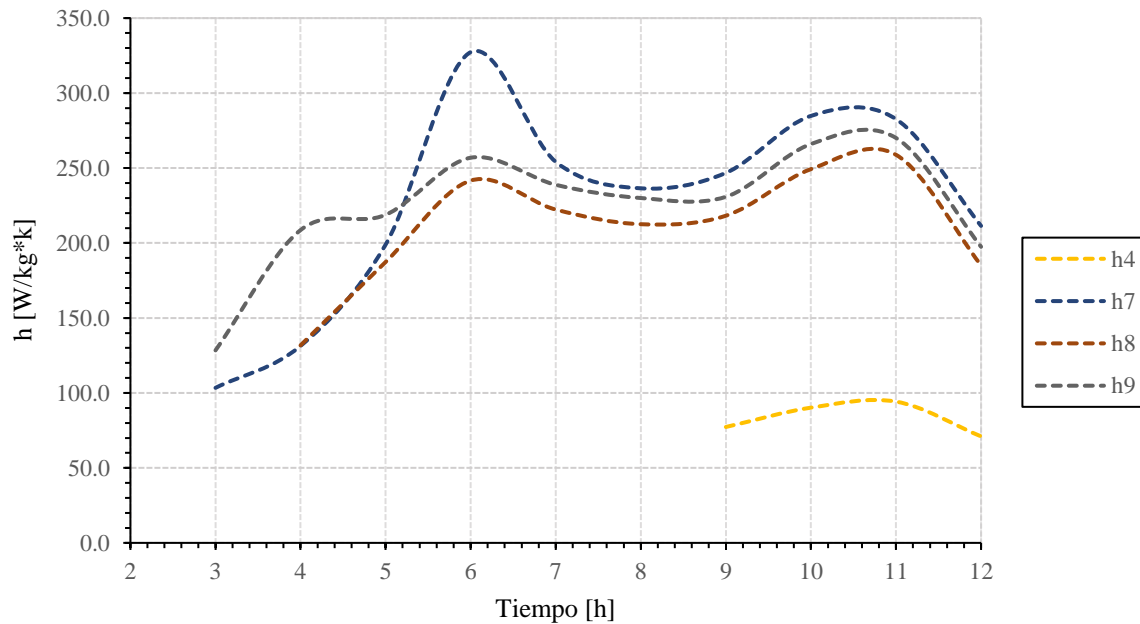


**Adición de matriz de soporte de acero inoxidable al 100%.**

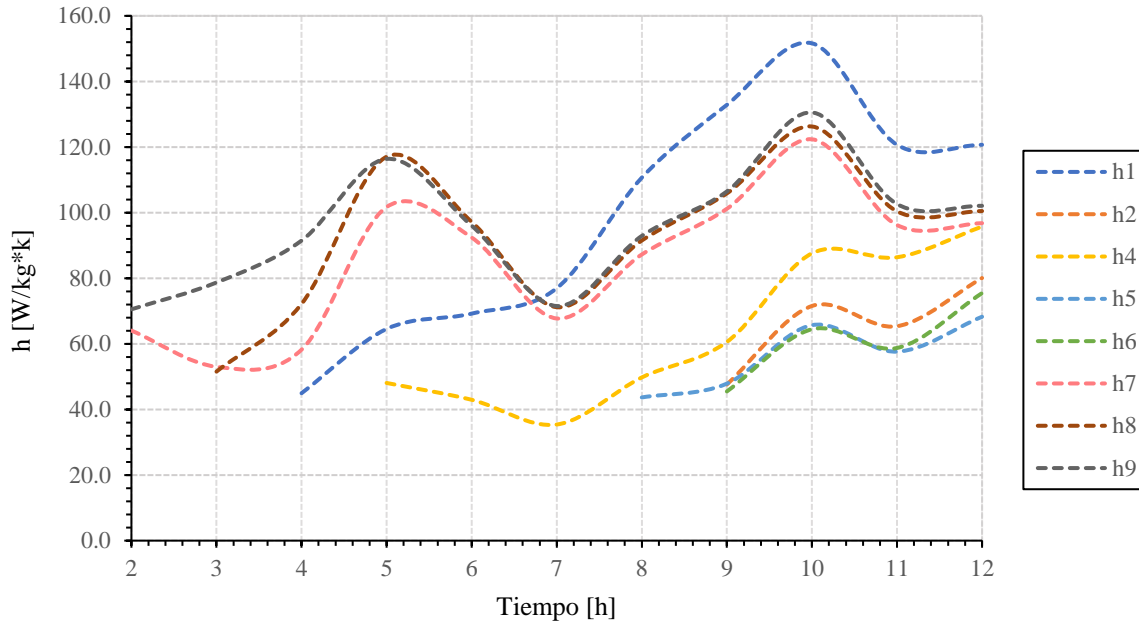


**Apéndice F. Variación del coeficiente de calor local (h) en diferentes puntos para geometría de serpentín ele en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 100%.**

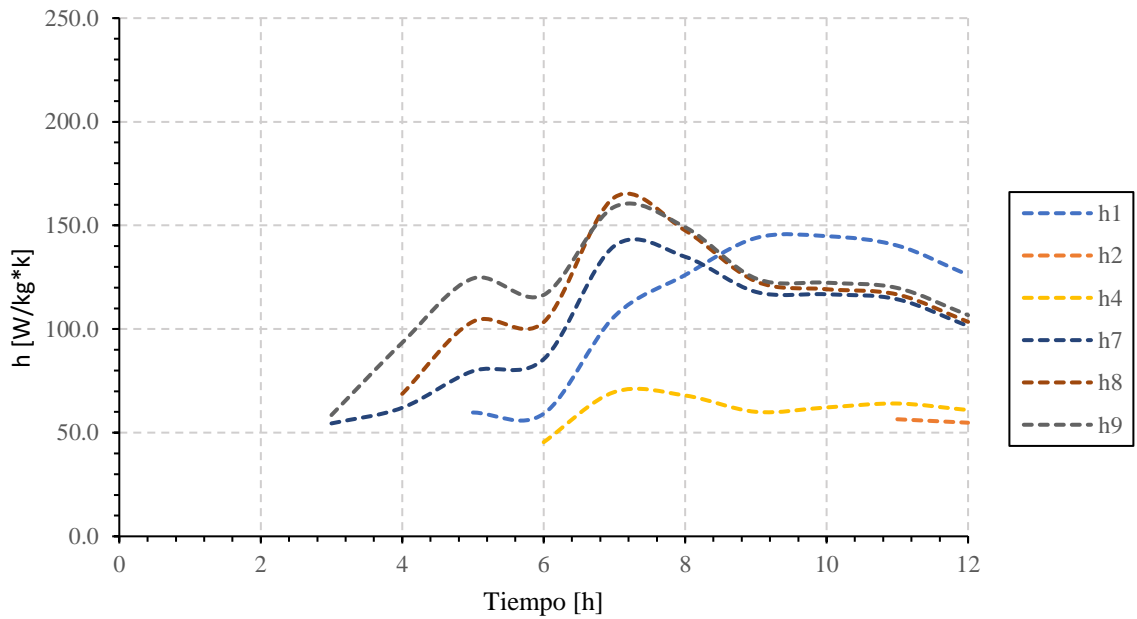
**Adición de matriz de soporte de hierro al 100%.**



**Adición de matriz de soporte de cobre al 100%.**

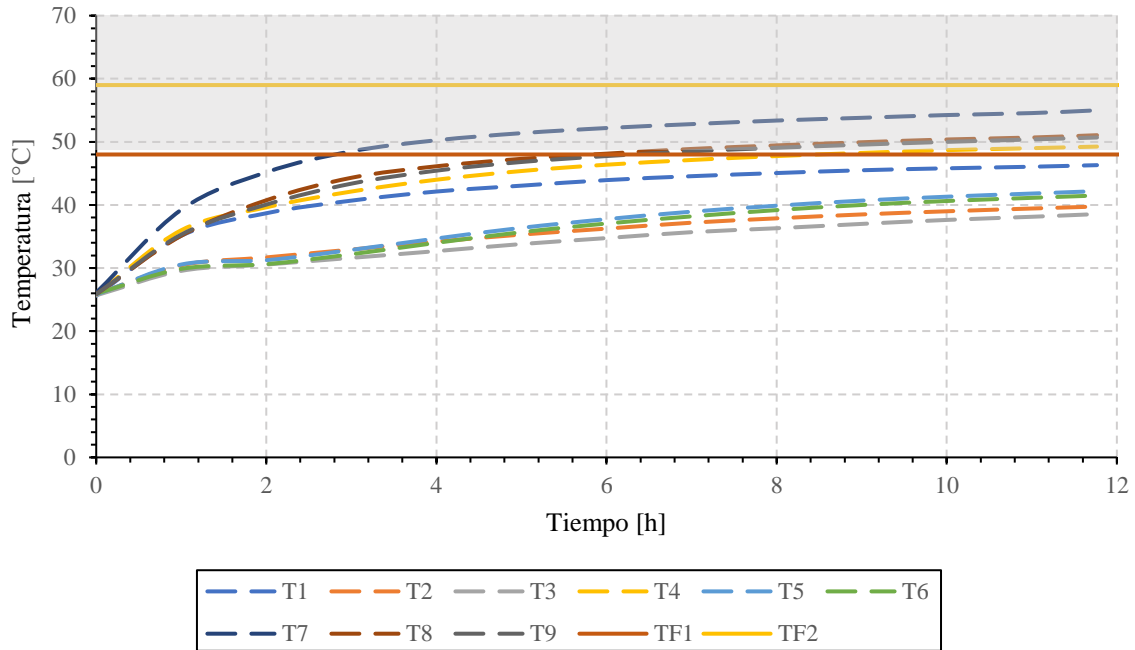


**Adición de matriz de soporte de acero inoxidable al 100%.**

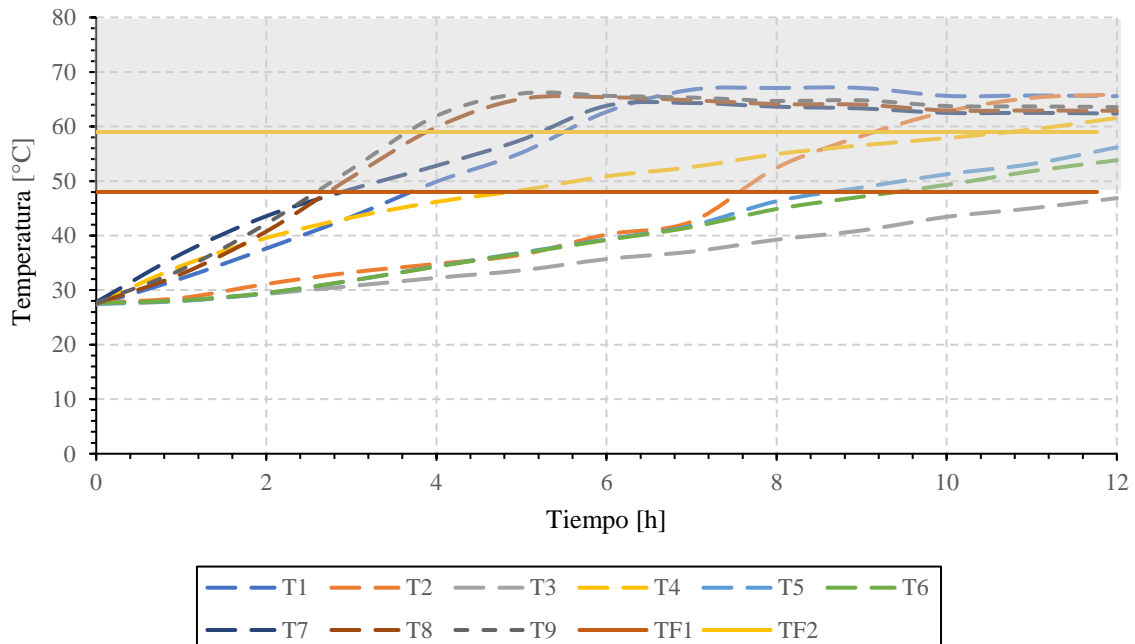


**Apéndice G. Variación de temperatura en diferentes puntos de medición para geometría de serpentín ele en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 30%.**

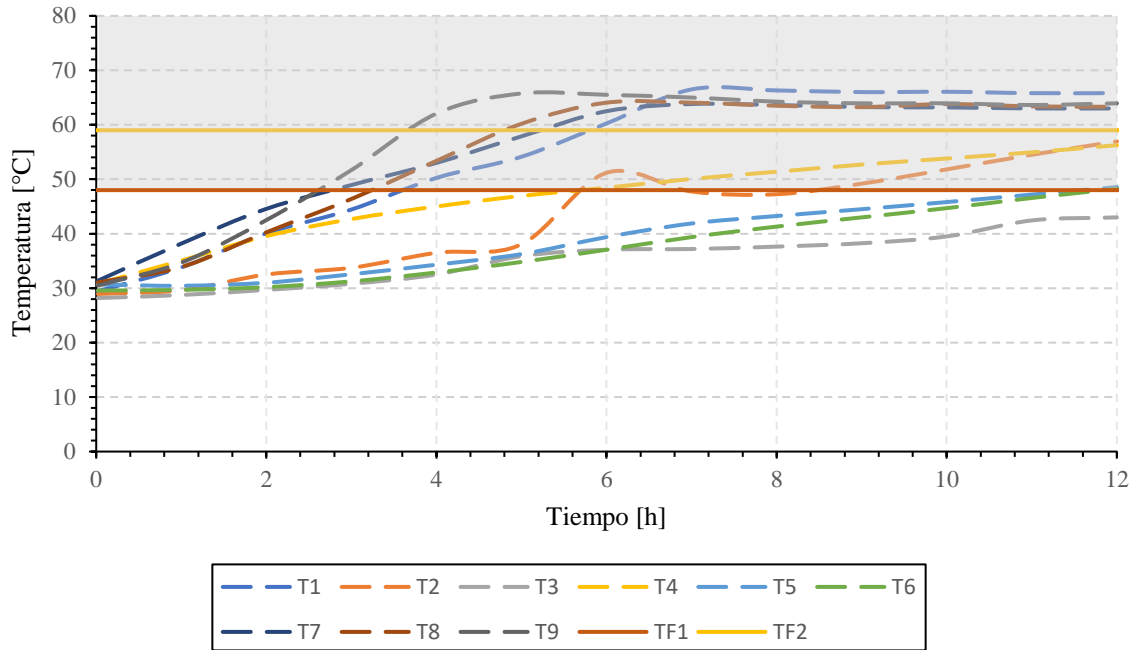
**Adición de matriz de soporte de hierro al 30%.**



**Adición de matriz de soporte de cobre al 30%.**

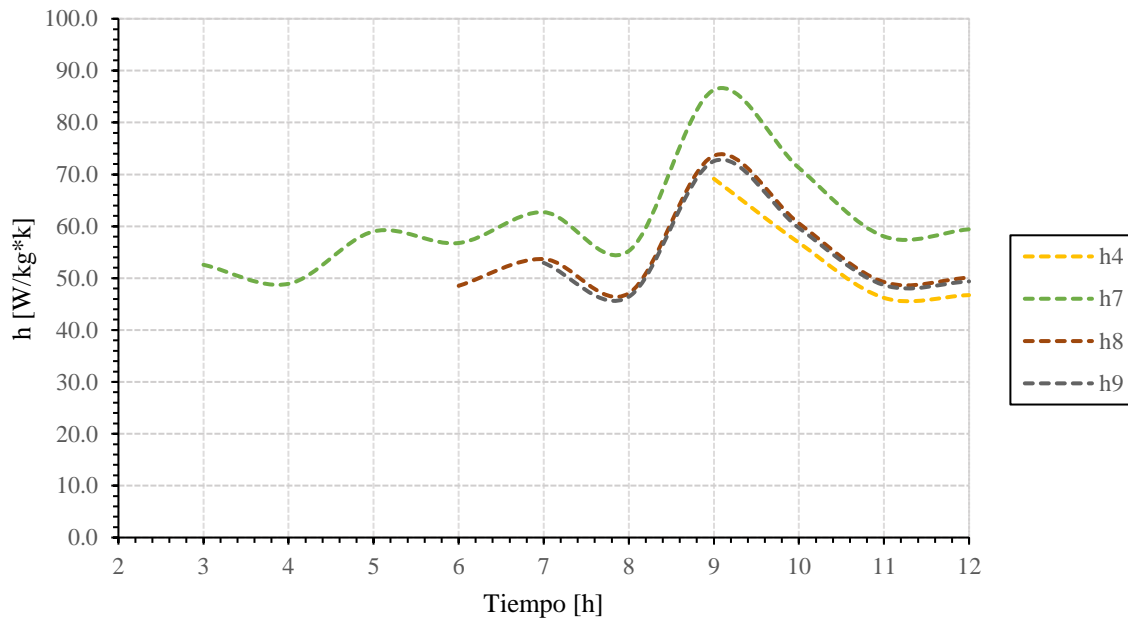


**Adición de matriz de soporte de acero inoxidable al 30%.**

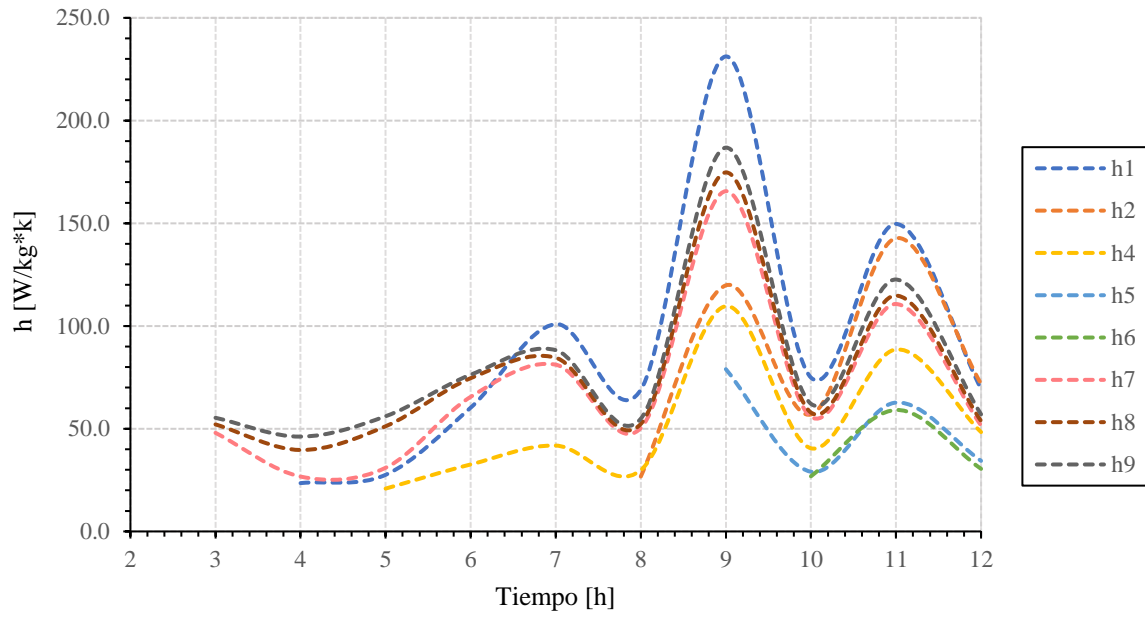


**Apéndice H. Variación del coeficiente de calor local (h) en diferentes puntos para geometría de serpentín ele en proceso de fusión con adición de matriz de soporte al 30%.**

**Adición de matriz de soporte de hierro al 30%.**



**Adición de matriz de soporte de cobre al 30%.**



**Adición de matriz de soporte de acero inoxidable al 30%.**

