

Mejora en la conductividad térmica de la Estearina de Palma Hidrogenada mediante la aplicación de aditivos orgánicos para su uso como material de cambio de fase

Deyvid Santiago Acevedo Avila y Ana Maria Prada Jaimes

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Química

Director

Dr. Sc. Viatcheslav V. Kafarov

PhD in Technical Sciences

Codirector

M.Sc. Víctor Alexis Lizcano González

Magíster en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Agradecimientos

Queremos expresar nuestra sincera gratitud a Dios por haber guiado cada paso de nuestra trayectoria profesional y por haber unido nuestros caminos para emprender este proyecto.

Deseamos agradecer a nuestros familiares y amigos por su constante apoyo, motivación y fortaleza brindada en los momentos más desafiantes.

Finalmente queremos agradecer al Dr. Viatcheslav Kafarov y a todo el grupo CIDES por el apoyo, colaboración y dedicación que nos brindaron. Su labor fue fundamental y marcó una diferencia significativa en nuestro proyecto.

Tabla de contenido

Introducción	9
1 Objetivos.....	11
1.1 Objetivo general.....	11
1.2 Objetivos específicos	11
2 Marco teórico.....	12
2.1 Tipos de almacenamiento de energía.....	12
2.2 Tipos de material de cambio de fase (pcm)	12
2.3 Tipos de geometrías	13
2.4 Tipos de aditivos empleados.....	15
3 Estado del arte	16
4 Descripción metodológica.....	19
4.1 Selección de biocarbones	19
4.1.1 <i>Construcción de base de datos de empresas colombianas productoras de biocarbones</i>	19
4.1.2 <i>Análisis técnico y selección de muestras de biocarbones</i>	20
4.2 Evaluación del proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada en sistema carcasa serpentín en función del porcentaje de aditivo empleado.....	21
4.2.1 <i>Ejecución de pruebas de fusión</i>	21
4.3 Elaboración de recomendaciones para la implementación de mejoras en el proceso de fusión	

empleando biocarbones como aditivos.....	24
4.3.1 <i>Estimación de las cantidades de calor almacenado, de coeficientes de transferencia de calor por convección y velocidad de calentamiento</i>	24
4.3.2 <i>Elaboración de recomendaciones</i>	25
5 Resultados.....	26
5.1 Análisis de estabilidad de las muestras	26
5.2 EPH con biocarbón a partir de cáscara de coco pulverizado	27
5.3 EPH con biocarbón a partir de granos de café pulverizado	30
5.4 Análisis comparativo de los resultados experimentales para la formulación de recomendaciones	32
6 Conclusiones.....	37
Referencias bibliográficas	39
Apéndices	42

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Listado de empresas colombianas productoras de biocarbones</i>	20
Tabla 2. <i>Apariencia y tamaño de partícula según el tipo de biocarbón</i>	21
Tabla 3. <i>Resumen de pruebas de fusión realizadas</i>	22
Tabla 4. <i>Análisis de los valores de coeficiente h y calor al finalizar la prueba según los porcentajes del biocarbón a partir de cáscara de coco pulverizado</i>	29
Tabla 5. <i>Análisis de los valores de coeficiente h y calor total al final la prueba según los porcentajes del biocarbón a partir de granos de café pulverizado</i>	30
Tabla 6. <i>Tiempo que tardan los sensores en reportar temperaturas superiores a 48 °c</i>	33
Tabla 7. <i>Comparación PCM - biocarbón al 3 %</i>	35

Lista de figuras

Figura 1. <i>Sistema de almacenamiento de calor latente de tipo carcasa - serpentín (ubicación de sensores)</i>	13
Figura 2. <i>Diagrama metodológico</i>	19
Figura 3. <i>Banco de pruebas de fusión. a) vista exterior b) geometría cuadrada en cobre</i>	22
Figura 4. <i>Expansión térmica negativa de la mezcla eph - biocarbón de café al 3 %</i>	23
Figura 5. <i>Impregnación al 3 % de biocarbón a partir de cáscara de coco granulada</i>	26
Figura 6. <i>Impregnación al 1 % (a), 2 % (b) y 3 % (c) de biocarbón a partir de granos de café pulverizado</i>	26
Figura 7. <i>Impregnación al 3 % de biocarbón a partir de cáscara de coco pulverizado</i>	27
Figura 8. <i>Comportamiento de las temperaturas y coeficientes de transferencia de calor por convección para pcm - biocarbón coco 3 %</i>	28
Figura 9. <i>Comportamiento de las temperaturas y coeficientes de transferencia de calor por convección para pcm - biocarbón a partir de granos de café al 3 %</i>	31
Figura 10. <i>Comparación de velocidades máximas de temperaturas en cada sensor de cada tipo de biocarbón empleado</i>	34

Resumen

Título: Mejora en la conductividad térmica de la Estearina de Palma Hidrogenada mediante la aplicación de aditivos orgánicos para su uso como material de cambio de fase.*

Autor: Deyvid Santiago Acevedo Avila y Ana Maria Prada Jaimes.**

Palabras clave: estearina de palma hidrogenada, material de cambio de fase, conductividad térmica, biocarbón, coeficiente de transferencia de calor.

Descripción: uno de los usos más extendidos de la radiación solar es el suministro de agua caliente y calefacción mediante sistemas de almacenamiento de energía solar térmica (STESS). Estos sistemas pueden acumular energía como calor sensible o latente, siendo este último preferido. Para almacenar energía como calor latente se necesita un material de cambio de fase (PCM). La correcta selección de un PCM implica estudiar la transferencia de calor, ya que los PCM tienen baja conductividad térmica, especialmente los biológicos. Recientemente, se ha destacado la estearina de palma hidrogenada como PCM. Esta investigación evaluó aditivos orgánicos para mejorar la conductividad térmica de la estearina de palma hidrogenada, mediante ensayos experimentales en un banco de pruebas para procesos de fusión y cristalización. Se evaluaron tres tipos y concentraciones de biocarbones: cáscara de coco y granos de café. Los resultados muestran que los biocarbones triplicaron la cantidad de calor transferido. A medida que el tamaño de la partícula disminuye, la impregnación es más uniforme. Aumentar el aditivo afecta la conductividad térmica y prolonga los tiempos de fusión. La mejor opción fue biocarbón de cáscara de coco pulverizado al 3% en peso como aditivo para mejorar la transferencia de calor.

*Trabajo de grado. Modalidad Investigación.

**Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director PhD Viatcheslav Kafarov.

Abstract

Title: Improvement in the thermal conductivity of Hydrogenated Palm Stearin through the application of organic additives for its use as a phase change material.*

Author: Deyvid Santiago Acevedo Avila y Ana Maria Prada Jaimes.**

Key words: hydrogenated palm stearin, phase change material, thermal conductivity, biochar, heat transfer coefficient.

Description: one of the most widespread uses of solar radiation is the provision of hot water and heating through solar thermal energy storage systems (STESS). These systems can store energy as either sensible or latent heat, with the latter being preferred. To store energy as latent heat, a phase change material (PCM) is required. The proper selection of a PCM involves studying heat transfer, as PCMs have low thermal conductivity, especially biological ones. Recently, hydrogenated palm stearin has been highlighted as a PCM. This research evaluated organic additives to improve the thermal conductivity of hydrogenated palm stearin through experimental tests in a test bench designed for fusion and crystallization processes. Three types and concentrations of biochar were evaluated: coconut shell and coffee grounds. The results show that the biochars tripled the amount of heat transferred. As particle size decreases, impregnation becomes more uniform. Increasing the additive affects thermal conductivity and prolongs fusion times. The best option was powdered coconut shell biochar at 3% by weight as an additive to improve heat transfer.

*Trabajo de grado. Modalidad Investigación.

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director PhD Viatcheslav Kafarov.

Introducción

La actividad humana, en sus diversos niveles y manifestaciones, se rige como la principal responsable de la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo significativamente al consecuente aumento de estos compuestos en la atmosfera. Factores como el elevado consumo de energía eléctrica, la acelerada deforestación y la extensa utilización de energías fósiles han sido determinantes en el crecimiento de la temperatura global (Lojo et al., 2023). A esta problemática se suma la constante y creciente demanda energética, impulsada por la necesidad de satisfacer los requisitos del desarrollo humano y el avance tecnológico. En el contexto colombiano se observa una pronunciada dependencia de las fuentes de energía fósil en la generación de calor, lo que ha generado un interés marcado en la exploración de alternativas energéticas, con un enfoque específico en campos como la investigación de la energía solar térmica. Dada la naturaleza intermitente de la energía solar, influenciada por el ciclo día-noche y eventos climáticos como El Niño o La Niña, se plantea la necesidad de desarrollar e implementar un sistema eficiente capaz de almacenar de manera efectiva este tipo de energía (López et al., 2020).

Por otra parte, las tecnologías de baja temperatura se centran en sistemas destinados al suministro de agua caliente y/o calefacción de espacios. Para estabilizar y almacenar la entrega de energía de estos sistemas, se recurre con frecuencia a los sistemas de almacenamiento de energía solar térmica (conocidos como STESS en inglés). Entre los métodos más comunes se encuentran aquellos que emplean tanques para retener agua caliente destinada a usos posteriores. Aunque estos sistemas, conocidos como de almacenamiento por calor sensible, son económicos y de aplicación sencilla, en la actualidad se prefiere el uso de materiales de cambio de fase (PCM en inglés), que ofrecen una mayor densidad de almacenamiento de calor y operan a una

temperatura prácticamente constante (Kurmar et al., 2024). El diseño de sistemas de almacenamiento mediante calor latente (LHTESS en inglés) requiere conocimientos específicos sobre el material de cambio de fase a utilizar, la geometría del intercambiador de calor, los materiales de construcción y las condiciones de operación. Además de los factores mencionados, es crucial estudiar detalladamente el proceso de transferencia de calor de forma experimental y teórica, debido a que se presenta baja conductividad térmica en los PCM, especialmente los de origen biológico, lo que constituye el principal factor limitante del proceso (Yan et al., 2021).

En este orden de ideas, el centro de investigaciones para el desarrollo sostenible en industria y energía (CIDES) ha realizado investigaciones a escala laboratorio y a escala piloto en las cuales ha encontrado que la Estearina de Palma Hidrogena (EPH) funciona como material de cambio de fase (PCM). También hallaron el efecto de la geometría del serpentín en el proceso de fusión de esta a escala laboratorio, estudiando cual tipo de geometría presenta mejores resultados. Como todo PCM orgánico, la EPH tiene una baja conductividad térmica. Actualmente se pueden encontrar una gran variedad de aditivos que se pueden emplear para mejorar este parámetro de diferentes PCM, encontrándose desde inorgánicos hasta orgánicos. Los aditivos orgánicos, especialmente aquellos renovables, son una buena alternativa ya que suelen ser amigables con el medio ambiente, económicos y de fácil acceso, en comparación con los aditivos inorgánicos, los cuales suponen un alto costo, son difíciles de conseguir, además de que pueden suponer daño al medio ambiente, lo que nos llevaría al mismo punto de partida. Es por esta razón que nos planteamos la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el aditivo orgánico más adecuado para la mejora de la conductividad térmica en la EPH

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Mejorar la conductividad térmica de la estearina de palma hidrogenada mediante la aplicación de aditivos orgánicos para su uso como material de cambio de fase.

1.2 Objetivos específicos

- Seleccionar tres biocarbones de producción nacional con base en características fisicoquímicas y de mercado.
- Evaluar el proceso de fusión de estearina de palma hidrogenada en sistema carcasa serpentín en función del porcentaje de aditivo empleado.
- Establecer un conjunto de recomendaciones para la aplicación de biocarbones de producción local para la mejora del proceso de fusión de estearina de palma hidrogenada empleada como PCM

2 Marco teórico

2.1 Tipos de almacenamiento de energía

El almacenamiento de energía térmica está presente en aplicaciones como calefacción y refrigeración mediante diversos métodos. Al capturar y retener un excedente energético para su posterior utilización según la demanda, las tecnologías de almacenamiento de energía térmica contribuyen significativamente a conservar un equilibrio entre la generación y el consumo. Esto es más relevante en la implementación de tecnologías de energías renovables, como por ejemplo el aprovechamiento de la energía solar térmica. Las técnicas de almacenamiento de energía se clasifican en tres categorías principales. La primera técnica se fundamenta en las propiedades inherentes de la materia que se somete a un calentamiento extensivo, en la que la cantidad de energía almacenada corresponde a la capacidad calorífica específica del material, resultando en calor sensible. La segunda modalidad emplea una propiedad de la materia que le permite absorber y liberar calor (calor latente) durante transiciones de fase. En tanto, las reacciones químicas, el tercer enfoque, requiere energía para formar moléculas químicas con enlaces de alta energía que, posteriormente, liberan esta energía al romperse (Kumar et al., 2024). La segunda modalidad está ganando relevancia en la investigación, ya que presenta un notable potencial para alcanzar una elevada capacidad de almacenamiento de energía por unidad de masa, con una mínima variación de temperatura entre los procesos de almacenamiento y liberación de calor. Además, se destaca por su rendimiento estable y un costo reducido.

2.2 Tipos de material de cambio de fase (PCM)

Los materiales de cambio de fase poseen la capacidad de almacenar energía, mantener una estabilidad química y liberar una cantidad significativa de energía térmica en forma de calor latente (ΔH) durante la transición de fase, todo ello en rangos de temperatura específicos. La

clasificación de los materiales de cambio de fase (PCM) se realiza en función del estado de cambio de fase o del rango de temperatura en el que tiene lugar dicha transición. Se identifican categorías como PCM orgánicos, ejemplificados por la parafina, PCM inorgánicos, como aleaciones metálicas y PCM de mezclas eutécticas (Alva et al., 2017).

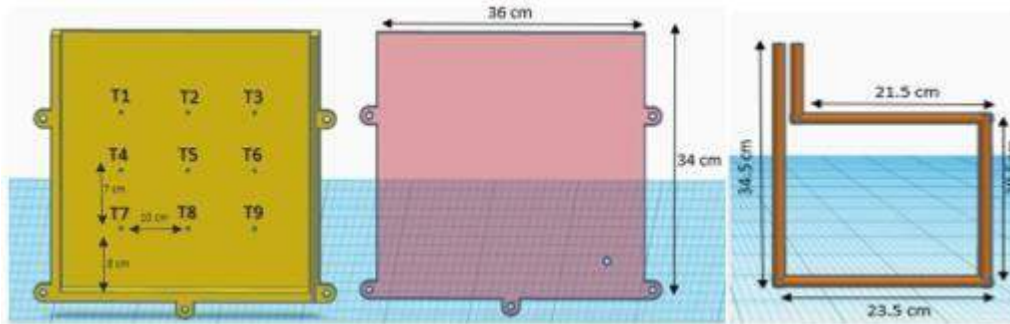
2.3 Tipos de geometrías

En los LHTESS, una vez seleccionado el material de almacenamiento de calor latente con base en el rango de temperatura, es esencial desarrollar un diseño adecuado para el contenedor que albergará dicho medio de almacenamiento. Factores como la radiación diaria en la ubicación específica, la geometría del contenedor y sus parámetros térmicos ejercen una influencia directa sobre variables cruciales como el tiempo de fusión, las características de transferencia de calor y el rendimiento general del LHTESS (sistemas de almacenamiento de energía solar térmica por calor latente). Las geometrías más prevalentes en un LHTESS incluyen el modelo de tubería, el modelo de cilindro, el modelo de carcasa y tubo, así como el modelo de losa rectangular. Se destaca que el sistema de carcasa y tubos exhibe mínimas pérdidas de calor, contribuyendo así a la eficiencia y rendimientos óptimos del sistema (Umair et al., 2019). En un proyecto de investigación desarrollado por el CIDES previamente mencionado, se encontró que la EPH funciona como PCM bajo un sistema de almacenamiento de calor latente de tipo carcasa – serpentín (geometría cuadrada con tubo de cobre).

Figura 1.

Sistema de almacenamiento de calor latente de tipo carcasa - serpentín (ubicación de sensores

y geometría de serpentín cuadrada)



Uno de los parámetros que definió dicha conclusión fue la evaluación del coeficiente experimental de transferencia de calor local por convección (h), ya que por medio de este fue posible realizar la comparación de la velocidad de transferencia de calor en diferentes sistemas. Este parámetro se determinó de forma experimental y su valor depende de la configuración geométrica, la naturaleza del fluido y la velocidad del mismo (Shaikh et al., 2023). El coeficiente de transferencia de calor por convección (h en $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$h_{PCM} = \frac{Q}{A_{PCM} \cdot (T_{HX} - T_{PCM})} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde A_{PCM} es el área de transferencia de calor (m^2); T_{PCM} es la temperatura registrada en cada sensor (K); T_{HX} es el promedio de las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador (K) y Q (Js^{-1}) es el calor transferido durante el proceso, el cual es descrito por la siguiente ecuación:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde m representa el flujo másico del agua (kgs^{-1}); C_p es la capacidad calorífica del fluido caloportador ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$); y ΔT la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del fluido (K). Es importante tener en cuenta que el flujo másico y la capacidad calorífica son dependientes de la temperatura del fluido (Pakalka et al., 2021).

La determinación de la velocidad de calentamiento de la estearina de palma hidrogenada en aplicaciones de PCM posee una importancia crítica debido a su influencia directa en aspectos clave como la eficiencia energética, el control térmico, la capacidad de respuesta y la durabilidad del material. Una evaluación adecuada de este asegura un funcionamiento óptimo del sistema, mejorando la capacidad energética, facilitando una rápida adaptación a cambios de temperatura y prolongando la vida útil del material utilizado (Rolka et al., 2021).

2.4 Tipos de aditivos empleados

La problemática inherente a la tendencia de los materiales orgánicos de cambio de fase a filtrarse durante el proceso de transición de fase ha limitado sus aplicaciones prácticas en el ámbito del almacenamiento de energía térmica. Para mitigar este desafío, se propone la estabilización de forma mediante la dispersión de partículas de elevada conductividad térmica, como carbono, grafito o metales, en el PCM. La inclusión de materiales carbonosos porosos derivados de biomasa o residuos, reconocidos por su asequibilidad, naturaleza no tóxica y alta capacidad de absorción, se presenta como una opción idónea para fortalecer la estabilidad de forma. La estructura mesoporosa de los materiales de carbono porosos exhibe una capacidad de absorción superior en comparación con estructuras macroporosas, atribuible a una destacada capilaridad y una interacción robusta con los PCM orgánicos. En consecuencia, se considera que los materiales de carbono porosos son recursos emergentes con aplicaciones prometedoras en el campo del almacenamiento de energía solar térmica (Tahan et al., 2018).

3 Estado del arte

Tras haber establecido los fundamentos teóricos pertinentes, es crucial explorar el estado actual del conocimiento en este campo específico. Yoo et al., (2019) elaboraron nuevos tipos de biocompuestos - PCM preparados a partir de biorresiduos. Utilizaron los desechos del café, que actualmente se consumen y abandonan al preparar como bebida y se aplicaron como aditivo para el PCM. Se encontró que los residuos de café fueron efectivamente impregnados al vacío en cada cera natural evaluada. Como resultado nos presentan estabilidad térmica y mejora significativa en la conductividad térmica. Demostrando así que este residuo de café es económico y respetuoso con el medio ambiente.

Jeon et al., (2019) utilizaron como aditivos biocarbón a base de piña de pino, aserrín de pino y lodos de fábrica de papel, estos los impregnaron a vacío en Aceite de coco. Presentaron diferentes temperaturas de pirolisis para cada biocarbón. Concluyeron que con todos los aditivos se presenta una buena estabilidad térmica y química, además, se pudo observar que la mejor combinación fue aserrín de pino con una temperatura de 550°C y el aceite de coco, ya que este presento el mayor aumento de calor latente, mostrando también que esta composición es un buen material.

Yan et al., (2021), eligieron aditivos que incluyeron polvo de grafito (Grp), polvo de nano silicio (Si), polvo de nano cobre (Cu), polvo de nano tungsteno (Wu) y polvo de níquel (Ni). Además, se incorporaron ácido esteárico (SA), cera de parafina (P) y una combinación de P-SA. Llevaron a cabo una investigación experimental para evaluar las variaciones en la conductividad térmica de 63 PCM. Los resultados indican que todos los aditivos contribuyen al aumento de la conductividad térmica del PCM, y después de 500 ciclos de calentamiento y enfriamiento, las

fluctuaciones en el valor de este parámetro se mantienen por debajo del 10%. Entre los aditivos evaluados, el polvo de grafito demostró ser el más efectivo.

Liu et al. (2022) Nos presentan los efectos de la temperatura de la pirolisis para la obtención del biocarbón, además de las propiedades de almacenamiento de energía térmica al aplicarlo como aditivo en un PCM. Como resultado nos muestran que la mejor mezcla de aditivo-PCM se encontró con una temperatura de pirolisis de 600 grados Celsius, presentando incremento en la conductividad térmica del 54.5% en comparación con el PCM puro.

Hekimoğlu et al. (2022) Nos mencionan la mejora significativa en la conductividad térmica que es de 1.75 veces mayor y la estabilidad química que presenta la mezcla de cascara de albaricoque y polietilenglicol. Además de mencionar que es una excelente alternativa para la gestión térmica de baja temperatura en edificios.

Es importante resaltar que, hasta la fecha, no existen informes de trabajos experimentales que hayan incorporado Estearina de Palma Hidrogenada con biocarbón de café (en polvo), biocarbón de cáscara de coco (en polvo) y biocarbón de cascara de coco (en grano) como aditivos al material de cambio de fase en una configuración geométrica de tubo de cobre con forma cuadrada. La gran parte de los trabajos reportados se centran en medir la conductividad térmica del PCM puro y compararla con la medición obtenida para el PCM con aditivo. Aunque esto puede ser un buen indicio de las ventajas del aditivo a emplear, deja de lado la influencia de otras variables presentes en el proceso de fusión, como lo es la convección natural. La convección natural en un PCM fundido se ve favorecida por gradiente de temperatura internos (Zhou et al., 2024), por lo que el uso de aditivos que incrementen la conductividad térmica podría afectar negativamente este fenómeno. Respecto a la selección de los aditivos a estudiar,

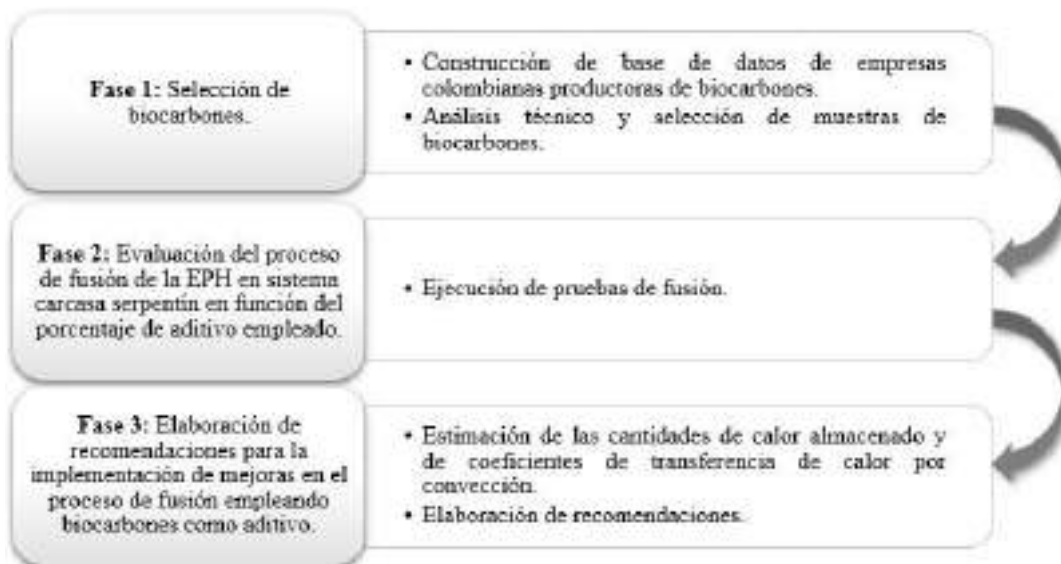
esta se basó en su origen a partir de residuos agroindustriales, además de que se cuenta ya con una producción nacional establecida, que, aunque se limita a pocas empresas, permite que se puedan encontrar en el mercado.

4 Descripción metodológica

La ejecución de este proyecto se estructuró en tres etapas como se puede observar en la Figura 2, las cuales incluyeron la elaboración de una base de datos que recopila información sobre las empresas fabricantes de biocarbones en Colombia. Adicionalmente, se realizaron pruebas experimentales de fusión en un banco de ensayos con el propósito de estudiar el impacto de los aditivos empleados en el material de cambio de fase. Finalmente se realizó un tratamiento de datos pertinente y por medio de este se formularon las recomendaciones para la implementación de biocarbones como aditivos para la mejora del proceso de fusión de PCM's.

Figura 2.

Diagrama metodológico



4.1 Selección de biocarbones

4.1.1 *Construcción de base de datos de empresas colombianas productoras de biocarbones*

En la Tabla 1 se evidencia la investigación realizada de mercados donde se incluyeron bases de datos comerciales como Legis Comex y contacto directo con las empresas. Además, se

identificó una empresa nacional que está desarrollando investigaciones en la producción de biocarbones.

Tabla 1.

Listado de empresas colombianas productoras de biocarbones

Nombre de la empresa	Tipo de comercialización	Origen del biocarbón	Apariencia	Costo unitario (COP/kg)
SUQUIN SAS	Fabricante y distribuidor	Cáscara de Coco	Granulo negro	22000
			Pulverizado	24000
ANTRACITAS DE CUNDINAMARCA LTDA.	Fabricante y distribuidor	Cáscara de Coco	Granulo negro	9200
la leñería	Fabricante y distribuidor	Cáscara de Coco	Pulverizado	40000

Se identificaron tres empresas especializadas en la fabricación y distribución de biocarbón derivado de cáscara de coco, presentado en apariencia pulverizado o en forma de gránulos. Estas compañías tienen su sede en las ciudades de Bucaramanga y Bogotá. Se destaca una notable variación en el costo unitario del material, resaltándose el valor de COP 9.200/kg el cual es mucho menor al del grafito el cual puede estar alrededor de COP 400.000/kg. Adicionalmente, se estableció contacto con Industrias Acuña LTDA, una empresa colombiana que está desarrollando investigaciones en la producción de biocarbón a partir de granos de café, logrando obtener una muestra representativa de 400 g de dicho material, aunque sin un costo comercial aún definido.

4.1.2 Análisis técnico y selección de muestras de biocarbones

Se adquirieron biocarbones en presentaciones pulverizado y gránulo, procedentes de cáscara de coco suministrados por la empresa SUQUIN SAS y de grano de café proporcionados por Industrias Acuña LTDA. A ambas entidades se les solicitó el análisis técnico de cada aditivo

con el propósito de evaluar específicamente el tamaño de partícula, como se puede observar en la Tabla 2. Dicho tamaño de partícula se identifica como el factor preeminente para optimizar la transferencia de calor, mejorar la estabilidad térmica y asegurar un rendimiento eficiente en la absorción y liberación de energía térmica durante los ciclos de cambio de fase.

Es importante señalar que el biocarbón obtenido a partir de granos de café no fue suministrado en forma pulverizada, por lo que fue necesario la aplicación de molienda y tamizado. La molienda se llevó a cabo en el laboratorio de procesos de la Escuela de Ingeniería Química, utilizando un molino fabricado en cerámica con cuerpos molidores del mismo material. La elección de este equipo específico se realizó con el objetivo de minimizar las pérdidas durante el proceso. Con el fin de registrar el tamaño de partícula, se procedió a realizar un tamizado, revelando que el 95 % del material logró pasar a través de la malla # 325.

Tabla 2.

Apariencia y tamaño de partícula según el tipo de biocarbón

Tipo de biocarbón	Apariencia	Tamaño de partícula	Pasa malla #325
Cáscara de coco	Pulverizado	0.04 mm	90 %
	Granulo negro	2.50 mm	-
Granos de café	Pulverizado	0.04 mm	95 %

4.2 Evaluación del proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada en sistema

carcasa serpentín en función del porcentaje de aditivo empleado

4.2.1 Ejecución de pruebas de fusión

Empleando el banco de pruebas de fusión disponible en el grupo de investigaciones CIDES y el cual se muestra en la Figura 1 se realizaron las pruebas de fusión empleando como fluido caloportador un flujo de agua de $2 \text{ Lmin}^{-1} \pm 0.5$ a una temperatura de $75 \text{ }^\circ\text{C}$ y estableciéndose así un valor en la capacidad calorífica de $4193 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. En la Figura 3 se

muestra la vista exterior del banco de pruebas y la geometría de serpentín (cuadrada en cobre) a emplear.

Figura 3.

Banco de pruebas de fusión. a) Vista exterior b) Geometría cuadrada en cobre



Se estableció un esquema experimental con un total de 9 pruebas de fusión como se puede observar en la Tabla 3, cada una con una duración de 24 horas. Se fijaron porcentajes predeterminados para cada prueba, manteniendo una separación proporcional de 3 % entre ellos para el biocarbón derivado de la cascara de coco. Por otra parte, la proporción para el biocarbón de granos de café cambió a 1 % debido a que mostró una expansión térmica negativa (proceso físico-químico en el que algunos materiales aumentan su volumen al ser cristalizados) durante la cristalización con solo un 3 % de aditivo como se evidencia en la Figura 4, esto con el objetivo de prevenir cualquier daño en el banco de pruebas. Es importante mencionar que la separación entre las proporciones se realizó en base a la cantidad de biocarbón disponible y las relaciones encontradas en la literatura.

Tabla 3.

Resumen de pruebas de fusión realizadas

Porcentaje de variación de cantidad de aditivo			
Geometría	Biocarbón de cáscara de coco pulverizado	Biocarbón de cáscara de coco granulado	Biocarbón de granos de café pulverizado
Cuadrada	3, 6 y 9	3, 6 y 9	1, 2 y 3

Figura 4.

Expansión térmica negativa de la mezcla EPH - biocarbón de café al 3 %



La preparación de la mezcla de PCM y aditivo se llevó a cabo mediante una técnica de impregnación al vacío con un pretratamiento de baño ultrasónico, esto con el fin de garantizar homogeneidad en la mezcla y minimizar la precipitación en la misma. Para ello, el primer paso fue establecer el peso total de la cera (4 kg) y así poder añadir la cantidad de masa que representa cada porcentaje del aditivo. Luego, se mezclaron 40 g de biocarbón en 200 ml de EPH totalmente líquida en un Erlenmeyer con salida lateral, para posteriormente pasar por un baño ultrasónico durante 20 minutos a una temperatura de 80 °C. En la tercera etapa se agitó a una temperatura por encima del punto de fusión al tiempo que se mantenía una baja presión en el recipiente (50 kPa). La preparación de la mezcla de EPH y biocarbón de cáscara de coco se realizó en tres ciclos los descritos anteriormente, donde al finalizar cada uno de los ciclos se adicionaba en la cera restante contenida en refractarias bajo las mismas condiciones de temperatura por medio de una agitación manual durante 5 minutos. En cambio, para la preparación de la mezcla de EPH y biocarbón de café se realizó en un solo ciclo. Cabe mencionar que el procedimiento anteriormente descrito se repitió para cada porcentaje.

Luego de obtener la mezcla aditivo-EPH se procedió a llenar el banco de pruebas para iniciar la cristalización dentro de él. Cuando los sensores ubicados dentro del banco de pruebas registraron una temperatura inferior o igual a 30 °C se empezó la prueba de fusión, esto para cada una de las mezclas.

Es de suma importancia mencionar que la primera prueba ejecutada en el banco de pruebas fue la EPH pura bajo las mismas condiciones previamente establecidas. Esto con el objetivo de establecer un punto de comparación de mejora entre un material de cambio de fase puro y un material de cambio de fase con aditivo orgánico.

4.3 Elaboración de recomendaciones para la implementación de mejoras en el proceso de fusión empleando biocarbones como aditivos

4.3.1 *Estimación de las cantidades de calor almacenado, de coeficientes de transferencia de calor por convección y velocidad de calentamiento*

Para cada prueba de fusión realizada se hizo un análisis de los datos recopilados, donde se empleó un código de programación en MATLAB. Cada prueba generaba aproximadamente 270,000 lecturas de datos. Este enfoque permitió procesar y extraer información relevante de manera eficiente. La elección de MATLAB como lenguaje de programación se basó en su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y su flexibilidad en el procesamiento numérico y estadístico. Por medio de este código se estimó la cantidad de calor almacenado en la EPH-aditivo usando la ecuación 2 y se calcularon también los coeficientes de transferencia de calor por convección en cada sensor usando la ecuación 1. Con base en estos resultados obtenidos y considerando los registros en trabajos anteriores, se analizó por medio de gráficas el efecto de uso de dichos aditivos respecto a la convección natural y la conducción térmica de la mezcla aditivo-EPH.

Las temperaturas registradas en cada sensor exhiben un comportamiento caracterizado por fases distintas de crecimiento y estabilización (Ortega et al., 2017). También se consideró por separado el comportamiento del material en estado sólido, del material en estado líquido, para lo cual se empleó la temperatura de fusión de la estearina de palma hidrogenada como valor frontera. En consideración a esta naturaleza, se procedió a calcular la derivada de la ecuación correspondiente únicamente en la fase de crecimiento (hasta el primer punto de fusión de la EPH), dado que a través de esta derivada se obtiene la velocidad de calentamiento. Finalmente se identifica en cada sensor cuál fue la velocidad máxima alcanzada.

4.3.2 *Elaboración de recomendaciones*

Se elaboró un conjunto de recomendaciones para la implementación de biocarbones en el proceso de fusión de la estearina de palma hidrogenada empleando sistemas carcasa serpentín. Dichas recomendaciones fueron encaminadas a establecer lineamientos generales sobre el porcentaje de uso de material y el tipo de aditivo más adecuado según los requerimientos de la aplicación.

5 Resultados

5.1 Análisis de estabilidad de las muestras

Al completar el proceso de impregnación de cada uno de los biocarbones, el material se dejó en reposo por una hora a 80 °C en bandeja de vidrio. Una vez cumplido el tiempo, se procedió a apagar el horno, dejando el material al interior con el fin de realizar un proceso de solidificación lenta. Para la mezcla de cáscara de coco granulada con estearina de palma hidrogenada se observó que la mezcla no era homogénea (Figura 5) y todo el aditivo se sedimentó. Por esta razón se descartó, ya que, si se llevaba al banco de pruebas, todo el biocarbón iba a estar en la parte inferior, impidiendo realizar un análisis del comportamiento de este en cada sensor.

Figura 5.

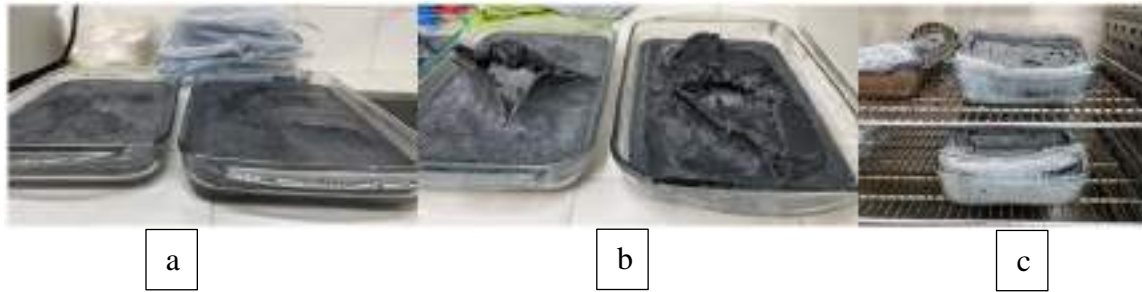
Impregnación al 3 % de biocarbón a partir de cáscara de coco granulada



Previamente, la fase metodológica se menciona la expansión térmica negativa en el biocarbón de café al 3 % cuando pasaba por el proceso de cristalización; dicha expansión también se presentó en el biocarbón al 1 % y 2 %, pero en una menor proporción como se evidencia en la Figura 6.

Figura 6.

Impregnación al 1 % (a), 2 % (b) y 3 % (c) de biocarbón a partir de granos de café pulverizado



Finalmente, la impregnación del biocarbón a partir de cascara de coco al 3, 6 y 9 % no presentó ninguna eventualidad respecto a precipitación acelerada o expansión térmica negativa, pero si se evidencia que la mezcla toma un color negro más intenso en comparación al biocarbón a partir de granos de café como se muestra en la Figura 7.

Figura 7.

Impregnación al 3 % de biocarbón a partir de cáscara de coco pulverizado



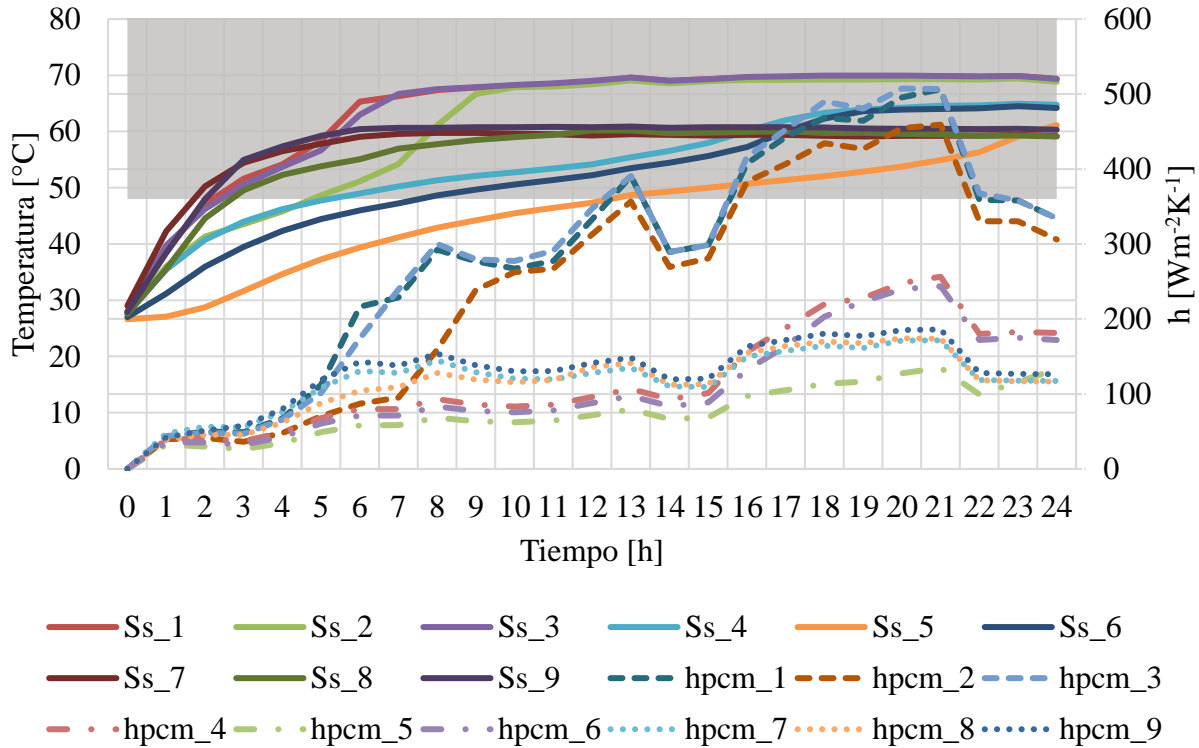
5.2 EPH con biocarbón a partir de cáscara de coco pulverizado

Para el análisis de datos, se optó por examinar, simultáneamente, el perfil de temperatura registrado por los sensores en el banco de pruebas (Ss), representado en el eje vertical izquierdo, junto con el coeficiente de transferencia de calor por convección (hpcm), ubicado en el eje vertical

derecho, ambos en función del tiempo.

Figura 8.

Comportamiento de las temperaturas y coeficientes de transferencia de calor por convección para PCM - Biocarbón coco 3 %



En la Figura 8, se puede apreciar que la mezcla localizada en los sensores más cercanos a las esquinas de la tubería (específicamente Ss_1, Ss_3, Ss_7 y Ss_9) alcanzan el primer punto de fusión de la EPH (48 °C) después de dos horas desde el inicio de la prueba. Además, se nota que, a la quinta hora del experimento, los sensores mencionados previamente registraron el segundo punto de fusión de la EPH (59 °C). Es relevante destacar que, al llegar a las nueve horas de prueba, las temperaturas se estabilizan por encima del segundo punto de fusión, con la excepción de los sensores ubicados en el medio del intercambiador (Ss_4, Ss_5 y Ss_6). En este tipo de pruebas, se espera que los sensores ubicados en la parte superior registren temperaturas más elevadas, debido al fenómeno de convección natural, en donde el PCM fundido tiende a estratificarse de acuerdo con un perfil interno de temperatura en donde el líquido más caliente se ubica en la parte superior del banco de pruebas

(Mahdi et al., 2021).

Por otra parte, con respecto a los valores de h se evidenció que h_{pcm_1} , h_{pcm_2} y h_{pcm_3} presentaron los valores más altos de toda la prueba. Esto se debe a 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., 2016). Además, se observó un incremento significativo en los valores de h_{pcm_1} y h_{pcm_3} después de la quinta hora de la prueba, en concordancia con el rápido aumento de temperatura en estas zonas. Por otro lado, el valor de h_{pcm_2} experimentó un aumento acelerado después de la séptima hora, corroborando la presencia del efecto de la convección natural en el proceso.

Por otra parte, los valores más bajos del coeficiente h se observaron en la zona media del banco de pruebas (h_{pcm_4} , h_{pcm_5} y h_{pcm_6}), siendo h_{pcm_5} la menor de todas. Teniendo en cuenta que esta área presenta un menor contacto con el fluido caloportador, y la mezcla EPH-biocarbón permaneció en estado sólido durante un período prolongado, lo que limitó la conducción efectiva del calor. (Mahdi et al., 2019).

Tabla 4.

Análisis de los valores de coeficiente h y calor al finalizar la prueba según los porcentajes del biocarbón a partir de cáscara de coco pulverizado

PCM	Rango de h [Wm ⁻² K ⁻¹]	Q _{total} [kJ]
EPH	13.17 - 239.78	986.26
EPH-coco 3%	26.40 - 507.34	3375.70
EPH-coco 6%	41.28 - 333.35	3328.30
EPH-coco 9%	22.63 - 271.91	3087.60

En la Tabla 4 se muestran los datos correspondientes al coeficiente h y al calor total transferido al finalizar la prueba de fusión para cada uno de los porcentajes de biocarbón a partir de cáscara de coco pulverizada. Se observa que la mezcla EPH-coco 3 % exhibió el coeficiente h más alto, alcanzando un valor de 507.341 Wm⁻²K⁻¹. Esto representa un incremento del 111.59 % en

comparación con la EPH pura, lo cual se atribuye a una mayor proporción de cambio de fase hacia el estado líquido en comparación con las concentraciones del 6 y 9 %, con un incremento de mejora del 39.02 % y 13.4 % respectivamente. Este resultado concuerda con la literatura existente, que indica que, a menor porcentaje de aditivo utilizado, mayor será la convección natural esperada (Zhou et al., 2024). En relación al calor transferido a la mezcla EPH-porcentaje de biocarbón de coco, se obtuvo una mejora significativa de 242.22, 237.47 y 213.06 % respectivamente. Dicho comportamiento se ha observado en investigaciones previamente realizadas (Yazdani et al., 2022)

5.3 EPH con biocarbón a partir de granos de café pulverizado

La Tabla 5 muestra los datos relativos al coeficiente h y al calor total transferido al concluir la prueba de fusión para distintos porcentajes de biocarbón elaborado a partir de granos de café pulverizado. Se observa que la mezcla EPH-café al 1 % exhibe el coeficiente h más alto, con un valor de $522.071 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, lo que representa un incremento del 117.73 % respecto a la EPH pura. Por otro lado, la mezcla EPH-café al 3 % presenta una mejora en menor medida, con un aumento del 55.21 %. Sin embargo, esta última exhibe la mayor cantidad de calor total transferido, con un aumento del 267.82 % en comparación con la EPH pura, aproximadamente un 80.88 % más que la mezcla EPH-café al 1 %. Se evidencia un comportamiento similar anteriormente expuesto en el análisis de la Tabla 4.

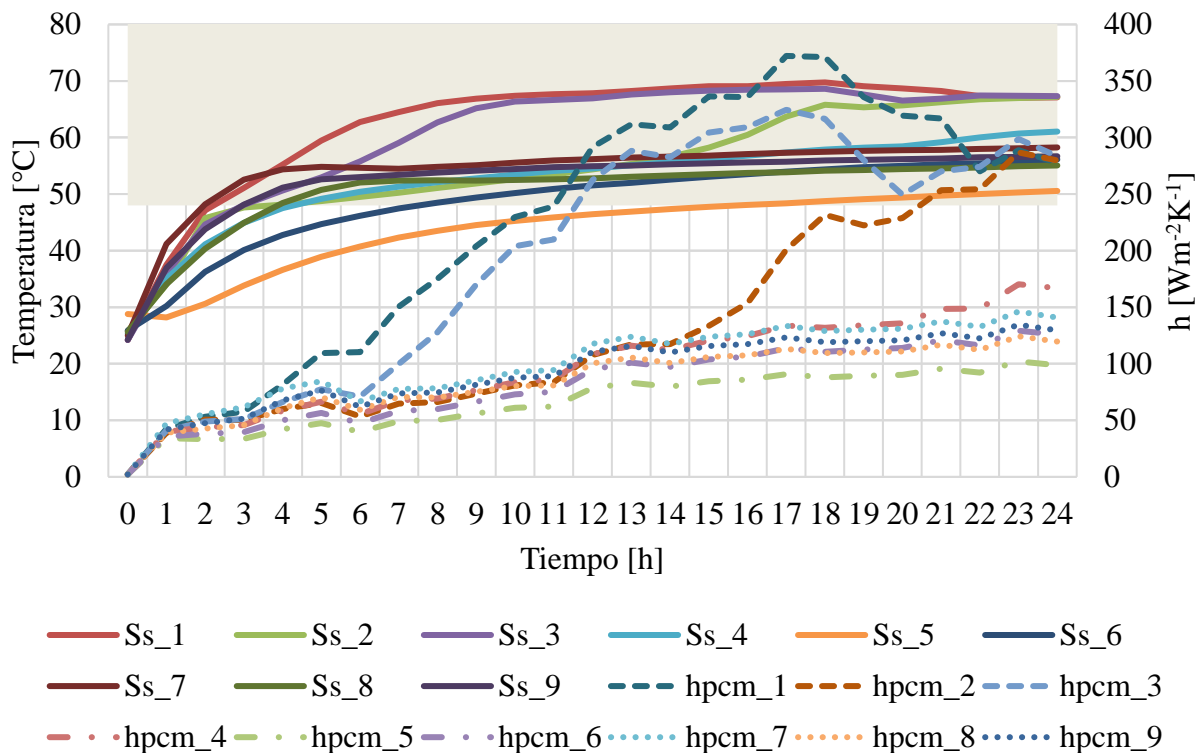
Tabla 5.

Análisis de los valores de coeficiente h y calor total al final la prueba según los porcentajes del biocarbón a partir de granos de café pulverizado

PCM	Rango de h [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$]	Q_{total} [kJ]
EPH	13.17 – 239.78	986.26
EPH-café 1%	44.93 – 522.07	2830.00
EPH-café 2%	17.15 – 181.59	2940.50
EPH-café 3%	33.44 – 372.16	3627.70

Figura 9.

Comportamiento de las temperaturas y coeficientes de transferencia de calor por convección para PCM - Biocarbón a partir de granos de café al 3 %



En la Figura 9 se muestra que, luego de 4 horas, las temperaturas registradas por los sensores Ss_1, Ss_2, Ss_3, Ss_4, Ss_7, Ss_8 y Ss_9 exceden los 48 °C. Después de transcurridas 12 horas, se observa una estabilización de las temperaturas por encima del punto de fusión, a excepción de la temperatura en el centro del banco de pruebas, Ss_5, la cual requiere de 16 horas aproximadamente para alcanzar una temperatura superior a este punto. Es notable que Ss_1, Ss_2 y Ss_3 exhiben las temperaturas más elevadas, con un pico registrado de 69.75 °C. Se verifica que este comportamiento es congruente con el análisis realizado sobre biocarbón elaborado a partir de cáscara de coco pulverizada al 3 %.

Con el propósito de analizar el comportamiento del coeficiente h a lo largo de la prueba, se decidió utilizar como referencia el patrón descrito en la figura 8, respaldando así la información

encontrada en la literatura (Seddegh et al., 2016; Mahdi et al., 2019; Mahdi et al., 2021). De manera similar, los valores más altos de h registrados durante toda la prueba corresponden a hpcm_1, hpcm_2 y hpcm_3. Asimismo, se observa que hpcm_2 es el que requiere más tiempo para alcanzar su punto máximo, como se demostró en la evaluación del biocarbón a partir de cáscara de coco al 3 %. Por otro lado, en la región central del banco de pruebas (hpcm_4, hpcm_5 y hpcm_6), se registran los valores más bajos y estables de h durante toda la prueba, siendo hpcm_5 el más bajo de todos ellos.

5.4 Análisis comparativo de los resultados experimentales para la formulación de recomendaciones

La investigación realizada se centró en el estudio de la influencia de los biocarbones derivados de cáscara de coco y granos de café como aditivos a la Estearina de Palma Hidrogenada, con el propósito de mejorar su conductividad térmica. Se inició con la observación del tiempo requerido por los sensores para alcanzar el primer punto de fusión. Este parámetro proporciona información sobre la rapidez con la que la mezcla experimenta incrementos en la temperatura, en función de las concentraciones respectivas evaluadas de los dos tipos de biocarbones. Esta característica está directamente vinculada al comportamiento de la conductividad térmica durante las pruebas de fusión llevadas a cabo.

Tabla 6.*Tiempo que tardan los sensores en reportar temperaturas superiores a 48 °C*

	PCM	Ss_1	Ss_2	Ss_3	Ss_4	Ss_5	Ss_6	Ss_7	Ss_8	Ss_9
T > 48 °C	EPH	2	4	2	3	8	5	1	2	1
	EPH-Coco 3%	2	5	2	5	12	8	2	3	2
	EPH-Coco 6%	2	7	3	5	16	10	3	6	3
	EPH-Coco 9%	2	6	3	4	16	8	1	4	3
	EPH-Café 1%	2	1	2	5	10	7	2	3	2
	EPH-Café 2%	2	6	3	4	14	9	1	3	2
	EPH-Café 3%	2	4	3	4	16	7	2	4	3
	EPH	4	6	5	9	12	10	2	3	2
T > 59 °C	EPH-Coco 3%	5	8	5	15	23	17	6	10	5
	EPH-Coco 6%	4	11	5	23	-	-	-	-	-
	EPH-Coco 9%	7	11	9	-	-	-	16	-	-
	EPH-Café 1%	6	9	6	13	17	15	6	7	5
	EPH-Café 2%	5	14	7	-	-	-	5	-	5
	EPH-Café 3%	5	15	7	21	-	-	-	-	-
	EPH	4	6	5	9	12	10	2	3	2

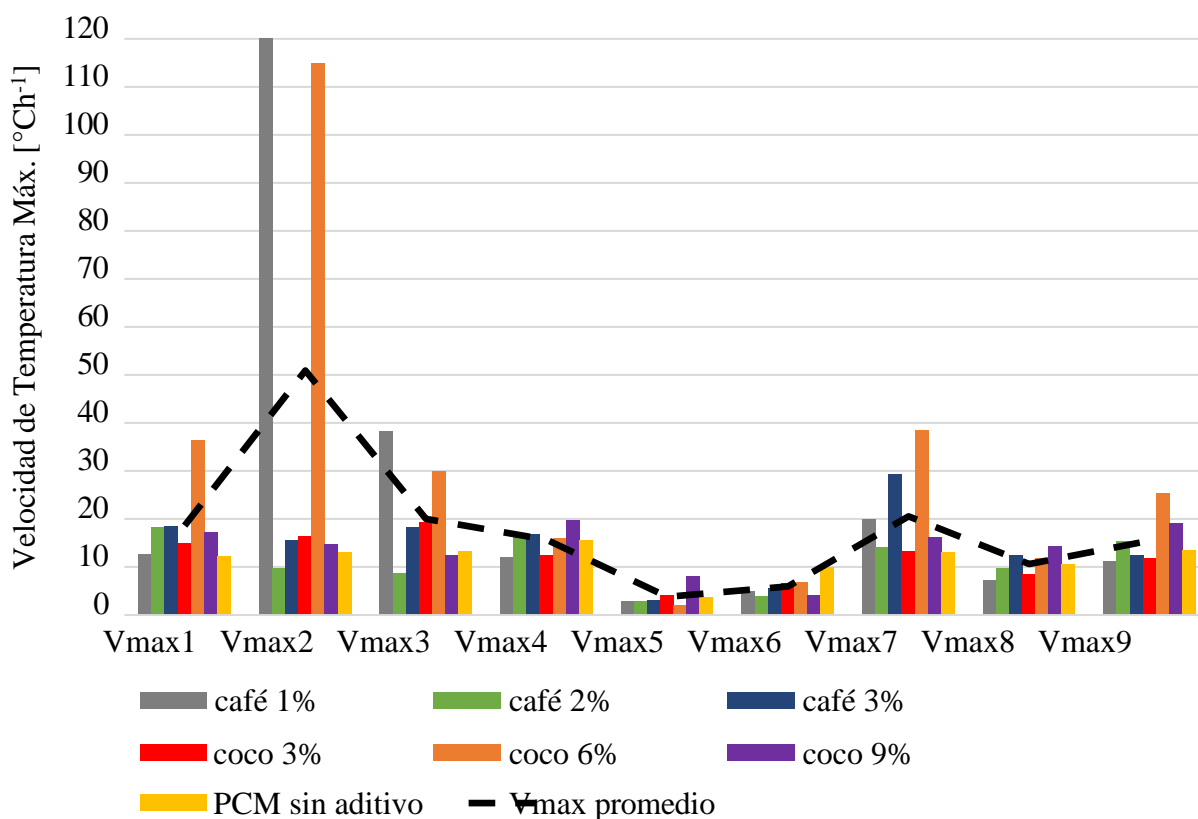
En la Tabla 6 se observó que para alcanzar la temperatura de fusión en todo el banco de pruebas se requirieron 8 horas de funcionamiento continuo para la EPH pura. Este hallazgo reafirma lo analizado anteriormente, donde se identificó que el sensor 5 fue el que más tiempo tardó en alcanzar la temperatura deseada. En el caso de la mezcla EPH-biocarbón derivada de cáscara de coco, se registraron tiempos iguales o superiores para alcanzar el mismo punto de temperatura. Es importante destacar que el sensor 5 mostró una diferencia significativa en este aspecto, con tiempos de 12 a 16 horas. Al observar la mezcla EPH-biocarbón a partir de granos de café, únicamente se observó una mejora en el tiempo requerido para alcanzar el primer punto de fusión en el sensor 2 con un 1 % de café. Sin embargo, los demás sensores mantuvieron un comportamiento similar al descrito previamente para el otro tipo de biocarbón, requiriendo entre 10 y 16 horas de

funcionamiento para alcanzar los 48 °C en el sensor 5.

A la luz de la información obtenida en la literatura, el análisis realizado no proporciona conclusiones definitivas. Se esperaba una reducción en el tiempo necesario para alcanzar un incremento en la temperatura, lo cual no se observó. Por este motivo, se llevó a cabo un análisis de las velocidades máximas de temperatura en cada sensor para cada tipo de biocarbón y sus respectivos porcentajes. La Figura 10 representa los datos recopilados sobre la velocidad máxima de incremento de temperatura, situada en el eje vertical. Este parámetro se analiza con respecto a la posición de los sensores en el banco de pruebas, que se encuentra en el eje horizontal. Además, se compara con la EPH pura y las distintas mezclas de EPH con aditivos.

Figura 10.

Comparación de velocidades máximas de temperaturas en cada sensor de cada tipo de biocarbón empleado



En la Figura 10 se observó que las mezclas de EPH con un 3 % de café y un 3 % de coco

mostraron valores cercanos al promedio de la velocidad máxima registrada en la mayoría de los sensores, con cambios menos pronunciados entre ellos. Sin embargo, se debe destacar que esta tendencia se vio alterada en el sensor 2, donde se registraron las temperaturas más altas debido al gradiente de densidad, ya que, provoca una convección impulsada por la flotabilidad y obliga al fundido a ascender en el banco. Esto puede conducir a una estratificación de la temperatura en el intercambiador, donde la región superior está dominada por el calor sensible y la parte inferior de este se encuentra dominada por calor latente (Rolka et al., 2021). Es importante recordar que la evaluación de este parámetro se llevó a cabo durante la fase de calentamiento, es decir, antes de que los sensores alcanzaran el primer punto de fusión de la EPH.

Considerando los datos presentados en la Tabla 6 y la Figura 10, se optó por llevar a cabo una comparación directa entre la EPH puro y las mezclas con un 3 % de coco y un 3 % de café en el sensor 5. Esta elección se fundamenta en el hecho de que este sensor exhibe los tiempos más prolongados y las velocidades más bajas, además, las mencionadas mezclas mostraron un comportamiento consistente a lo largo de todo el estudio recalando que poseen el mismo porcentaje de aditivo.

Tabla 7.
Comparación PCM - Biocarbón al 3 %

PCM	hpcm_5 [W/m ² K]	Vmax5 [°C/h]	Tiempo [h] Ss_5 > 48°C	Tiempo [h] Ss_5 > 59°C	Q _{total} [kJ]
EPH	13.17 - 66.12	3.61	8	12	986.26
EPH- coco 3%	26.40 - 134.84	4.15	12	23	3375.70
EPH- café 3%	33.44 - 102.07	2.96	16	-	3627.70

Basándonos en los datos presentados en la Tabla 7, donde se detallan los coeficientes h, velocidades máximas y tiempos requeridos para registrar temperaturas superiores a 48 °C en el

sensor 5, junto con el calor de transferencia total de la EPH pura y las mezclas con un 3 % de coco y un 3 % de café. Se destacaron dos aditivos: EPH-coco 3 % y café 3 %. El biocarbón derivado de la cáscara de coco al 3 % predominó, ya que alcanzó un coeficiente de convección local máximo de $134.844 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ y mostró un incremento del 103.91 % en comparación con el biocarbón de granos de café al 3 %, en la zona central del banco de pruebas. Además, este aditivo demostró una velocidad máxima de incremento de temperatura mayor, con $4.157 \text{ }^\circ\text{Ch}^{-1}$. Asimismo, el biocarbón de coco requirió 4 horas menos para alcanzar su punto de fusión. Sin embargo, el biocarbón de granos de café al 3 % mostró un mayor calor total transferido, aunque solo un 25.6 % más que el derivado de coco al 3 %.

6 Conclusiones

La adición de biocarbones obtenidos a partir de cáscara de coco y granos de café logró triplicar la cantidad de calor transferido a la estearina de palma hidrogenada, pasando de valores de menos de 1000 kJ a más de 3000 kJ durante las 24 horas de los experimentos. Esta mayor transferencia de calor se ve evidenciada también en los mayores valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección en donde se registraron valores hasta más de un 100 % superiores en comparación con los registrados cuando se empleó estearina de palma hidrogenada sin aditivo de biocarbón. Se demuestra entonces la viabilidad de emplear biocarbones obtenidos a partir de cáscara de coco o granos de café como aditivos para la mejora en la conductividad térmica de la estearina de palma hidrogenada e incluso extenderse a PCM de naturaleza similares.

El tamaño de partícula es un factor determinante en la estabilidad de la mezcla PCM aditivo por lo que se descarta el uso de biocarbones con tamaños de partícula de 2.5 mm o superiores. Por otro lado, en cuanto a la mezcla EPH-biocarbón pulverizado, se registró una mejora significativa en el coeficiente de convección local (h) en todas las muestras, sin importar su origen. La mezcla EPH-coco 9 % mostró el menor porcentaje de mejora (13.40 %), aunque esto no se desarrolló como se esperaba, ya que el tiempo necesario se duplicó para alcanzar el punto de fusión, a pesar de buscar reducirlo. Sin embargo, se encontró que el calor total transferido mejoró en un 213.06 %. En conclusión, se puede asegurar que existe una impregnación homogénea a medida que el tamaño de la partícula disminuye, también existe una relación inversa entre la cantidad de aditivo utilizado y el coeficiente de convección, que se relaciona directamente con el incremento en el tiempo necesario para alcanzar el punto de fusión. Además, la cantidad de aditivo es proporcional al conflicto entre la conductividad térmica, que es mejor en el estado sólido, y la convección natural, que predomina en el estado líquido de la mezcla. Así mismo, esta mayor conducción de calor pudo incrementar las

pérdidas de calor al ambiente, razón por la cual se explica los mayores tiempos requeridos para que el sensor 5 alcanzara la temperatura de fusión en todas las pruebas.

Se sugiere realizar la impregnación del aditivo utilizando el 100 % de cera en lugar de hacerlo por secciones. Además, se recomienda mejorar el sistema de aislamiento en el banco de pruebas para reducir las pérdidas ambientales y garantizar un entorno de prueba controlado. Es esencial contar con un equipo que mantenga un flujo constante del fluido caloportador y controle su temperatura de manera precisa. Asimismo, se propone implementar un método más eficiente para el llenado y vaciado del intercambiador, con el fin de evitar pérdidas de material. Estas recomendaciones se formulan considerando los recursos limitados disponibles en el laboratorio para llevar a cabo la presente investigación.

Finalmente, se sugiere utilizar el biocarbón derivado de cáscara de coco pulverizado con un porcentaje del 3 % en peso como aditivo para mejorar la conductividad térmica. Esta recomendación se basa en que esta mezcla logró el coeficiente h más alto ($507.341 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) y la velocidad máxima de temperatura más elevada en la zona media ($4.157 \text{ }^\circ\text{Ch}^{-1}$). Además, almacenó un 242.22 % más de calor que la EPH pura.

Referencias Bibliográficas

- Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal Energy Storage Materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693–706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>
- Hekimoğlu, G., Sarı, A., Önal, Y., Gencil, O., Tyagi, V. V., & Aslan, E. (2022). Utilization of waste apricot kernel shell derived-activated carbon as carrier framework for effective shape-stabilization and thermal conductivity enhancement of organic phase change materials used for thermal energy storage. *Powder Technology*, 401, 117291. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117291>
- Jeon, J., Park, J. H., Wi, S., Yang, S., Ok, Y. S., & Kim, S. (2019). Characterization of biocomposite using coconut oil impregnated biochar as latent heat storage insulation. *Chemosphere*, 236, 124269. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.239>
- Kumar, R., Lee, D., Ağbulut, Ü., Kumar, S., Thapa, S., Thakur, A., Jilte, R. D., Saleel, C. A., & Shaik, S. (2024). Different Energy Storage Techniques: Recent advancements, applications, limitations, and efficient utilization of Sustainable Energy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(5), 1895–1933. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12831-9>
- Liu, S., Peng, S., Zhang, B., Xue, B., Yang, Z., Wang, S., & Xu, G. (2022). Effects of biochar pyrolysis temperature on thermal properties of polyethylene glycol/biochar composites as SHAPE-stable biocomposite phase change materials. *RSC Advances*, 12(16), 9587–9598. <https://doi.org/10.1039/d1ra09167k>
- Lojo-Lendoiro, S., Rovira, & Morales Santos. (2023). Green Radiology: Cómo desarrollar una radiología sostenible. *Radiología*. <https://doi.org/10.1016/j.rx.2023.06.007>
- López, A. R., Krumm, A., Schattenhofer, L., Burandt, T., Montoya, F. C., Oberländer, N., & Oei, P.-Y. (2020). Solar PV generation in Colombia - a qualitative and quantitative approach to analyze the potential of solar energy market. *Renewable Energy*, 148, 1266–1279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.066>
- Mahdi, M. S., Hasan, A. F., Mahood, H. B., Campbell, A. N., Khadom, A. A., Karim, A. M., & 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>

- 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*, 117079. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117079>
- Ortega Quintana, F. A., Álvarez, H., & Botero Castro, H. A. (2017). Enfrentando El Modelado de bioprocesos: Una Revisión de las metodologías de modelado. *Revista ION*, *30*(1), 73–90. <https://doi.org/10.18273/revion.v30n1-2017006>
- 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), 716. <https://doi.org/10.3390/en14030716>
- Rolka, P., Przybylinski, T., Kwizinski, R., & Lackowski, M. (2021). The heat capacity of low-temperature phase change materials (PCM) applied in thermal energy storage systems. *Renewable Energy*, *172*, 541–550. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.038>
- Seddegh, S., Wang, X., & Henderson, A. D. (2016). 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>
- Shaikh, H. I., Siddapureddy, S., & Prabhu, S. V. (2023). Effect of jet plate thickness on the local heat transfer coefficient with multiple air jet impingement. *Applied Thermal Engineering*, *229*, 120517. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120517>
- Tahan Latibari, Sara., & Sadrameli, S. M. (2018). Carbon based material included-shaped stabilized phase change materials for sunlight-driven energy conversion and storage: An extensive review. *Solar Energy*, *170*, 1130–1161. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.007>
- 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>
- Yan, Q., Ma, C., & Wang, W. (2021). Study on the effect of different additives on improving the thermal conductivity of organic PCM. *Phase Transitions*, *95*(1), 80–91. <https://doi.org/10.1080/01411594.2021.1998496>
- Yazdani, M. R., Lagerström, A., & Vuorinen, V. (2022). Simultaneous effect of biochar-additive and lightweight heat exchanger on phase change material for low-grade thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, *55*, 105478. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105478>

Yoo, J., Chang, S. J., Wi, S., & Kim, S. (2019). Spent coffee grounds as supporting materials to produce bio-composite PCM with natural waxes. *Chemosphere*, 235, 626–635. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.195>

Zhou, X., Wang, L., Naskar, A. K., & Liu, X. (2024). Thermal performance of phase change materials with anisotropic carbon fiber inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 222, 125162. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.125162>

Apéndices

Apéndice A

Ficha técnica biocarbón a partir de cáscara de coco granulado



CARBÓN ACTIVADO GRANULAR

IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

SUQUIN SAS

www.suquin.com.co

Bucaramanga/Santander

Calle 31 N° 20-43

Teléfonos: 6335068, 6978212

1. CARACTERÍSTICAS

Este carbón activado granular es diseñado específicamente para la recuperación de cianuros de oro y plata en circuitos de recuperación de este metal. Se fabrica a partir de concha de coco, materia prima con la que se obtiene la máxima dureza disponible en el mercado. Esto es fundamental ya que se minimiza la erosión del carbón, evitando así, pérdidas valiosas del producto adsorbido. Tiene una gran área superficial compuesta por micro poros cuyo tamaño es el apropiado para retener los complejos metálicos mencionados.

2. PROPIEDADES

Parámetros	Especificaciones	Método de Prueba
Base	Carbón de Cáscara de Coco	
Apariencia	Granulo Negro e Irregular	
Tamaño de Partícula *Tamaño Máximo (+3.5mm) *Tamaño Mínimo (-1.7mm)	Malla 6x12 3% (Máx.) 1% (Máx.)	ASTM D2862
Valor de Yodo	1150 mg/gm (Min.)	ASTM D4607
CTC	60% (Min.)	ASTM D3467
Densidad Aparente	0.490 - 510 gm/vcc	ASTM D2854
Dureza	98% (Min.)	ASTM D3802
Humedad	5% (Máx.)	ASTM D2867
Ceniza	3% (Máx.)	ASTM D2866
pH	9-11	ASTM D3838
Plaquetas	7% (Máx.)	
Tamaño medio de Partícula	2.5 mm (Min.)	

Apéndice B

Ficha técnica biocarbón a partir de cáscara de coco pulverizado

SUQUIN S.A.S.
MATERIAS PRIMAS A TU ALCANCE. ¡QUÉ NADA TE LIMITE!

FICHA TÉCNICA
CARBÓN ACTIVADO PULVERIZADO

633 5068 - 697 8212
calidad@suquin.com.co
www.suquin.com.co
Calle 31 No. 20-43
Bucaramanga, Santander.

RECOMENDACIONES BÁSICAS

SUQUIN S.A.S. no garantiza el uso del producto en una aplicación distinta para el cual fue diseñado.

ALMACENAMIENTO

Se recomienda guardar en envase cerrado, en un lugar fresco y seco, alejado de la luz y la humedad.

PROPIEDAD	VALOR
NOMBRE	Carbón activado pulverizado
COLOR	Negro
OLOR	Inodoro
HUMEDAD (AL EMPACAR) [%]	8 máx.
NÚMERO DE YODO [mg I ₂ /g]	500 mín.
DENSIDAD APARENTE [g/cm ³]	0.25 - 0.45
PASA MALLA 100 [%]	99 mín.
PASA MALLA 200 [%]	95 mín.
PASA MALLA 325 [%]	90 mín.

Apéndice C

Molino y cuerpos molidores empleados para pulverizar en biocarbón a partir de granos de café



Apéndice D

Tamizado biocarbón a partir de granos de café pulverizado



Apéndice E

Proceso de impregnación al vacío del biocarbón a la EPH



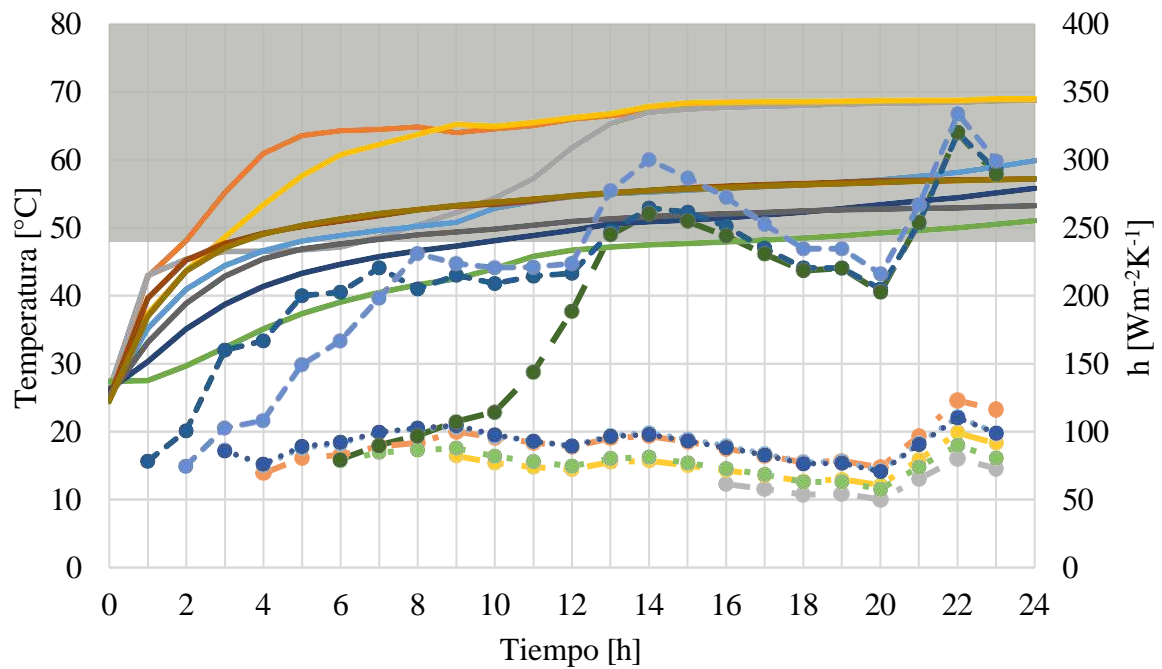
Apéndice F

Proceso de fusión EHP – Biocarbón



Apéndice G

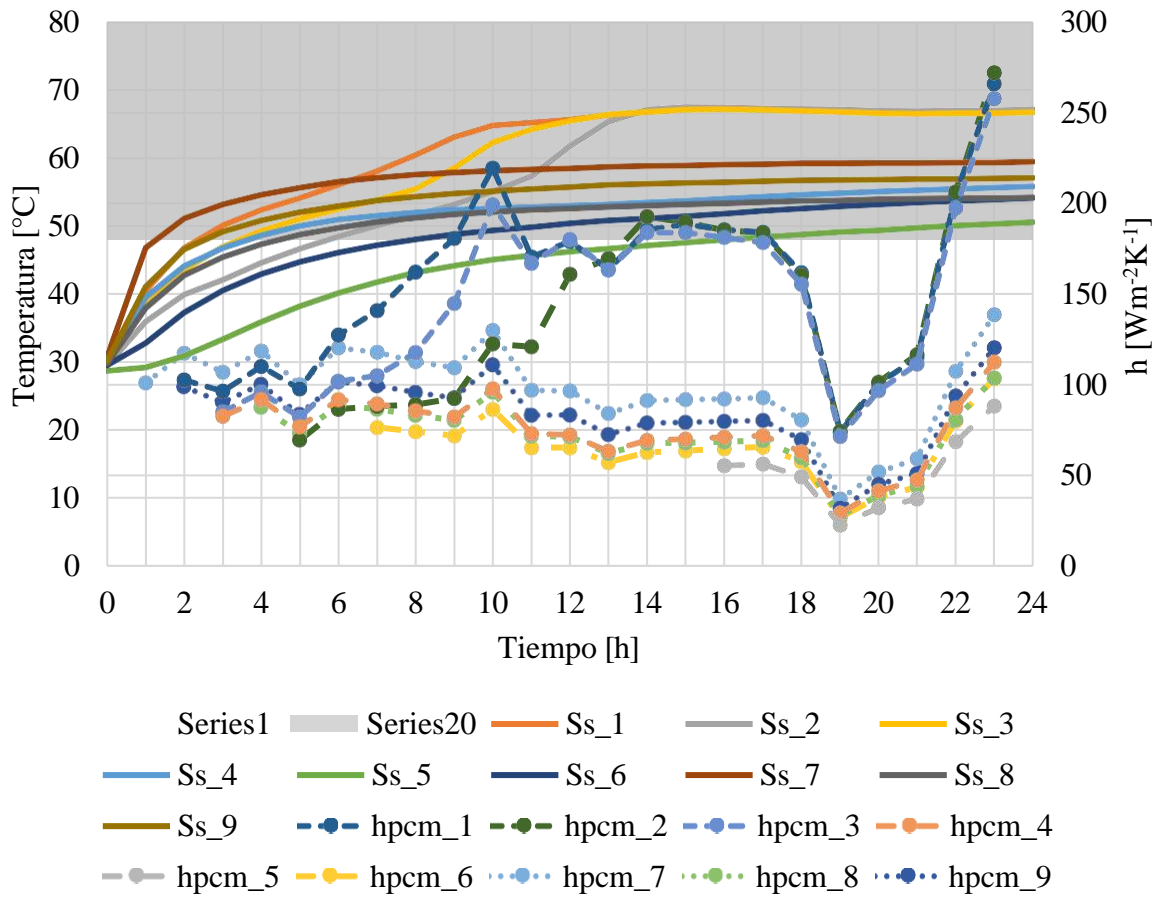
Comportamiento de las temperaturas y coeficientes de transferencia de calor por convección para PCM – Biocarbón coco 6 %



- Ss_1 Ss_2 Ss_3 Ss_4 Ss_5
- Ss_6 Ss_7 Ss_8 Ss_9 hpcm_1
- hpcm_2 hpcm_3 hpcm_4 hpcm_5 hpcm_6
- hpcm_7 hpcm_8 hpcm_9

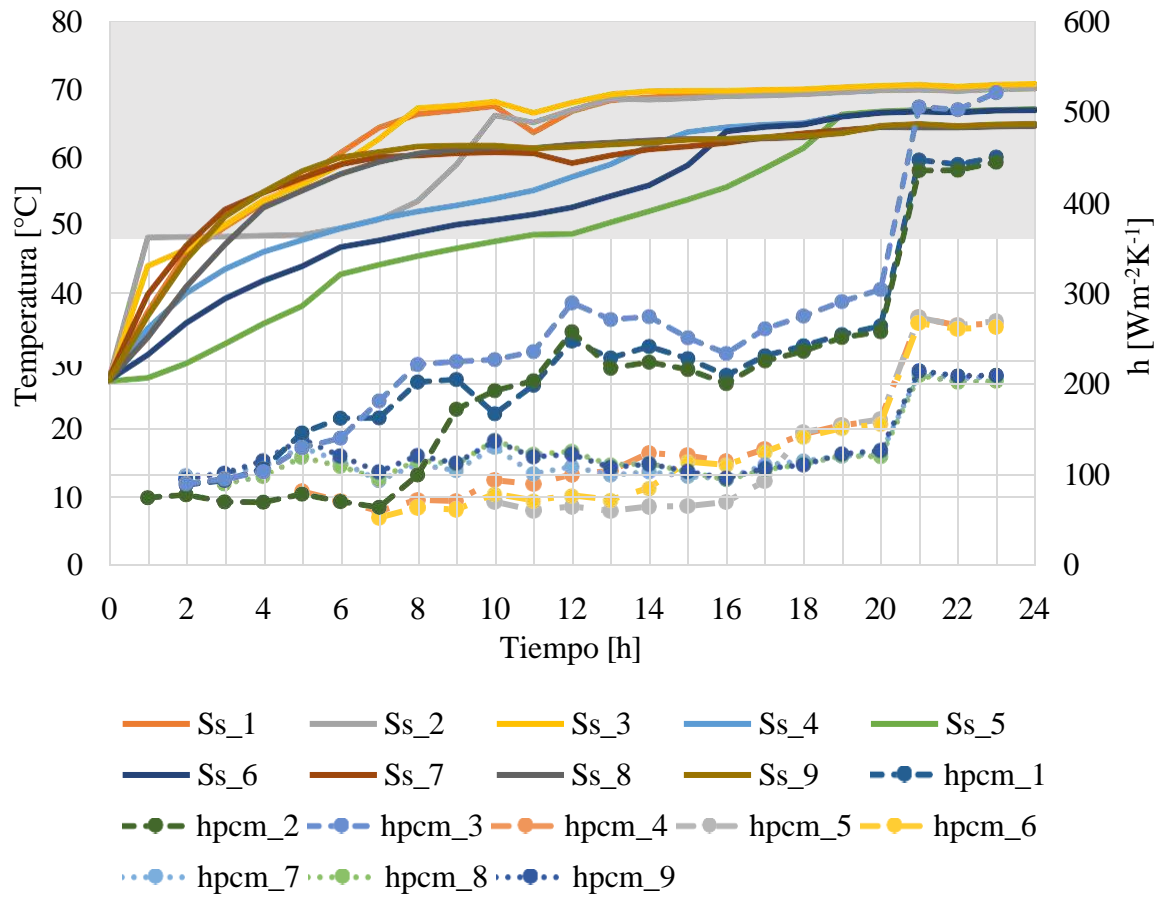
Apéndice H

Comportamiento de las temperaturas y coeficientes de transferencia de calor por convección para PCM – Biocarbón coco 9 %



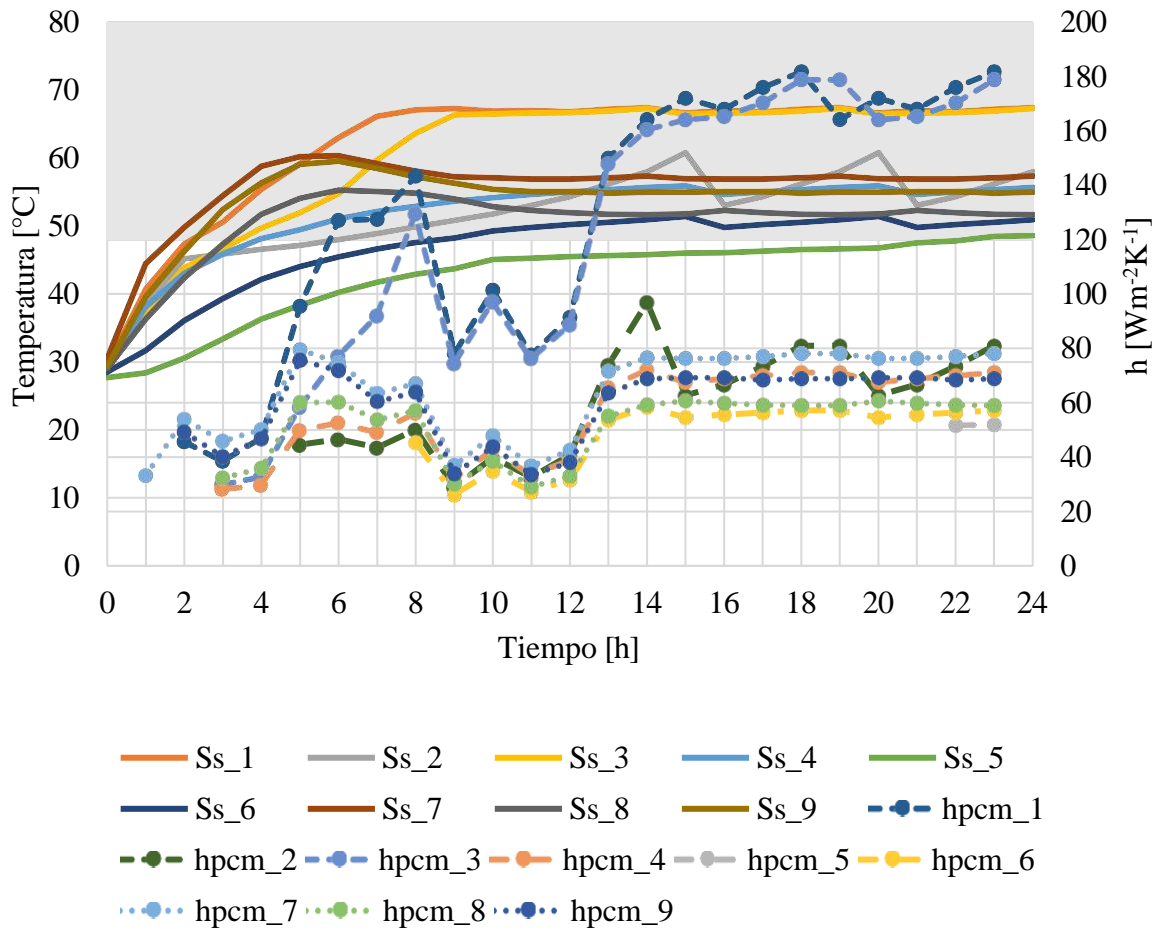
Apéndice I

Comportamiento de las temperaturas y coeficientes de transferencia de calor por convección PCM – Biocarbón a partir de granos de café 1 %



Apéndice J

Comportamiento de las temperaturas y coeficientes de transferencia de calor por convección PCM – Biocarbón a partir de granos de café 2 %



Apéndice K

Estabilidad muestras EPH – Biocarbón

