

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO DE SECADORES
SOLARES PROTOTIPO CON Y SIN PCM A PARTIR DE EXPERIMENTACIÓN
SIMULTÁNEA EN CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN**

YOIMAR IGNACIO MADERA CAVADIA

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA**

2023

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RENDIMIENTO DE SECADORES
SOLARES PROTOTIPO CON Y SIN PCM A PARTIR DE EXPERIMENTACIÓN
SIMULTÁNEA EN CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN**

YOIMAR IGNACIO MADERA CAVADIA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

MARIO ANDRÉS PALACIO VEGA

Magister en Ingeniería Mecánica

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA**

2023

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, le doy gracias a Dios por brindarme sabiduría, paciencia y fortaleza para continuar en este proceso.

A mis padres, hermanos, pareja y amigos, porque gracias a su estímulo y apoyo incondicional he logrado cada una de las metas trazadas en este camino.

Y, en igual medida agradezco al docente Mario Andrés Palacio Vega por su paciencia y guía durante este camino, y a Camilo Ramírez por su colaboración durante la elaboración de la fase experimental de este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO TEÓRICO/ESTADO DEL ARTE	3
1.1. Marco teórico	3
1.2. Estado del arte	3
2. METODOLOGÍA	9
2.1. Establecimiento de la plataforma experimental	9
2.1.1. Colector solar	9
2.2. Protocolo de experimentación.	11
2.3. Análisis comparativo	13
3. RESULTADOS	14
3.1. Plataforma experimental	14
3.1.1. Material de cambio de fase	14
3.1.2. Instrumentación	16
3.1.3. Montaje	18
3.2. Experimentación	19
3.3. Análisis comparativo y discusión	25
3.3.1. Condiciones de operación del análisis	25
3.3.2. Análisis experimental	26
4. CONCLUSIONES	30
5. PUBLICACIONES	32
6. REFERENCIAS	33

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades térmicas de los componentes principales	15
Tabla 2. Instrumentos y variables medidas	16
Tabla 3. Especificaciones de los sensores de temperatura utilizados por la unidad de adquisición	18

Lista de Figuras

Figura 1. Representación esquemática de los colectores solares	10
Figura 2. Esquema de colector solar con PCM	15
Figura 3. Estación meteorológica	17
Figura 4. Unidad de adquisición de datos	18
Figura 5. Colectores solares y especificación de cada una de sus partes	19
Figura 6. Lugar estación meteorológica	20

Lista de Gráficas

Gráfica 1. Temperatura inicial	20
Gráfica 2. Cambio de la radiación solar obtenida	21
Gráfica 3. Temperatura de cubierta de vidrio sin PCM	21
Gráfica 4. Temperatura de salida del canal superior sin PCM	22
Gráfica 5. Temperatura de salida del canal inferior sin PCM	22
Gráfica 6. Temperatura de placa absorbedora sin PCM	22
Gráfica 7. Temperatura del fondo del colector sin PCM	23
Gráfica 8. Temperatura de cubierta de vidrio con PCM	23
Gráfica 9. Temperatura de salida del canal superior con PCM	23
Gráfica 10. Temperatura de salida inferior del colector con PCM	24
Gráfica 11. Temperatura superior de la cubierta del colector con PCM	24
Gráfica 12. Temperatura inferior de la cubierta del colector con PCM	24
Gráfica 13. Temperatura del fondo del colector con PCM	25
Gráfica 14. Radiación y temperatura ambiente	26
Gráfica 15. Velocidad del viento	26
Gráfica 16. Temperatura en cubierta de vidrio	27
Gráfica 17. temperatura de la placa absorbedora	28
Gráfica 18. Temperatura de salida	29
Gráfica 19. Transferencia de calor útil con y sin PCM	29

RESUMEN

La presente investigación pretende evaluar de forma comparativa el rendimiento de secadores solares prototipo con y sin PCM a partir de experimentación simultánea en condiciones reales de operación. Se utilizó una metodología de tipo cuantitativa con un alcance exploratorio. Los resultados encontrados mostraron importantes diferencias de temperatura entre el colector con PCM en comparación con el colector sin PCM, este problema se puede atribuir a la baja conductividad del PCM que crea un efecto de aislamiento que provoca un aumento de temperatura en la parte superior de la placa absorbente, lo que genera temperaturas promedio de salida más altas. Se pudo concluir que el PCM es una solución potencial al problema de la intermitencia intrínseca del suministro de energía solar, sin embargo, se deben abordar investigaciones adicionales en nuevos materiales de almacenamiento, especialmente en materia de optimización de propiedades térmicas para proporcionar una operación continua para estas aplicaciones de calentamiento de aire.

Palabras clave: Material de cambio de fase, Secado solar, Conductividad térmica.

INTRODUCCIÓN

El sol es la fuente que proporciona mayor energía a la tierra, con el fin de aprovechar esta energía, se han desarrollado una gran cantidad de instrumentos. Teniendo en cuenta lo anterior, y que las condiciones climáticas y ubicación de los departamentos de Córdoba y Atlántico permiten obtener cantidades considerables de energía solar durante el día, es posible afirmar que en estas zonas existe un elevado potencial de radiación solar.

Las investigaciones que se han desarrollado sobre secadores solares, los cuales a través de la energía solar y un sistema recolección pueden aprovechar esta energía para secar o deshidratar, son recientes. Sin embargo, aún existen nuevos materiales con los cuales esta técnica se podría mejorar, por ejemplo, el uso de los materiales de cambio de fase (PCM) para el secado de alimentos.

Los estudios realizados con materiales de cambio de fase (PCM) son limitados y con poca experimentación en campo, algunos experimentos que se han realizado con este material y su comportamiento a partir de diferentes variables, tanto de ambiente, como en la geometría del objeto que almacena el PCM han arrojado resultados favorables los cuales indican que es un material almacenador de calor. Por otro lado, el aprovechamiento de los materiales de cambio de fase es nuevo en este campo y más aun utilizando sistemas prototipo como testigo para la experimentación.

En algunos de los artículos encontrados solo se trabaja con PCM, y otros con colectores, sin embargo, no se encuentran simultáneamente dos sistemas con igualdad de condiciones, es decir, considerando las condiciones de operación de dos sistemas uno con PCM y un sistema testigo al mismo tiempo.

En esta propuesta se busca evaluar de forma comparativa el rendimiento de secadores solares prototipo con y sin PCM a partir de experimentación simultánea en condiciones reales de operación. **Es decir, se plantea la integración del PCM al**

colector de secado solar con acumulación de energía térmica con el propósito de aumentar las horas efectivas de secado y por consiguiente, disminuir el tiempo de secado total. Por otro lado, se desarrollará un prototipo de secador solar tradicional sin PCM, el cual será usado como sistema testigo para posteriormente describir y estimar el desempeño de cada tecnología.

Para la realización de este proyecto los dos prototipos, tanto el de sistema testigo como el de almacenamiento de energía térmica, estarán en las mismas condiciones estructurales y climatológicas, de este modo los datos obtenidos experimentalmente serán lo más reales y similares en las condiciones presentadas por el ambiente designado para el desarrollo de la investigación, la cual se llevará a cabo en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería, en un lugar donde la humedad y la temperatura no sean afectadas por factores externos al ambiente, para que así la investigación se realice con las condiciones más exactas posibles.

1. Marco teórico/Estado del arte

1.1. Marco teórico

El secado es un proceso que se da mediante liofilización, combustión, entre otros, sin embargo, la mayoría de estos procesos usan energías convencionales tales como la energía eléctrica o gas. Existe un proceso de secado que utiliza energía solar, el cual se denomina secado solar, este es un proceso mediante el cual la energía solar se transfiere al aire, el cual evapora el agua que se encuentra alojada en el producto, generando una disminución de la humedad. Existen diferentes tipos de secado solar: directo, indirecto y mixto.

El secado solar directo ocurre cuando los rayos del sol inciden directamente sobre el producto, evaporando el agua que se encuentra en la superficie y generando una migración de agua desde el interior del producto hasta el exterior, y posteriormente, a la atmósfera. Por otro lado, en el secado solar de tipo indirecto se usan dispositivos para calentar el aire, los cuales se denominan colectores solares. Un colector solar es un dispositivo que transforma la energía por radiación del sol en energía térmica hacia el fluido de trabajo.

El secado solar tiene una gran desventaja sobre los otros fenómenos de secado, esta sería los largos tiempos de duración de secado debido a que su fuente de energía (el sol) solo está disponible entre 8 a 12 horas al día. Para disminuir esta desventaja, se pueden hacer uso de sistema de acumulación de energía térmica mediante materiales de cambio de fase PCM a los colectores solares se les agrega un acumulador de energía térmica de materiales de cambio de fase (PCM).

1.2. Estado del arte

En las investigaciones realizadas a la literatura sobre el secado solar en forma general y de secado solar con uso de materiales de cambio de fase, se encontró la

investigación de Devan et al. (2020), la cual consiste en una cámara de secado con forma cuadrada estilo túnel que contiene ventanas para dar paso al aire del ambiente.

El estudio realizado por Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú (2020) denominado *Design and construction of phase change solar thermal accumulator for a family solar dryer*, consiste en diseñar y construir un acumulador solar térmico mediante el principio de cambio de fase, para optimizar el proceso de secado en un secador solar, en un periodo adicional al cese de la incidencia de la radiación solar. El estudio concluyó que la temperatura del aire a la entrada a la cámara de secado del sistema de acumulación solar con PCM se ha mantenido en el orden de 30 °C, por un periodo adicional de 2 h sin la intervención de la radiación solar. En tanto que, en el secador, que no utiliza el acumulador de cambio de fase, la temperatura decae más rápidamente.

El siguiente, es un trabajo experimental realizado por Solar Energy Center, Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Calicut, Kozhikode, Kerala 673 601, India (Raj et al., 2019). El cual intenta sostener la respuesta térmica del calentador de aire solar de doble paso. Por lo que investiga el papel de la macroencapsulación metálica en el almacenamiento de calor y la recuperación de PCM. Los objetivos son investigar la influencia de la geometría de encapsulación utilizada para el almacenamiento y para Examinar si las unidades discretas permiten una carga y descarga más rápida de cera de parafina orgánica (PCM).

Como finalidad en este trabajo, se obtuvo una eficiencia de encapsulado promedio de 47.2% y 67% respectivamente para rectangulares y cilíndricos, DPSAHS equipado con macroencapsulados, una comparación de rendimiento de DPSAHS con y sin almacenamiento, por otro lado, el trabajo tiene como objetivo apoyar agricultores marginales y subsistentes para hacer frente al secado

inadecuado durante el invierno en el que la luz solar potencial las horas están limitadas a 7 h / día en Calicut (11o32'N, 75o93'E) ubicado en la India peninsular.

El trabajo realizado por Drying rate; Forced convection; Moisture content; Thermal energy storage, (Bhardwaj et al., 2020); Vitamin. Presenta un análisis experimental de un novedoso secador solar indirecto para secar chiles en el Himalaya occidental. Este sistema consiste en tener la chatarra de hierro surtida con gravas se mantiene en la placa absorbente y el aceite de motor, transportado a través del tubo de cobre, se ha aplicado como medio de almacenamiento de calor sensible (SHS) en el colector de aire solar (SAC).

Se ha empleado cera de parafina como material de cambio de fase (PCM) en el compartimento de secado. La evaluación del rendimiento del sistema de secado se ha realizado sobre la base de atributos físicos, térmicos y de calidad. El nivel de humedad de los chiles se reduce a 4,85% desde 86,50% (base húmeda) en 21 h en comparación con 96 h y 150 h mediante el uso de secado solar sin almacenamiento térmico y al sol natural, respectivamente.

Los resultados de este trabajo concluyen que el tiempo de deshidratación se reduce en 78,12% y 86,00% frente al secado realizado sin el uso de SHS y PCM, y sol natural; respectivamente. Con este sistema de secado se ha encontrado mejor el color, textura, pungencia (parámetros sensoriales) y capacidad de rehidratación de los chiles deshidratados. De los resultados experimentales se encontraron vitamina C, capsaicina, caroteno y tiamina de las guindillas 49,25 mg, 0,52%, 341,5 µg y 0,912 mg que fueron 32,25 mg, 0,23%, 217,8 µg y 0,534 mg, en caso de secado al sol natural.

En la investigación de (Swami et al., 2018) sobre la aplicación de Phase Changing Material (PCM) como almacenamiento de energía en el proceso de secado de aire solar tiene un amplio campo de experimentación e investigación. El objetivo básico de la investigación experimental es establecer un secador de aire solar como medio para el secado de pescado, asistido por el material de cambio

de fase, e investigar el efecto del PCM sobre la disponibilidad de calor, la utilización del calor y la cinética de secado del pescado.

Por lo tanto, se realizó una investigación experimental para evaluar el efecto comparativo de dos materiales de cambio de fase que tienen diferentes puntos de fusión. El rango de temperatura y el contenido de humedad son los factores clave en cualquier proceso de secado. La otra perspectiva del uso de PCM es controlar la temperatura dentro del secador, ya que el pescado no puede mantener la temperatura a más de 62 ° C.

Por otro lado, el efecto de la convección natural y forzada sobre el aumento de temperatura explica que el flujo controlado hasta la mitad de la velocidad del soplador que da como resultado una velocidad de aire de 5 m / s da la máxima ganancia de temperatura dentro del secador, en comparación con la convección natural o la convección forzada con la velocidad máxima del soplador que tiene una velocidad de aire de 10 m / s.

Las estadísticas de la experimentación indican que la convección natural es capaz de ganar aproximadamente el 76% de la temperatura deseada.

Para finalizar el análisis estadístico y experimental confirma la mejora del proceso de secado y la disminución sustancial del período de secado. (Swami et al., 2018).

El trabajo realizado por (Shalaby & Bek, 2014) consiste en novedoso diseño de secador solar indirecto (ISD) que utiliza material de cambio de fase (PCM) como medio de almacenamiento de energía fue investigado experimentalmente. El sistema consta de dos calentadores solares de aire idénticos, que secan compartimento, unidades de almacenamiento PCM y un soplador. El ISD se probó sin carga con y sin PCM en una amplia gama de caudales máxicos (0,0664–0,2182 kg / s). Se encuentra que después de usar el PCM, la temperatura del aire de secado es más alta que la temperatura ambiente entre 2.5 y 7.5 C después de la puesta del sol durante cinco horas. por lo menos. Además, los caudales

máxicos de 0,1204 y 0,0894 kg / s dan los valores máxicos del secado. Temperatura cuando el ISD funciona con y sin PCM, respectivamente. El diseño novedoso con éxito mantiene la temperatura deseada durante siete horas consecutivas todos los días.

En el estudio efecto del uso de materiales de cambio de fase (PCM) dentro del colector de placa plana (FPC) en la térmica Se investigó el rendimiento y la eficiencia general de secado del FPC. Se consideraron cuatro posiciones de PCM dentro del colector, y los resultados comparados con el colector sin PCM. Los resultados experimentales implicaron que el consumo energético específico para secar rodajas de tomate se encuentra entre 11,12 y 9,01 MJ / kg.

El tiempo de secado de las rodajas. el uso del colector con PCM en la sección final se redujo aproximadamente en un 21,87%. Basado en la posición de PCM, la eficiencia térmica de FPC aumentó en aproximadamente 5.02% -10.13%. La eficiencia general varió de 21,92% a 25,72% para diferentes posiciones de PCM. La simulación CFD del sistema fue realizada por Ansys 2015, y mostró que el rendimiento térmico del colector podría predecirse con buena precisión. Es más, el resultado de los modelos de regresión polinomial evolutiva aplicados para cada posición del PCM, confirmó esa salida temperatura y eficiencia térmica del colector pronosticadas con una precisión aceptable. Debido al uso de PCM en la sección final del colector, un proceso de secado homogéneo, temperatura normal y secado corto el tiempo resultó. La calidad de las rodajas de tomate secadas por el secador solar fue superior. (Ebrahimi et al., 2021)

El trabajo realizado por (Shalaby et al., 2014) es una recopilación sobre el uso de material de cambio de fase (PCM) como medio de almacenamiento de energía es una de las formas más eficientes de almacenar energía térmica. El almacenamiento de calor latente proporciona una densidad de almacenamiento mucho mayor que el almacenamiento de calor sensible, con una diferencia de temperatura menor entre el almacenamiento y la liberación de calor.

Además, los materiales de cambio de fase proporcionan una temperatura constante y moderada que se necesita para secar suficientemente la mayoría de los cultivos agrícolas. Este artículo revisa el trabajo anterior sobre sistemas de secado solar que implementaron el material de cambio de fase como medio de almacenamiento de energía.

Se concluye que el secador solar con PCM reduce las pérdidas de calor y mejora la eficiencia del sistema. Además, este artículo de revisión resume los métodos anteriores que se han utilizado para mejorar la conductividad térmica del material de cambio de fase utilizado, en particular la cera de parafina, ya que se utiliza comúnmente como medio de almacenamiento en sistemas de secado solar. Se infiere que las fibras de carbono, el grafito expandido, la espuma de grafito y las partículas de alta conductividad térmica pueden mejorar la eficiencia térmica de los dispositivos de energía solar que emplean ceras de parafina como medio de almacenamiento de energía térmica.

2. Metodología

El presente estudio es de tipo cuantitativo con un alcance exploratorio, para su desarrollo se obtuvo información primaria.

La investigación se divide en tres fases:

1. Establecimiento de la plataforma experimental.
2. Protocolo de experimentación.
3. Análisis comparativo.

2.1. Establecimiento de la plataforma experimental

2.1.1. Colector solar

Para este trabajo se utilizó el colector solar con almacenamiento térmico integrado propuesto por Carmona et al (2015), que consiste en un colector placa plana tradicional modificado para albergar contenedores de material de cambio de fase bajo su placa absorbadora.

El colector se compone de sistema de tres carcasas con bisagras que dan acceso a los componentes del dispositivo. La carcasa superior contiene a la cubierta de vidrio y a la cavidad de aire que la separa de la placa absorbadora.

La carcasa intermedia es la que aloja a la placa absorbadora, mientras que en la carcasa inferior alberga la cavidad para ubicar los contenedores de material de cambio de fase. Un sistema de bisagras instalado entre las carcasas permite acceder a los diferentes componentes del colector. Las bisagras entre carcasa superior e intermedia permiten levantar la tapa superior y acceder a la cavidad de aire, a la parte inferior de la cubierta de vidrio y a la parte superior de la placa absorbadora.

De igual forma, las bisagras entre las carcasas intermedias e inferiores permiten levantar las carcasas superiores e intermedias para acceder a la cavidad del PCM.

Que permiten garantizar la hermeticidad del dispositivo, cuenta con broches de seguridad y sellos de goma entre carcasas.

El colector solar propuesto es un calentador de aire de flujo paralelo y paso doble cuya placa absorbente se ha modificado para que estos sean unos contenedores del PCM. Junto con el colector solar propuesto, se opera un prototipo idéntico sin PCM para proporcionar una base de comparación, lo más idéntica posible para estudiar el efecto del almacenamiento latente en contraste con un calentador de aire de flujo paralelo de doble paso tradicional. La representación esquemática de ambos colectores solares se puede observar en la Figura 1. El prototipo diseñado y construido está conformado por componentes comerciales a escala demostrativa para mayor facilidad y uso experimental.

Los colectores solares que se utilizaron constan de una cubierta de vidrio removible, que permite acceder al canal de aire superior y a la placa absorbente o contenedores PCM, en su caso. El PCM se macro encapsuló en una matriz de 8 contenedores metálicos, cada uno de 0,4 m de largo, 0,4 m de ancho y 0,01 m de espesor.

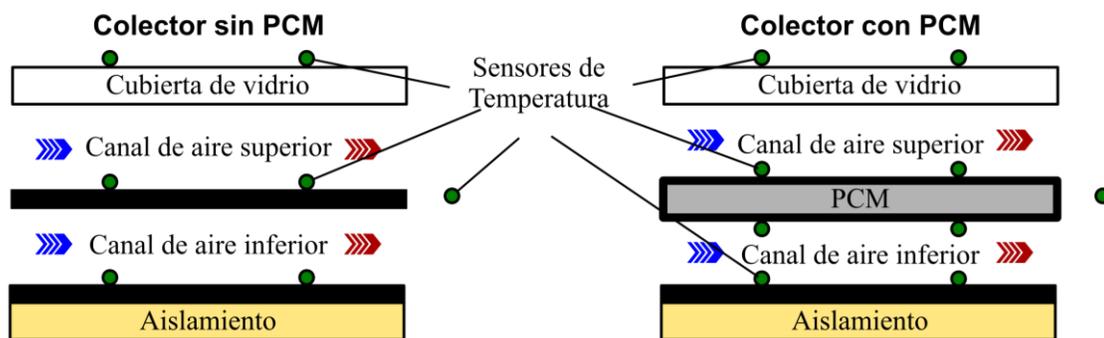


Figura 1. Representación esquemática de los colectores solares

Requerimientos e Instrumentación

Inspirado en lo propuesto por Carmona, el colector solar contó con las siguientes características para la obtención de datos: medidores de temperatura

en diferentes puntos, sobre todo en las áreas de interés como lo son la cubierta de vidrio, la placa absorbadora y los aislamientos, por otro lado, se tuvo un sistema de monitoreo en las condiciones ambientales, el cual incluía en sus capacidades captar la radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente y las condiciones de humedad.

Estas condiciones por monitorear se aplicaron para el colector solar con PCM y a un sistema testigo con las mismas características y dimensiones, de manera que una vez tomados y analizados los datos se pudo ver la diferencia de rendimiento entre los colectores, por lo tanto, el lugar donde se posicionan los equipos que miden las variables fueron los mismos, para asegurarse que estén en igualdad de condiciones monitoreadas. Como también los colectores debieron tener un sistema de inclinación para poderlo orientar respecto a la latitud.

Por otro lado, el material de cambio de fase que se utilizó en el colector contó con una temperatura de cambio de fase que se encuentra en un rango de trabajo ligeramente superior a la temperatura ambiente (debido a que el sistema no cuenta con factores externos los cuales pudiesen alterar su temperatura), con buenas condiciones de almacenamiento térmico, un elevado calor latente de fusión y la mayor conductividad posible.

2.2. Protocolo de experimentación.

Las pruebas experimentales tuvieron un constante monitoreo durante un tiempo indefinido hasta culminar con las pruebas de experimentación. Antes de iniciar la recolección de datos, cada prueba experimental seguía el procedimiento que sigue a continuación:

1. Verificar que todos los equipos estuvieran funcionando correctamente.
2. Insertar la memoria a las unidades de adquisición de datos de temperatura (datalogger).
3. Configurar la unidad de datos de temperatura en intervalos de 1min.

4. Configuración de estación meteorológica de que estuviese sincronizada con la unidad de adquisición de datos y a su vez registre las variables de interés, como lo son: radiación solar, humedad y velocidad del viento

5. Se inicia la recolección de datos.

Posteriormente, en el momento de la recolección de datos, se realizaba el siguiente procedimiento:

1. Se verificaba constantemente la interfaz de los equipos para ver si no habían tenido interrupciones durante la toma de datos, tanto de la estación meteorológica como de las unidades de adquisición de datos de temperatura.

2. Retirar suciedades y obstrucciones en la cubierta de vidrio que disminuirán la radiación solar.

3. Se monitorea y asegura que no haya tenido interrupciones de energía eléctrica, en caso de interrupción se reiniciaba y configuraba nuevamente los equipos para la obtención de datos.

4. Monitoreo a la estación meteorológica para asegurarse que no se haya perdido la conexión entre la estación meteorológica y la unidad de registro.

Por último, al finalizar la recolección de datos:

1. Se pausaba el registro en las unidades de adquisición de datos.

2. Extracción de las memorias.

3. Se descargaba la información a un computador en un archivo separado por comas.

4. Se accedía a la consola de la estación meteorológica.

5. Se exportaban los datos a un computador ya configurado y se extraían los datos de interés (radiación solar, humedad y velocidad del viento), los demás datos arrojados por la estación que no son de interés, no se utilizan.

2.3. Análisis comparativo

En el análisis comparativo se estudiaron diferentes factores al momento de tomar las pruebas tales como, radiación solar, velocidad del viento, temperatura ambiente entre otros. Esto con el fin de tener diferentes factores con los cuales realizar el análisis, sin embargo, las plataformas experimentales, tanto la que se utilizó como prototipo y la plataforma con (PCM), estaban ubicadas lo más cerca posible una plataforma de la otra de tal forma que si hay viento, radiación solar o cualquier factor que influya en la toma de datos para el análisis, afecto a las dos plataformas por igual y así se obtuvieron los datos de campo lo mas precisos posibles.

3. Resultados

Este capítulo se evidencia los resultados de todo el trabajo realizado al momento de escoger los materiales, equipos y escenarios necesarios para la realización de este proyecto, el cual, con esfuerzo y persistencia se llevó a cabo y con todos los cuidados en medio de una pandemia, se lograron obtener los datos durante varios meses, para que así se pudiese realizar un análisis y cumplir con los objetivos planteados.

3.1. Plataforma experimental

3.1.1. Material de cambio de fase

Por su temperatura de cambio de fase en el rango de operación de la captación solar, se utilizaron como estrategia de almacenamiento térmico ceras de parafina, cada PCM fue macro encapsulado en contenedores metálicos. El llenado se realizó vertiendo PCM en estado líquido al interior del contenedor previamente precalentado hasta la temperatura de fusión del PCM, la cantidad a suministrar corresponde al volumen del colector y el volumen total de PCM utilizado en el colector, por lo que al verterlo en estado líquido se garantiza que no habrá derrames debido a la expansión volumétrica del material.

El precalentamiento de los contenedores se realizaba con el objetivo de evitar que el choque térmico entre el PCM y las paredes del contenedor ocasionara solidificación de porciones de material que pudiesen albergar cavidades de aire. Posterior al llenado los contenedores son sellados y ubicados bajo la placa de absorción del colector solar, el cual tiene capacidad del alojar 8 unidades como lo muestra la Figura 2.

Tabla 1. Propiedades térmicas de los componentes principales

Especificaciones y propiedades	Valor	Unidad
Cubierta de vidrio		
Densidad	2490	kg/m ³
Capacidad calorífica	834	J/kg-K
Emisividad	0,89	-
Absortividad	0,08	-
Placa absorbedora		
Densidad	2770	kg/m ³
Capacidad calorífica	875	J/kg-K
Emisividad	0,9	-
Absortividad	0,9	-
PCM (Rubitherm RT 45)		
Punto de fusión	41 - 46	°C
Calor latente	160	kJ/kg
Calor específico	2000	J/kg-K
Conductividad térmica	0,2	W/m-K
Densidad (líquida)	770	kg/m ³
Densidad (sólida)	880	kg/m ³
Aislamiento		
Conductividad térmica	0,028	W/m-K
Espesor	50	mm



Figura 2. Esquema de colector solar con PCM

3.1.2. Instrumentación

Estación meteorológica y unidad de adquisición de datos

La instrumentación de la plataforma experimental consta de dos elementos principales: la estación meteorológica y la unidad de adquisición de datos de temperatura. Las variables que permite medir cada uno de estos elementos se presenta en la Tabla 2 y sus especificaciones técnicas se describen detalladamente en los subtítulos posteriores

Tabla 2. Instrumentos y variables medidas

Instrumento	Frecuencia de muestreo	Variables medidas	Unidades
Estación meteorológica	5 min	Radiación solar	$\frac{W}{m^2}$
		Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
		Velocidad del viento	$\frac{m}{s}$
Unidad de adquisición de datos de temperatura Termopares tipo K	1 min	Temperatura de placa absorbadora	$^{\circ}C$
		Temperatura de cámara de secado	$^{\circ}C$
		Temperatura de salida de cámara de secado	$^{\circ}C$
		Temperatura de placa con PCM	$^{\circ}C$

Estación meteorológica

La plataforma experimental cuenta con una estación para medir las condiciones meteorológicas durante las pruebas experimentales. La estación se ubicó a pocos metros de los colectores solares (ver Figura 3) con el propósito de medir las condiciones ambientales de operación local como la temperatura ambiente, radiación solar incidente y velocidad del viento. Para el alcance de esta investigación otros parámetros registrados por la estación como el índice de calor, humedad, presión atmosférica, pluviometría, índice de radiación UV, no fueron tenidos en cuenta. (Shalaby et al., 2014).



Figura 3. Estación meteorológica

Unidad de adquisición de datos de temperatura.

Se utilizaron unidades de adquisición de datos Applent Instruments AT4532, para registrar la temperatura de 16 termopares tipo k ubicados en los componentes principales del colector solar. Los sensores se instalaron en la cubierta de vidrio debajo de la placa absorbadora, y en el PCM. La distribución de los sensores se realizó de la siguiente forma: se ubicaron 4 sensores en la cubierta de vidrio, 4 en la placa con PCM, 4 en la salida del colector, 4 debajo de la placa con PCM. Las especificaciones de los sensores de temperatura de la unidad de adquisición de datos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones de los sensores de temperatura utilizados por la unidad de adquisición

Especificación	Valor	Unidades
Rango	- 200 - 1300	°C
Resolución	0.1	°C
Precisión	1	°C



Figura 4. Unidad de adquisición de datos

3.1.3. Montaje

Para el montaje, la pandemia permitió ubicar los colectores en el lugar ideal de la universidad (las canchas), en el cual se pudieron tomar datos lo mejor posible, debido a la salida, puesta del sol maniobrabilidad de equipos y disposición del flujo eléctrico.



Figura 5. Colectores solares y especificación de cada una de sus partes

3.2. Experimentación

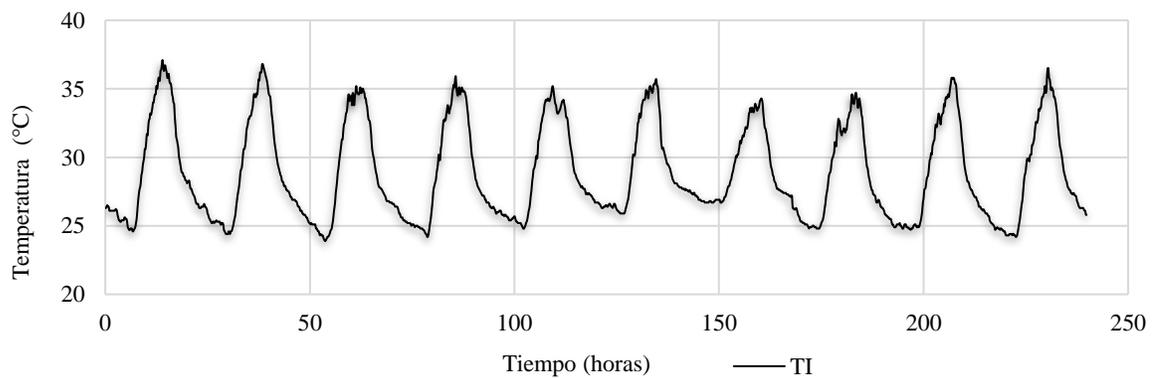
Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería, Colombia. Los colectores de experimentación para las pruebas tuvieron lugar en la cancha de baloncesto de la Universidad, estos mismos se orientaron de tal forma que se estuviera mirando hacia el sur, con el fin de aprovechar la luz solar el mayor tiempo posible.

Las pruebas realizadas con los colectores fueron ejecutadas entre noviembre 2020 y mayo del 2021. Para el sitio de experimentación se verificó previamente que no presentara proyección de sombras sobre los colectores en lo posible a ninguna hora del día durante la ejecución campaña experimental. La posición de la estación meteorológica la cual debe estar lo más cerca de los colectores, también era seleccionada cuidadosamente para evitar este mismo fenómeno, estas especificaciones técnicas se pueden observar en la Figura 5.

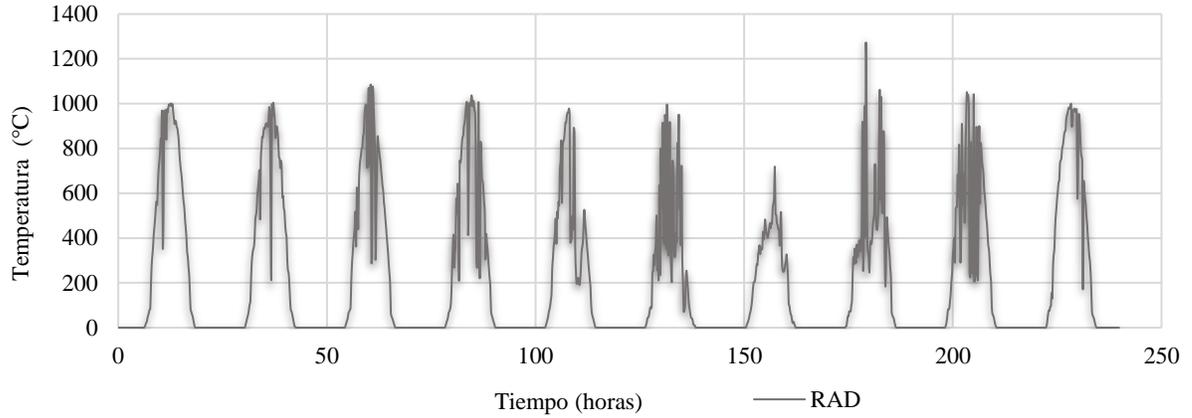


Figura 6. Lugar estación meteorológica

Para la recolección de datos experimentales se iniciaron en marzo de 2020, pero debido a la pandemia, se suspendieron las actividades de investigación. Estas se reanudaron en el mes de noviembre de 2020, pero se encontró que el equipo se encontraba deteriorado, con los sensores en mal estado, además, se reubicó la plataforma experimental para poder hacer una toma óptima de los datos experimentales, los cuales se muestra a continuación en las siguientes gráficas.

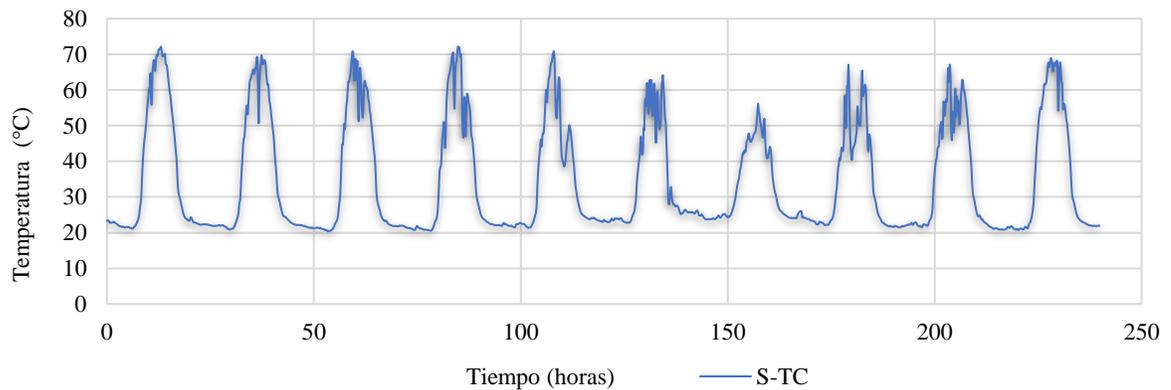


Gráfica 1. Temperatura inicial

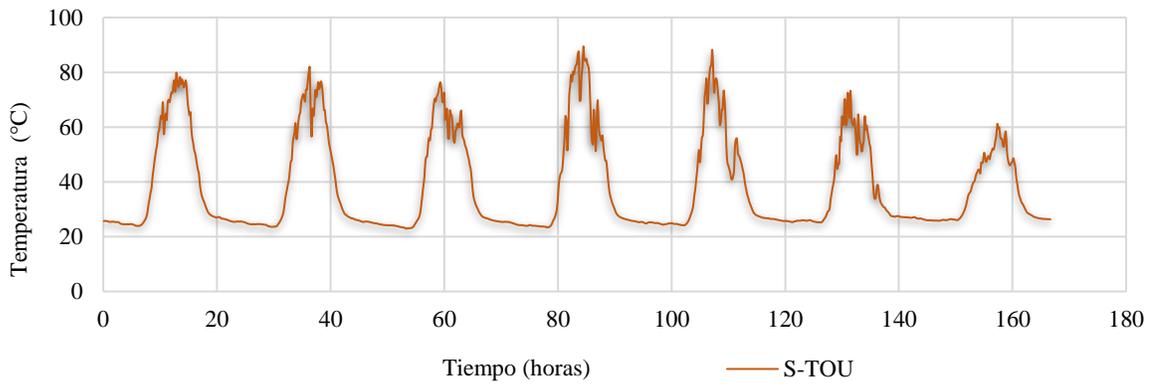


Gráfica 2. Cambio de la radiación solar obtenida

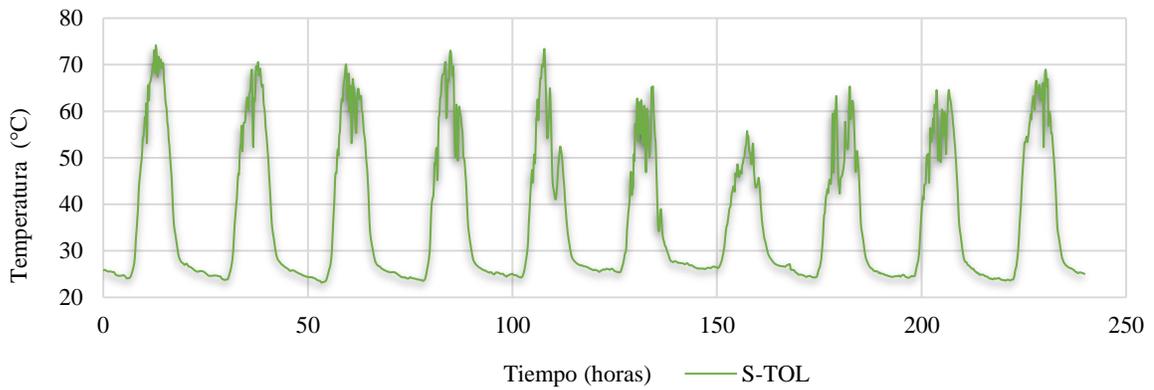
En la anterior grafica se puede observar una disminución en la radiación solar los días 6 y 7, esto quiere decir que esos días tuvieron obstrucciones lo cual no permitía que la luz solar llegara plenamente a los colectores, por ende, más adelante en las posteriores graficas se notara dichos eventos.



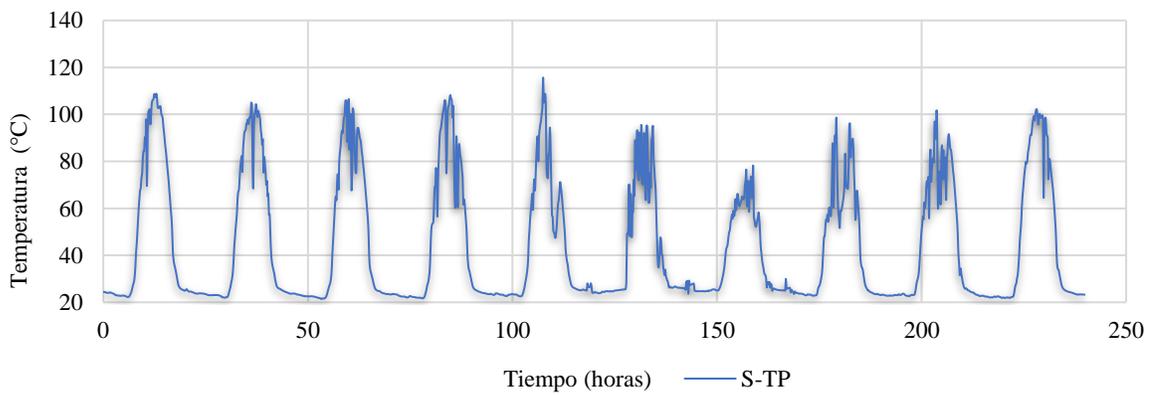
Gráfica 3. Temperatura de cubierta de vidrio sin PCM



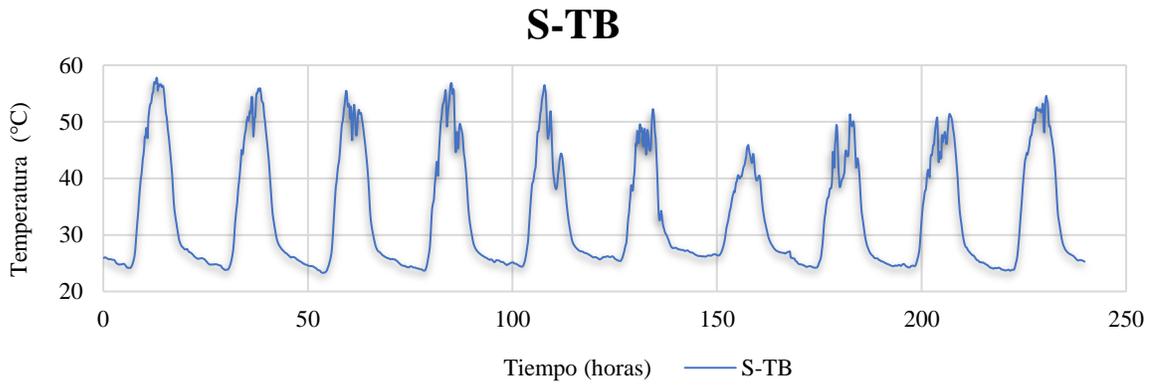
Gráfica 4. Temperatura de salida del canal superior sin PCM



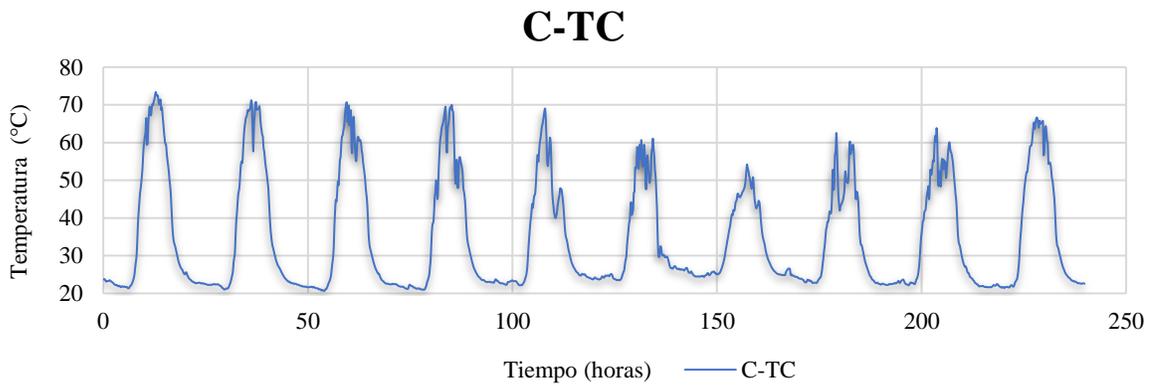
Gráfica 5. Temperatura de salida del canal inferior sin PCM



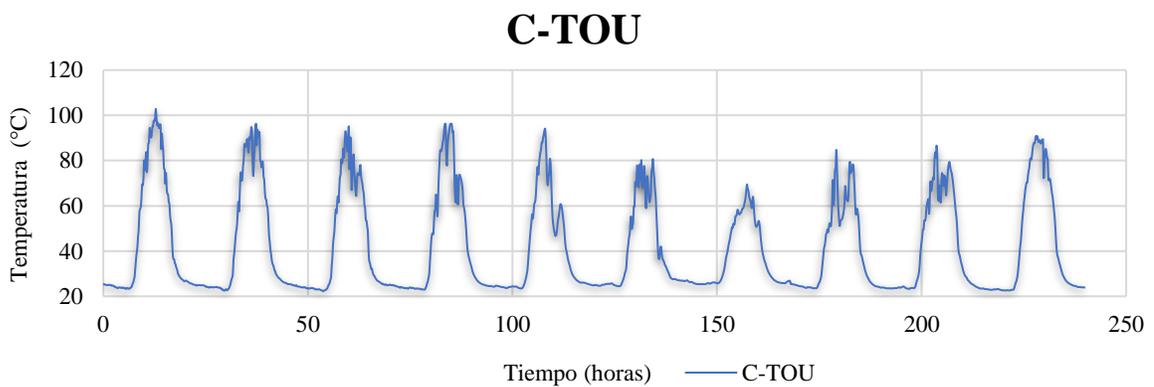
Gráfica 6. Temperatura de placa absorbidora sin PCM



Gráfica 7. Temperatura del fondo del colector sin PCM

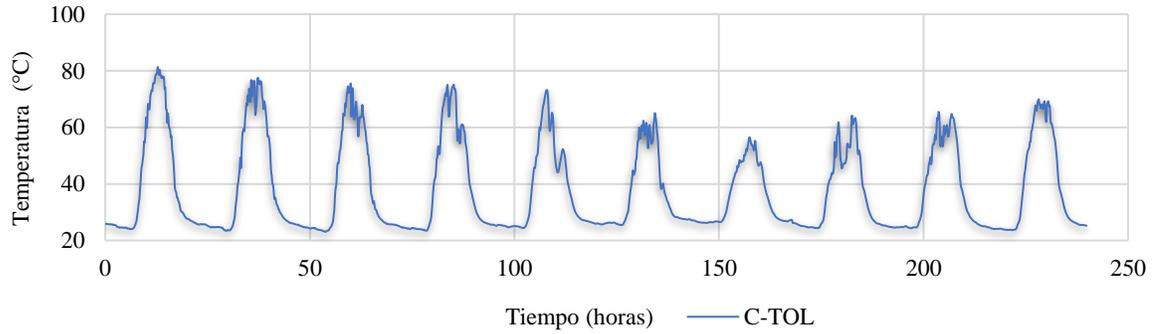


Gráfica 8. Temperatura de cubierta de vidrio con PCM



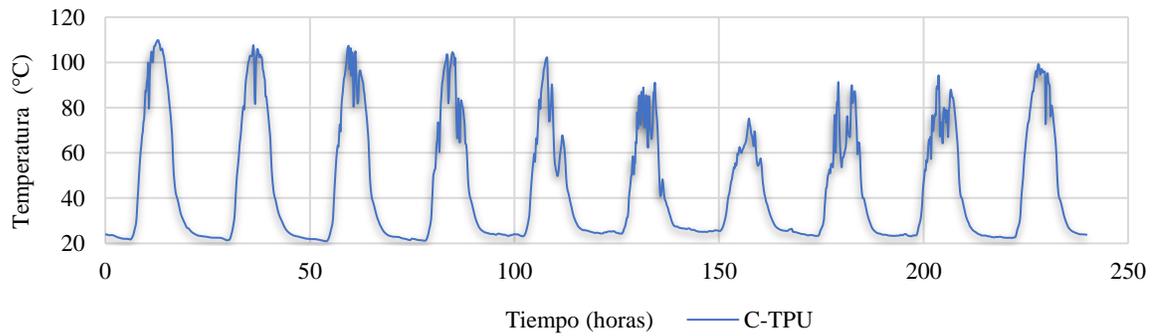
Gráfica 9. Temperatura de salida del canal superior con PCM

C-TOL



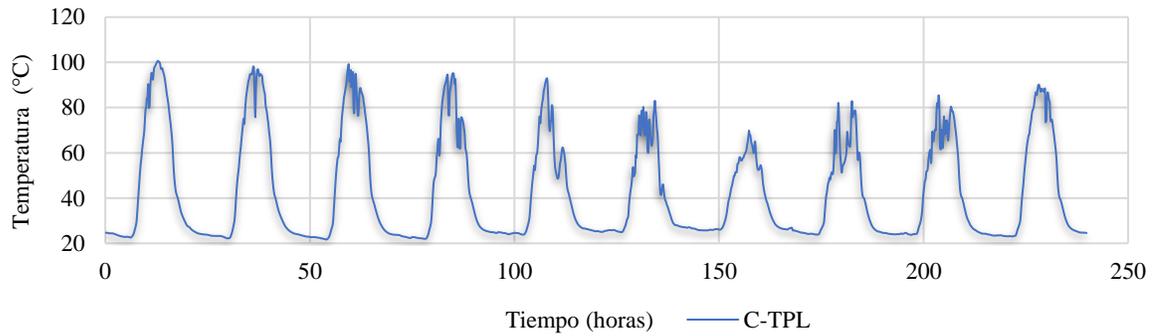
Gráfica 10. Temperatura de salida inferior del colector con PCM

C-TPU

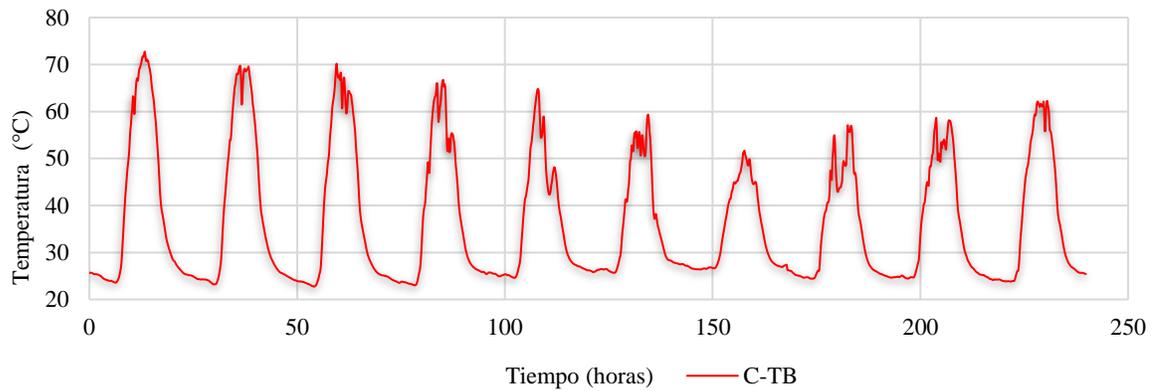


Gráfica 11. Temperatura superior de la cubierta del colector con PCM

C-TPL



Gráfica 12. Temperatura inferior de la cubierta del colector con PCM



Gráfica 13. Temperatura del fondo del colector con PCM

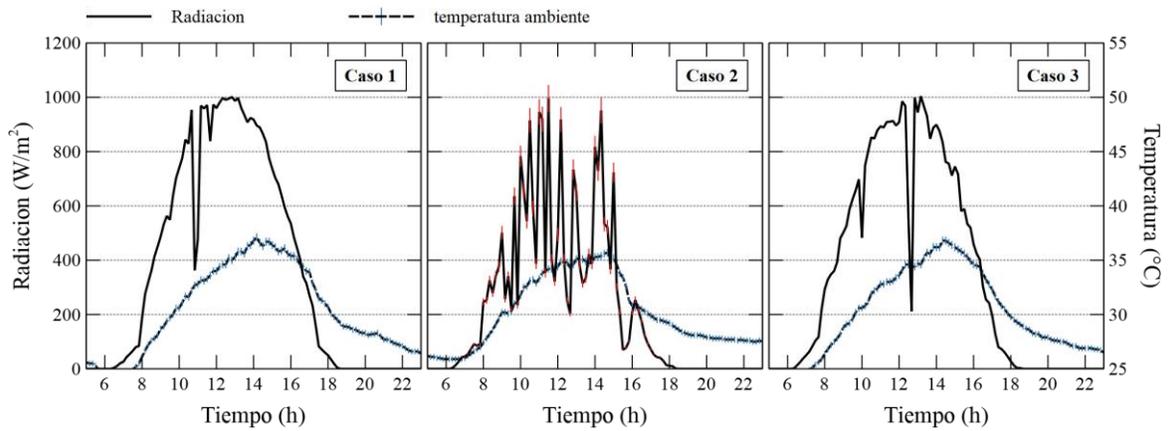
3.3. Análisis comparativo y discusión

En el análisis comparativo se tuvo en cuenta la recolección de los datos experimentales, las cuales conllevo mucho tiempo invertido, al momento de construir mantener y reubicar los colectores, todo esto mientras concurría una pandemia mundial.

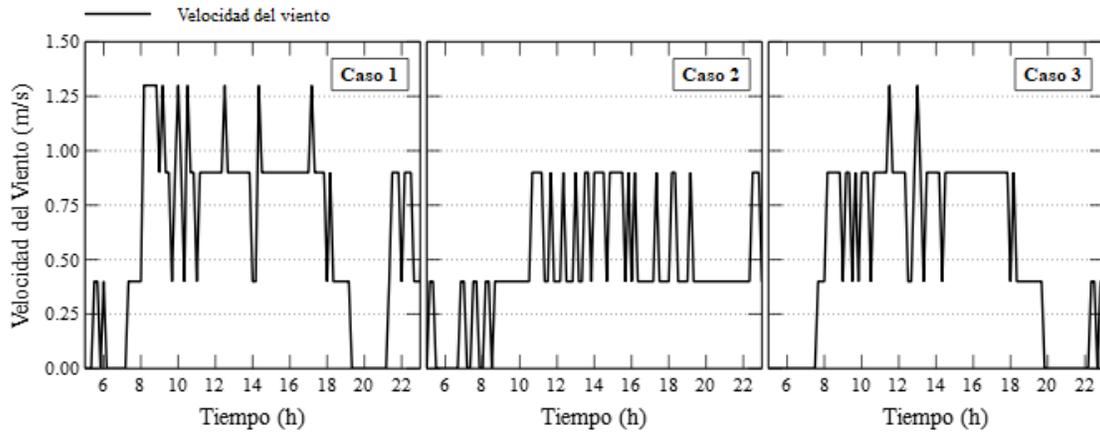
A continuación, se mostrará la comparación de los resultados obtenidos.

3.3.1. Condiciones de operación del análisis

Los resultados experimentales se presentan para tres casos, el primero consiste en un día de alta radiación, en el segundo se presentan variaciones considerables por efecto de las condiciones ambientales, climáticas. En el tercer caso, se presenta una condición particular en la que la radiación disminuye fuertemente al mediodía. Las condiciones de operación de radiación solar y temperatura ambiente se presentan en la Gráfica 14, mientras que la velocidad del viento se muestra en la Gráfica 15. Ambos colectores operaron bajo un flujo másico fijo de 0.021 kg/s.



Gráfica 14. Radiación y temperatura ambiente

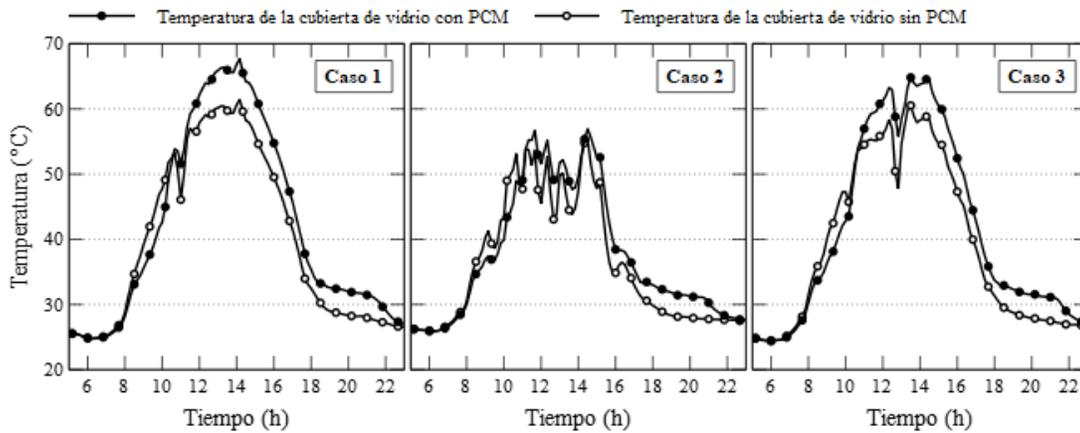


Gráfica 15. Velocidad del viento

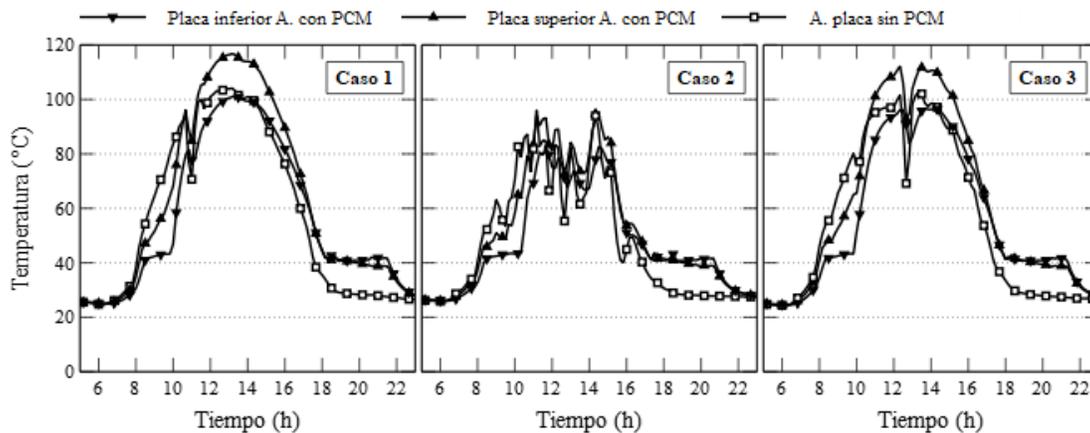
3.3.2. Análisis experimental

Las temperaturas de la cubierta de vidrio y la placa absorbente se presentan en la Gráfica 16 y la Gráfica 17, respectivamente. Los resultados muestran que estos componentes presentan temperaturas más altas antes en los casos sin PCM en comparación con aquellos en los que estaba presente el almacenamiento latente. La tendencia opuesta se da por la noche y por la tarde cuando la radiación solar ha disminuido. Estos resultados cumplen con las expectativas de un sistema de captación solar tradicional con almacenamiento térmico. Sin embargo, un hallazgo

interesante ocurre a las horas del mediodía en el que el dispositivo con PCM muestra una temperatura de vidrio más alta en comparación con el colector sin PCM. Este resultado puede deberse a la baja conductividad del PCM, que genera diferencias de temperatura significativas entre la parte superior e inferior del sistema de almacenamiento que resultan en temperaturas más altas para la placa superior y temperaturas más bajas para la placa inferior como se puede ver en la Gráfica 17. La placa superior más caliente produce una mayor diferencia de temperatura entre la cubierta de vidrio y una mayor transferencia de calor, lo que provoca valores de temperatura de vidrio más altos en comparación con el colector sin PCM. Sin embargo, la diferencia de temperatura entre placas para colector con PCM se aproxima durante la noche como posible consecuencia del proceso de solidificación de la capa más cercana de PCM en contacto con las placas.



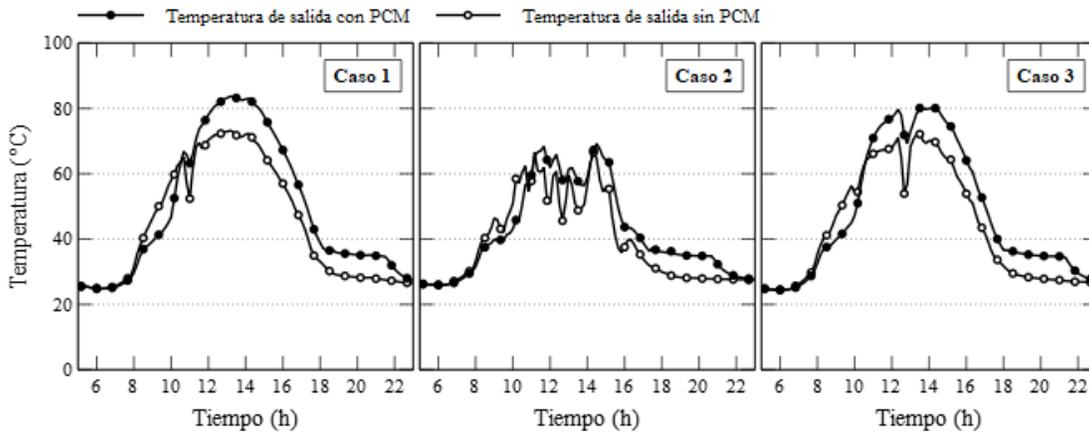
Gráfica 16. Temperatura en cubierta de vidrio



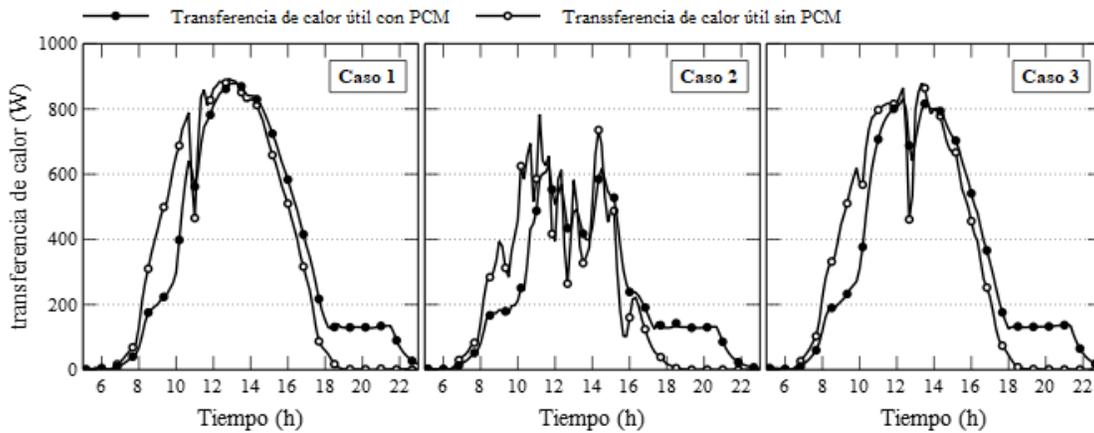
Gráfica 17. temperatura de la placa absorbedora

En las siguientes grafías observa un comportamiento muy similar en la temperatura de salida y la tasa de calor útil, que se muestran en la Gráfica 18 y la Gráfica 19. La inclusión de PCM en el colector del calentador de aire afecta en gran medida el rendimiento del dispositivo, presentando una mayor tasa de calor útil y temperaturas de salida durante la una parte de la noche, en comparación con el colector sin PCM. Por otro lado, la Gráfica 19 indica que el calentador de aire solar con PCM es una fuente para suministrar calor útil más allá de la puesta del sol a las 18:00, mientras que la tasa de calor útil del colector sin PCM cae a cero casi que despues de la puesta del sol. Este comportamiento y la menor tasa de calor útil y temperatura de salida presentada en la madrugada sugieren que el PCM está cumpliendo su función de almacenar energía térmica durante el día para entregarla en la noche. En cuanto a los casos de estudio, en el caso 1 el sistema de calefacción PCM genera una temperatura máxima de salida de 82°C mientras que en el caso 2 el sistema alcanza una temperatura máxima de salida de 65°C, ambos casos 10°C superiores a las temperaturas presentadas en colector sin PCM. Para el caso 3, a pesar de la caída de radiación presentada al mediodía, la disminución de la temperatura y la tasa de calor útil es menor en comparación con el caso sin PCM, lo que sugiere que el PCM puede suministrar

energía térmica en la noche y entregar energía térmica en los períodos diurnos donde la radiación cae bruscamente. Es importante mencionar que, aún con las diferencias en radiación, todos los casos de estudio muestran el mismo comportamiento durante la noche, presentando tasas de calor útil similares durante el período de descarga de los PCM y temperaturas de salida 4°C más altas en comparación con los sin PCM. prototipo.



Gráfica 18. Temperatura de salida



Gráfica 19. Transferencia de calor útil con y sin PCM

4. Conclusiones

En este documento, se realizó una evaluación experimental del rendimiento de dos calentadores de aire de doble canal de placa plana idénticos, con y sin PCM. Se consideraron diferentes condiciones ambientales bajo tres estudios de caso: condición de cielo despejado, condición parcialmente nublada y condición de cielo despejado con caída repentina de la radiación. Las principales conclusiones del trabajo se describen a continuación.

- Se obtuvieron importantes diferencias de temperatura entre el colector con PCM en comparación con el colector sin PCM. En general, el colector PCM presentó temperaturas más altas en las partes principales del dispositivo. Este problema se puede atribuir a la baja conductividad del PCM que crea un efecto de aislamiento que provoca un aumento de temperatura en la parte superior de la placa absorbente, lo que genera temperaturas promedio de salida más altas.

- El calentador de aire solar con PCM es capaz de suministrar calor útil más allá de la puesta del sol a las 18:00, mientras que la tasa de calor útil del colector sin PCM cae a cero en ese momento. Este resultado sugiere que el PCM es una solución potencial al problema de la intermitencia intrínseca del suministro de energía solar, sin embargo, se deben abordar investigaciones adicionales en nuevos materiales de almacenamiento, especialmente en materia de optimización de propiedades térmicas para proporcionar una operación continua para estas aplicaciones de calentamiento de aire.

- Ambos colectores obtuvieron eficiencias similares en todos los casos de estudio. A partir de este resultado, se puede concluir que la inclusión de PCM brinda la capacidad de operar más allá del anochecer sin afectar negativamente el rendimiento del dispositivo.

- Se encontró que el sistema de almacenamiento con PCM proporcionó energía térmica durante la operación diurna como respuesta a las caídas de radiación

solar. Este hallazgo sugiere una aplicación diferente de los sistemas de almacenamiento PCM más allá de la operación de copia de seguridad nocturna.

- Se encontró diferente comportamiento del suministro de energía térmica del PCM entre operación diurna y nocturna. Este hallazgo podría explicarse por el hecho de que el calentador de aire solar con PCM alcanzó fácilmente el punto de fusión del material de almacenamiento. El movimiento convectivo del PCM derretido bajo la operación sensible al líquido podría causar tasas de transferencia de calor más altas en comparación con la transferencia de calor por conducción que ocurre durante la solidificación nocturna del PCM.

5. Publicaciones

La fase experimental y de recolección de datos de la presente investigación se desarrolló conjuntamente con Palacio, M., Ramírez, C., Carmona, M., & Cortés, C. (2022), cuyo artículo fue publicado recientemente en la revista Solar Energy titulado Effect of phase-change materials in the performance of a solar air heater.

En el mencionado artículo, la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería figura como institución que participó en la elaboración del proyecto investigativo.

6. Referencias

- Bhardwaj, A. K., Kumar, R., Chauhan, R., & Kumar, S. (2020). Experimental investigation and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with a combination of SHS and PCM for drying chilli in the Himalayan region. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20(April), 100713. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100713>
- Ebrahimi, H., Samimi Akhijahani, H., & Salami, P. (2021). Improving the thermal efficiency of a solar dryer using phase change materials at different position in the collector. *Solar Energy*, 220(August 2020), 535–551. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.054>
- Jurkowska, M., & Szczygieł, I. (2016). Review on properties of microencapsulated phase change materials slurries (mPCMS). *Applied Thermal Engineering*, 98, 365-373.
- Janampa-Quispe, Kléber, Cerón-Balboa, Octavio, Morales-Morales, Oswaldo, & Oré-García, Julio. (2020). Diseño y construcción de acumulador solar térmico por cambio de fase para un secador solar familiar. *Tecnia*, 30(1), 90-97. <https://dx.doi.org/10.21754/tecnica.v30i1.840>
- Palacio, M., Ramírez, C., Carmona, M., & Cortés, C. (2022). Effect of phase-change materials in the performance of a solar air heater. *Solar Energy*, 247, 385-396. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.046>
- Raj, A. K., Srinivas, M., & Jayaraj, S. (2019). A cost-effective method to improve the performance of solar air heaters using discrete macro-encapsulated PCM capsules for drying applications. *Applied Thermal Engineering*, 146(October 2018), 910–920. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.055>
- SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD AM2315. (s. f.). MACTRONICA. Recuperado 8 de marzo de 2021, de <https://www.mactronica.com.co/sensor-de-temperatura-y-humedad->

am2315?gclid=Cj0KCQiA1KiBBhCcARIsAPWqoSomNcDZ5yRfIUuAUPBICz
w-8C5jDihWsDiY3INOyZR_NaH8SD87VnQaAlblEALw_wcB

- Shalaby, S. M., & Bek, M. A. (2014). Experimental investigation of a novel indirect solar dryer implementing PCM as energy storage medium. *Energy Conversion and Management*, 83, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.043>
- Shalaby, S. M., Bek, M. A., & El-Sebaili, A. A. (2014). Solar dryers with PCM as energy storage medium: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.073>
- Swami, V. M., Autee, A. T., & T R, A. (2018). Experimental analysis of solar fish dryer using phase change material. *Journal of Energy Storage*, 20(669), 310–315. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.09.016>