



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA BASADO EN MATERIALES DE CAMBIO DE FASE PARA APLICACIONES DE CALENTAMIENTO DE AIRE.

**Duban Villadiego Medrano¹, Amaury Oquendo Meza¹, Arnold Rafael Martínez
Guarín¹, Jorge Mario Mendoza Fandiño¹**

¹ Programa de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingenierías – Universidad de Córdoba.

RESUMEN

El aprovechamiento de la energía solar para aplicaciones domésticas e industriales se ha visto obstaculizado debido a su naturaleza intermitente, en este contexto, se han implementado diversos sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) en los dispositivos de aprovechamiento de radiación solar, para mitigar este problema. Estos utilizan calor sensible y latente para almacenar calor en momentos de alta radiación y posteriormente liberarlo en instantes de poca radiación. En la presente investigación se evalúa, experimentalmente, el impacto de la implementación de materiales de cambio de fase en colectores solares de placa plana en las condiciones de temperatura y radiación solar del departamento de Córdoba en Colombia, para comparar la eficiencia térmica entre ellos en operación transitoria. También se utiliza modelación por medio de dinámica de fluidos computacional (CFD), evaluando la transferencia de calor y comparándolo con los resultados experimentales. En esta investigación se analizan los parámetros que afectan el rendimiento térmico del calentador de aire solar de placa plana, con y sin PCM. Estos parámetros incluyen la radiación solar, la diferencia de temperatura del aire a través del calentador y la eficiencia térmica instantánea. En esta investigación se encontró que el sistema de almacenamiento de energía térmica permite obtener una mayor eficiencia térmica, además en momentos donde hay poca radiación solar se obtuvo temperaturas constantes a través del colector, garantizando mejor operación y desempeño.

PALABRAS CLAVES

Almacenamiento de energía térmica, calor latente, material de cambio de fase, colector solar de placa plana, eficiencia térmica.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área del colector,	m^2	A_k	Área de una superficie	K
c_p	Calor específico,	$kJ / kg \cdot K$	E	Vector de energía emisiva	
E_k	Energía emisiva de la superficie	K	F_{jk}	Factor de visión	
G_k	generación de turbulencia debido a la energía cinética		h_{ref}	Entalpía de referencia	
h	Entalpía sensible	J	ΔH	Calor latente	J
H	Entalpía del material	J	I_c	Tensor unitario	
I	Radiación incidente	W / m^2	J_k	Energía emitida de la superficie K	
J	Vector de radiosidad		k	Energía cinética	
\vec{j}_j	Flujo de difusión		k_{eff}	Conductividad térmica efectiva	$W / m \cdot K$
k_a	Conductividad térmica	$W / m \cdot K$	L	Calor latente del material	
K	Matriz de NxN		p	Presión estática	MPa
\dot{m}	Flujo másico de aire	kg / s	$q_{out,k}$	Flujo de energía que sale de una superficie K	
$q_{in,k}$	Flujo de energía que incide a una superficie		$Q_{útil}$	Energía útil ganada	W
Q_{rad}	Radiación solar	W	T_1	Temperatura de entrada	K
S	Término fuente		T_{Liq}	Temperatura de cambio de fase a líquido	K
T_2	Temperatura de salida	K	T_{Sol}	Temperatura de cambio de fase a sólido	K
T_{ref}	Temperatura de referencia	K	\vec{v}_p	Velocidad del sólido	m / s
\vec{v}	Velocidad de flujo	m / s	β	Fracción líquida	
Y_j	Fracción de masa		ε_k	Emisividad	
ε	Tasa de disipación		μ	Viscosidad molecular	
η	Eficiencia		$\bar{\tau}$	Tensor de esfuerzo	
μ_a	Viscosidad dinámica		σ	Constante de Stefan-Boltzmann	
ρ	Densidad	kg / m^3		$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$	

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019. Vigencia: 4 años

INTRODUCCIÓN

El calentamiento global y el deterioro de la capa de ozono han motivado a la comunidad científica en el mundo a buscar alternativas que reemplacen los combustibles fósiles, debido a su efecto contaminante en el ambiente. Mediante las investigaciones realizadas, se ha notado el gran potencial presente en la energía solar como fuente alternativa, de la cual han sido desarrollados múltiples sistemas tecnológicos e innovadores (Sharma, et al, 2009). Estas tecnologías son amigables con el ambiente, y su uso como reemplazo de las fuentes energéticas convencionales ayuda a disminuir las emisiones a la atmósfera causante del efecto invernadero, que contribuye al deterioro de esta (Ingle, et al, 2013).

Los equipos que se utilizan en el aprovechamiento de energía solar, se ven afectados por la naturaleza intermitente de esta forma de energía, lo cual se puede mitigar implementando sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES) en los dispositivos, por medio de PCMs. El beneficio principal de su implementación es la gran capacidad de almacenamiento de calor en un volumen pequeño en forma de calor latente, además del comportamiento isotérmico durante los procesos de carga y descarga. Debido a estas ventajas, se han realizado una gran cantidad de trabajos de investigación para encontrar PCMs más eficientes, y nuevas configuraciones en los sistemas para superar los problemas de baja transferencia de calor entre el fluido de trabajo y el PCM (Souliotis, et al, 2016). En algunas aplicaciones es deseable tener una baja conductividad térmica, pero esto suele ser un problema cuando se requiere acceso a la energía almacenada rápidamente (Zalba, et al, 2003)

Los colectores solares se han implementado en diferentes aplicaciones con fluidos de transporte como aire y agua. Su funcionamiento se ve involucrado en aplicaciones de calefacción, con el uso de radiación solar convertida a energía térmica (Kürklü, et al, 2002). Estos dispositivos son muy utilizados en aplicaciones de secado en el área de alimentos y granos, debido a que permiten alcanzar temperaturas alrededor de 100 °C, la cual es adecuada para estos procesos (Victoria y Jaramillo (2005)).

Torres-Gallo, et al, 2017, realizaron el diseño de un sistema híbrido de combustión de biomasa y radiación solar empleando PCM, el cual se usó en secado de yuca, y posteriormente hicieron la evaluación del sistema. Encontraron que la eficiencia del

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019. Vigencia: 4 años

colector fue 43,91%, mientras que la temperatura en la salida de aire estuvo entre 46 °C y 51 °C. Esto se debe a multitud de factores como la radiación incidente y su intermitencia, el tamaño del colector, tamaño de la placa absorbadora, su tipo de material y configuración.

Con respecto a la modelación de sistemas de colectores solares con herramientas de dinámica de fluidos computacionales (CFD), Amraoui, M. A., y Aliane, K. (2018), presentan un estudio con el uso de la herramienta ANSYS FLUENT en el que se modeló el colector solar con geometría 3D, donde el fluido de transporte es aire. El objetivo de este estudio es realizar comparaciones entre las mediciones experimentales y los resultados numéricos sobre el flujo de fluidos y la transferencia de calor en el colector solar de placa plana. En la configuración del modelo se implementó el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ estándar. Los autores encontraron una buena concordancia entre los resultados numéricos y experimentales con respecto a la temperatura de salida del colector solar, pero hay unas pequeñas discrepancias; sin embargo, afirman que la herramienta puede ser útil y confiable.

Manilal, K. M. (2016) presenta un estudio CFD para colectores solares de placa plana en geometría 3D hecho en ANSYS FLUENT. La investigación es orientada al secado de alimentos, en el que se evalúan varias geometrías y formas de la placa absorbente usada en el colector solar de placa plana, con el propósito de seleccionar el mejor comportamiento en el estudio numérico para hacer la fabricación del dispositivo y obtener resultados experimentales. En la configuración del modelo se implementa el modelo de radiación solar disponible en Fluent para un día a cielo despejado, y se selecciona el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ estándar. A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones, el autor pudo obtener los parámetros óptimos para efectuar su diseño y fabricación; posteriormente hizo una validación experimental en la que encontró que los resultados numéricos se ajustan con los experimentales; sin embargo, la curva obtenida del análisis CFD es un poco más alta que la experimental, el autor atribuye esto a posibles pérdidas en el proceso de experimentación.

Hamed, M, et al, (2017) realizaron un trabajo comparativo de dos colectores solares, de los cuales uno solo contenía un sistema de almacenamiento térmico (TES) mediante materiales de cambio de fase. La viabilidad de la implementación del sistema TES se estudió numéricamente basado en la primera ley de la termodinámica, y el fluido de transporte que se usó fue agua. El problema fue resuelto en MATLAB en forma unidimensional y se analizaron variables como temperatura de entrada, los caudales máxicos del agua, espesor

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019. Vigencia: 4 años

del PCM y su fracción fundida. De lo anterior se encontró que los resultados obtenidos experimentalmente tuvieron un buen ajuste con los resultados numéricos. Se presenta un aumento en la temperatura de salida del agua a medida que disminuye el flujo másico de esta, así como el espesor de la capa de PCM y la temperatura de fusión de este. Adicionalmente, se notó que durante el tiempo de carga del PCM se presenta una disminución de la temperatura de salida, pero en la descarga se presenta un aumento de esta.

Carmona, M., & Palacio, M. (2019) presentan un método analítico reducido para modelar los procesos relacionados con un colector solar de placa plana a cielo despejado, y con interferencia en la radiación solar, con el fin de evaluar el rendimiento energético, el cual se soluciona mediante la herramienta Simulink de MATLAB. La estrategia se realizó con el uso de las correlaciones semiempíricas que involucran los distintos mecanismos de transferencia de calor aplicado a una unidad de almacenamiento energético, donde se usaron dos tipos de PCM con diferentes puntos de fusión. Las variables se midieron en el exterior y se hacen cálculos de temperatura y fracción fundida. Los resultados de la investigación muestran que las temperaturas de los diferentes componentes del colector se pueden predecir con buena precisión.

Badiei, Z., et al (2020) presenta un estudio CFD de un colector solar de placa plana en el que se usó una geometría 3D, al cual se le dio solución con el uso de la herramienta ANSYS FLUENT en régimen transitorio. La validación de los resultados numéricos se hizo con base en resultados tanto numéricos como experimentales de otros autores que son citados. Para ello, los investigadores comparan parámetros como la temperatura de salida de agua caliente del colector, los cuales presentan un buen ajuste. Se encontró que durante la mañana, la temperatura de salida del agua es menor en comparación con el sistema donde no se incluye el PCM, pero durante las horas de la noche se logra extender el suministro de agua caliente, a pesar de la falta de radiación solar. Lo anterior permitió aumentar la eficiencia del colector en un 13% para un día de verano en Shiraz, Irán.

Después de revisar los antecedentes relacionados con el empleo de sistemas TES enfocados en calor latente, mediante PCM, se encontró que el uso de esta tecnología es prometedora en zonas donde se requiera el suministro de aire caliente, como el requerido en los procesos de secado o deshidratación de productos agroindustriales. Con base en lo mencionado anteriormente, se realiza una investigación donde se evalúa la eficiencia térmica de dos

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

colectores solares de placa plana en la ciudad de Montería, Córdoba, en Colombia, donde uno de estos contiene un TES con la implementación de la parafina RT-45 como PCM, con el fin de realizar comparaciones entre ellos y notar la mejora que aporta el sistema TES en el rendimiento térmico, así como la modelación de los fenómenos experimentales mediante un análisis de CFD en una geometría 3D con el uso de la herramienta ANSYS FLUENT.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación experimental desarrollada en esta investigación, se requirió la fabricación de dos colectores solares idénticos, los cuales tienen una longitud de 1 m por 0,5 m de ancho. Las paredes de los colectores se fabricaron en madera con un espesor de 15 mm. La Figura 1 muestra los colectores usados. En la Figura 1 (a) se muestra un esquema del colector sin los dispositivos de almacenamiento térmico, mientras que en la Figura 1 (b) se puede apreciar el colector solar con los dispositivos de almacenamiento térmico durante la experimentación. El colector cuenta con dos perforaciones para las entradas y una para la salida de aire, con un diámetro de 120 mm cada una. Para impedir las pérdidas del calor por las paredes laterales y por la base del colector, se utilizaron láminas de poliestireno expandido con 18 mm de espesor. A cada uno de los colectores se le puso una cubierta de vidrio de 4 mm de espesor.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Esquema de colector solar de placa plana. (b) Colector solar de placa plana con PCM.

El TES usado en este estudio consiste en contenedores cilíndricos de aluminio que fueron llenadas con PCM como unidad de almacenamiento. En la figura 2 se muestra el arreglo en



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

forma de banco de tubos con una distribución escalonada con filas intercaladas de 4 y 3 contenedores cilíndricos.

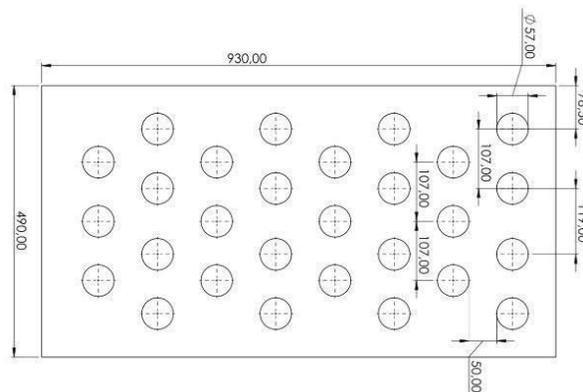


Figura 2. Distribución de los contenedores de PCM utilizadas en el colector solar.

La entrada de aire fue proporcionada por 2 ventiladores que entregaban una velocidad de 3 m/s cada uno. En la salida de aire caliente se obtuvieron velocidades de 3 m/s para el colector con TES y 3.3 m/s para el otro colector debido a pérdidas en estos. Estas mediciones se realizaron con un anemómetro Hold Peak. La figura 3 muestra la estación meteorológica que fue usada para tomar las mediciones de radiación solar



Figura 3. Estación meteorológica Davis Vantage Pro 2 usada para realizar mediciones de radiación solar.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

La estación meteorológica se posicionó justo al lado de los colectores solares, se configuró el datalogger de esta para adquirir mediciones en intervalos de tiempo de 1 min. Por otro lado, se utilizaron termopares tipo K para tomar mediciones de temperatura en intervalos de tiempo de 1 segundo, mediante un dispositivo de adquisición de datos Applent AT4208. La temperatura fue monitoreada en la entrada de aire, la placa absorbadora, la superficie de la unidad TES, la salida de aire y en la superficie del vidrio, esto con el propósito de efectuar el cálculo de eficiencia térmica en cada uno de los colectores.

Los estudios experimentales se llevaron a cabo desde el mes de febrero hasta abril del año 2022, en la ciudad de Montería. Debido a fenómenos naturales, se presentaron temporadas de lluvias en un periodo del año al que no corresponden normalmente, así como una alta nubosidad que entorpece la ejecución de los experimentos. Varios de estos fueron descartados por presencia de lluvia en las horas de la tarde, como otros en los que el día permaneció nublado y los colectores no funcionaban adecuadamente. Una vez instalado el montaje se procedió a tomar las mediciones, las cuales se llevaron a cabo en un espacio libre de árboles y edificaciones que pudieran causar interferencia a los instrumentos de la estación meteorológica, así como ocasionar sombras que impidieron la captación de radiación solar en el colector. Las mediciones se iniciaban a las 8 am, cuando se empezaba a captar la radiación solar en la ciudad, y se finalizaban a las 5:30 pm, cuando se presentaban valores muy bajos de radiación solar y la temperatura ambiente disminuye considerablemente. De los datos obtenidos, se tomaron los días en los que hubo menor intermitencia de radiación solar.

Eficiencia de un colector solar de placa plana

La eficiencia del colector solar se define por la relación entre la energía útil obtenida en un tiempo infinitesimal y la energía total que incide en el colector en el mismo periodo.

$$\eta = \frac{\int Q_{\text{útil}} dt}{A \int I dt}$$

La radiación incidente para este caso de estudio se pudo medir usando la estación meteorológica que se ubicó cerca a los colectores durante los experimentos, pero es necesario conocer la radiación solar, para ello se multiplica la radiación incidente por la superficie del colector.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE

Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

$$Q_{rad} = A \cdot \int I dt$$

Ahora, para calcular la eficiencia es necesario calcular $Q_{útil}$ por lo que se debe tener en cuenta la temperatura de entrada y salida del fluido de trabajo en el colector, que fueron medidas con termopares ubicados en estos puntos. También se necesita calcular el flujo másico y el calor específico del fluido de trabajo.

$$Q_{útil} = \dot{m}C_p (T_2 - T_1)$$

Modelo Matemático

Geometría

La geometría usada en el modelo numérico contiene la distribución de contenedores de PCM con el patrón y espaciado mostrado en la figura 2. Las dimensiones usadas comprenden el volumen del aire en el interior del colector, el volumen de los contenedores de PCM y los pequeños espacios en las entradas y salida, mientras que los espesores de aislamiento son descritos mediante una condición de flujo de calor cero, y el espesor del contenedor de aluminio es especificado en la condición de frontera. En la figura 4 se muestra la geometría usada en el modelo desarrollado en ANSYS Workbench. De acuerdo con la geometría del colector, es posible implementar una condición de simetría y de esta manera ahorrar recursos computacionales, resolviendo solamente la mitad del dominio computacional. Se puede notar que el sistema de almacenamiento energético consta de un arreglo escalonado de contenedores cilíndricos de aluminio, las cuales son usadas como unidad de almacenamiento energético; los vectores de color azul y rojo indican la entrada y salida de aire, respectivamente.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co

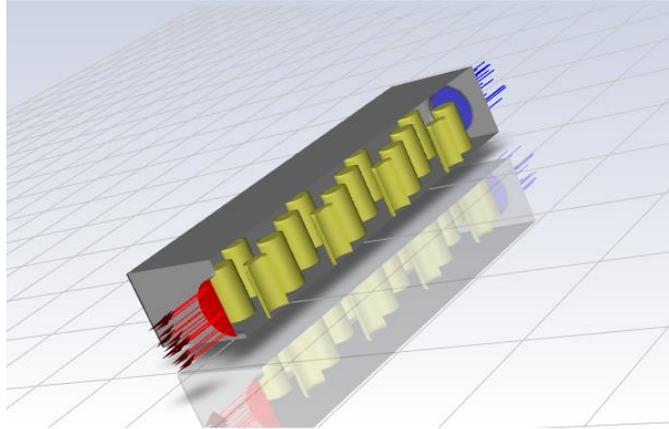


Figura 4. Geometría del modelo.

Discretización espacial

La discretización espacial del modelo se realizó considerando elementos de 8mm, para un total de 345.999 elementos y 85.191 nodos. Posteriormente, se usó Fluent para configurar el modelo.

Ecuaciones de gobierno

La conservación de la masa está dada por

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v})$$

La conservación de los momentos es descrita por

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g}$$

Donde $\bar{\bar{\tau}}$ está dada por

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I_c \right]$$

Con respecto a los mecanismos de transferencia de calor como conductividad y convección están descritos por medio de la ecuación de la energía, la cual se muestra a continuación:



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \cdot \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right)$$

Donde,

$$k_{eff} = k_a + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}$$

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$$

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho}$$

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT$$

Modelo de radiación Surface-to-Surface (S2S)

Para el mecanismo de transferencia de calor mediante radiación se implementó el modelo de radiación Surface-to-Surface (S2S), el cual es común en los problemas de CFD que involucran colectores solares. El modelo de radiación superficie-superficie puede utilizarse para contabilizar el intercambio de radiación en un recinto de superficies grises-difusas. Parte de la premisa de que el intercambio de energía entre dos superficies depende en parte de su tamaño, la distancia de separación y la orientación. Estos parámetros se tienen en cuenta mediante una función geométrica denominada *factor de visión*.

La energía que sale de la superficie K es:

$$q_{out,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{in,k}$$

El flujo de energía incidente $q_{in,k}$ puede expresarse en términos del flujo de energía que sale de todas las demás superficies como

$$A_k q_{in,k} = \sum_{j=1}^N A_j q_{out,j} F_{jk}$$

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



Para N superficies, utilizando la relación de reciprocidad que el factor de visión proporciona

$A_j F_{jk} = A_k F_{kj}$ Para $j=1,2,3,\dots,N$. Por lo que

$$q_{in,k} = \sum_1^N F_{kj} q_{out,j}$$

Por ello

$$q_{out,k} = \varepsilon_k + \rho_k \sum_{j=1}^N F_{kj} q_{out,j}$$

Puede ser escrito como

$$J_k = E_k + \rho_k \sum_{j=1}^N F_{kj} J_j$$

Esto representa N ecuaciones, que se pueden reformular en forma de matriz como

$$KJ = E$$

Modelo de turbulencia

Con respecto a los modelos de turbulencia, en la resolución de este problema se implementará el modelo $k - \varepsilon$. Las ecuaciones de transporte para el estándar $k - \varepsilon$ son

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_a + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K}$$

Y el modelo de la viscosidad turbulenta está dado por

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

Donde C_μ es una constante. Las constantes del modelo se usaron con los valores estándar que tiene Fluent, los cuales son: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

Modelo de Solidification and Melting (entalpía – porosidad)

El modelo Solidification and Melting usa la técnica de la entalpía-porosidad. En Ansys Fluent es usado para realizar cálculos de fracción fundida en un volumen o área determinada, y de esta manera conocer la cantidad de celdas que están en estado sólido, líquido o en zona pastosa. La entalpía es calculada como la suma de las entalpías sensibles y el calor latente como sigue:

$$H = h + \Delta H$$

Donde

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT$$

La fracción líquida, β , está definida por

$$\beta = \begin{cases} 0 & \text{si } T < T_{Sol} \\ 1 & \text{si } T > T_{Liq} \\ \frac{T - T_{Sol}}{T_{Liq} - T_{Sol}} & \text{si } T_{Sol} < T < T_{Liq} \end{cases}$$

El calor latente contenido se define por:

$$\Delta H = \beta L$$

La formulación de la ecuación de la energía en problemas que implican los cambios de fase como solidificación y fusión está dada por:

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k_a \nabla T) + S$$

Y la ecuación de momento está dada por:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{pastosa} (\vec{v} - \vec{v}_p)$$

Materiales

El fluido de transporte para esta aplicación es aire. El material de los contenedores cilíndricos es aluminio y la cubierta del colector es de vidrio, en la tabla 1 se muestran las propiedades termofísicas de los materiales.

Material	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg·K)	k_a (W/m·K)	μ_a (kg/m·s)
Aire	1.225	1006.43	0.0242	1.7894e-05
Aluminio	2719	871	202.4	
Vidrio	2230	830	1.14	

Tabla 1. Propiedades termofísicas de los materiales.

Por parte del PCM, se usó la parafina RT-45 y se asignó la densidad de boussinesq con un valor de 770 kg/m^3 , el coeficiente de expansión térmica usado es de 0.00185 K^{-1} , el calor de fusión del PCM es de 121727 J/kg , la temperatura de sólido y líquido corresponden a 313K y 324K respectivamente (Martínez, et al, 2020).

El calor específico y la conductividad térmica fueron consideradas variables linealmente con la temperatura en la región de cambio de fase. Para el calor específico en la fase sólida, se consideró un valor de $3400 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, mientras que en la fase líquida se asumió un valor de $2200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ de acuerdo con lo reportado por Martínez, et al, 2020. De igual manera, se consideró un valor de la conductividad térmica de $0.24 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en la fase sólida y un valor constante de $0.16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en la fase líquida. Se realizó una caracterización termofísica de



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

la viscosidad utilizando un viscosímetro Hoppler, y se encontraron valores discretos para las temperaturas evaluadas en la región líquida, de acuerdo con lo presentado en la tabla 2.

$T(K)$	$\mu_a (W/m \cdot K)$
318	0.0022
319	0.0021
323	0.0019
328	0.0016
333	0.0015

Tabla 2. Curva de viscosidad dinámica.

Métodos de solución

Para resolver las ecuaciones resultantes de conservación de momento y masa en la discretización de forma acoplada, se utilizó el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). A la discretización espacial se le dio solución mediante el método de celdas de mínimos cuadrados para el apartado de gradiente, mientras que en la presión se usó un esquema de segundo orden. A la ecuación de conservación de momento se solucionó mediante un esquema Upwind de segundo orden. La energía cinética de la turbulencia fue modelada usando un esquema Upwind de primer orden, al igual que para la tasa de disipación turbulenta, y la ecuación de energía se resolvió mediante un esquema Upwind de segundo orden. Por último, para la formulación transitoria se utilizó un esquema implícito de primer orden. Se usó inicialización estándar. El paso de tiempo se ajustó inicialmente en 0.1s, pero una vez se completan los primeros 5 segundos el modelo converge rápidamente. Una vez transcurren los primeros 25 segundos, el paso de tiempo puede ser ajustado a 5s, debido a que los residuales caen y permanecen en tendencia a la baja hasta el final de la simulación.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Analizando los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión de tomar un día que represente el día promedio y con base en este día se muestran los resultados. Para ello, se presentan las condiciones de operación del día 18 de marzo de 2022. La figura 5 muestra la curva de radiación incidente obtenida por medio de la estación meteorológica. Se puede observar la influencia de la alta nubosidad de esta región del país en las mediciones realizadas.

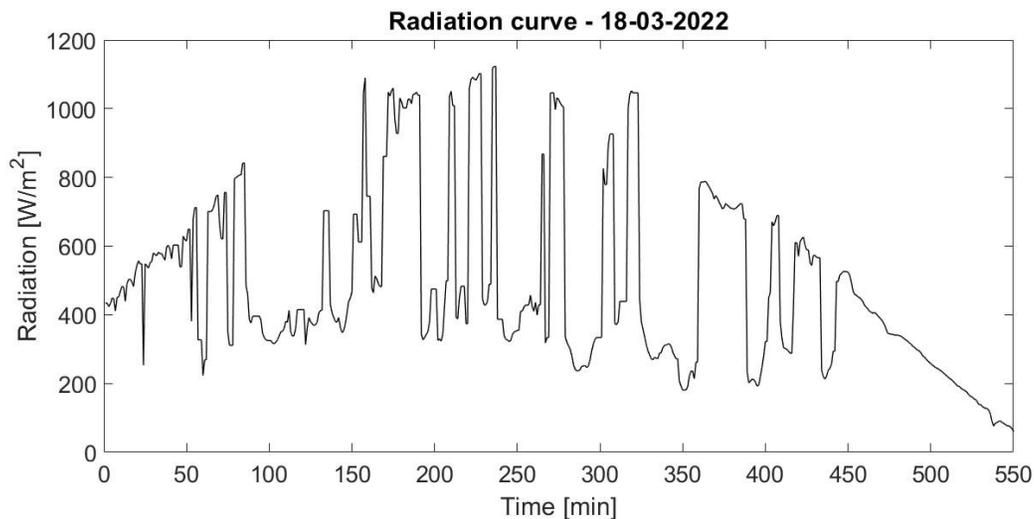


Figura 5. Curva de radiación incidente obtenida experimentalmente.

La figura 6 muestra, de forma comparativa, los datos de temperatura obtenidos para los distintos colectores solares. Se puede observar que la temperatura de funcionamiento de la placa absorbente del colector que contiene PCM es menor la mayor parte del tiempo, pero es mayor en la parte final en comparación con el sistema sin PCM.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

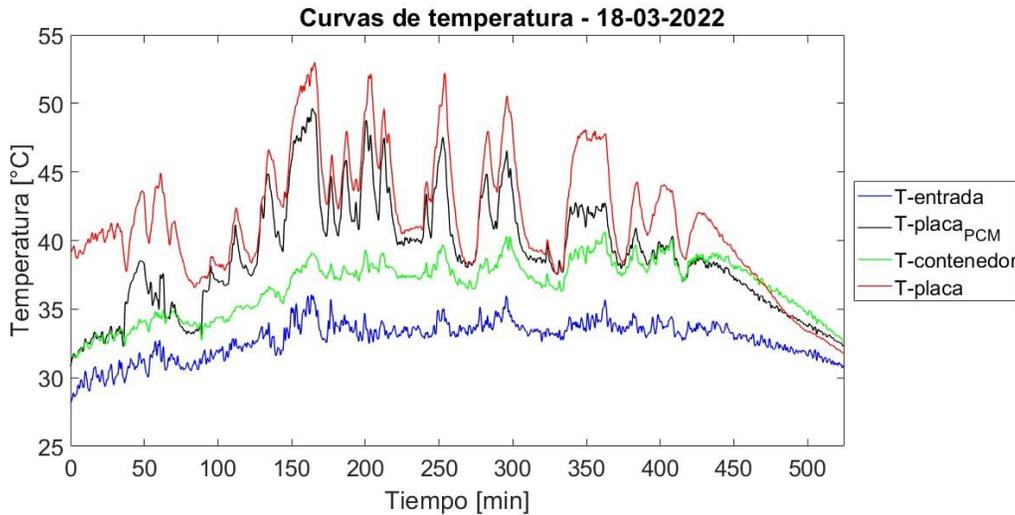


Figura 6. Temperatura experimental de la placa absorbente con y sin PCM y los contenedores de PCM.

Este comportamiento se debe al almacenamiento de energía térmica del material de cambio de fase durante las horas de radiación solar, y a su funcionamiento como fuente de calor en los momentos de baja radiación. También es importante destacar el efecto producido por la sombra de las unidades de almacenamiento energético sobre la placa absorbente, el cual impide que una parte de la placa reciba directamente la radiación solar, lo que no ocurre en el colector sin PCM, el cual está directamente expuesto. Por lo tanto, de la Figura 7, el resultado de la inclusión del PCM en las temperaturas de todos los componentes del sistema, principalmente en la placa absorbente y la salida de aire, es coherente con las curvas de temperatura, donde se presenta la descarga de energía de las unidades de almacenamiento.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE

Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

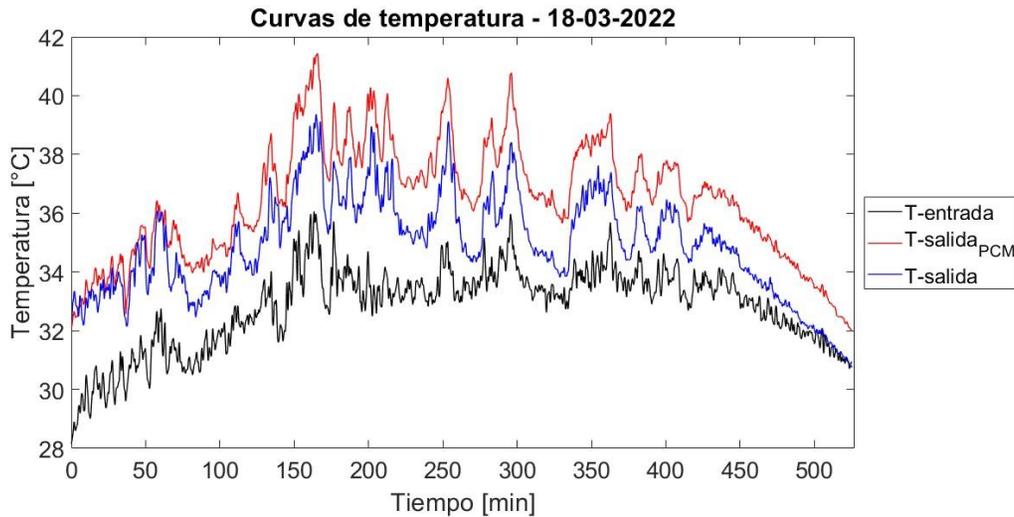


Figura 7. Temperatura experimental del aire de salida y entrada del colector con y sin PCM.

Por otro lado, la Figura 7 muestra que las temperaturas de salida de los colectores son casi iguales durante la primera hora del experimento, a medida que avanza, se observa como el colector con TES presenta una mayor temperatura de salida. Una vez que llegan las horas de la tarde, se produce un descenso de la temperatura de entrada, observándose la tendencia a la baja en el colector con tecnología tradicional, mientras que el colector con PCM aprovecha la energía almacenada para tener un mejor rendimiento en su temperatura de funcionamiento. La figura 8 muestra las temperaturas medidas en la superficie de los vidrios de los diferentes colectores. Como se puede notar, la temperatura en los vidrios difieren en ciertos intervalos de tiempo para cada colector, esto se debe a la variación de la temperatura del aire al interior de los colectores con y sin PCM, así como el comportamiento de los elementos internos que pueden elevar la temperatura del vidrio en ocasiones de baja radiación.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

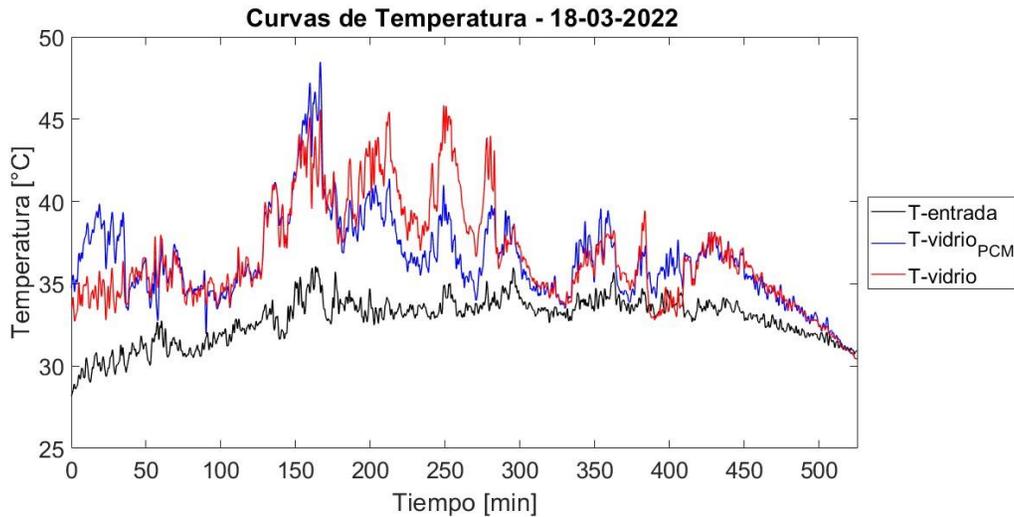


Figura 8. Temperatura experimental de las cubiertas de vidrio con y sin PCM.

Eficiencia de un colector solar de placa plana

La figura 9 muestra la curva obtenida para el calor útil, donde se puede apreciar el comportamiento similar de ambos colectores como consecuencia de la igualdad de las condiciones experimentales, siendo despreciables pequeñas diferencias como las presentadas en las temperaturas del vidrio en la figura 8.

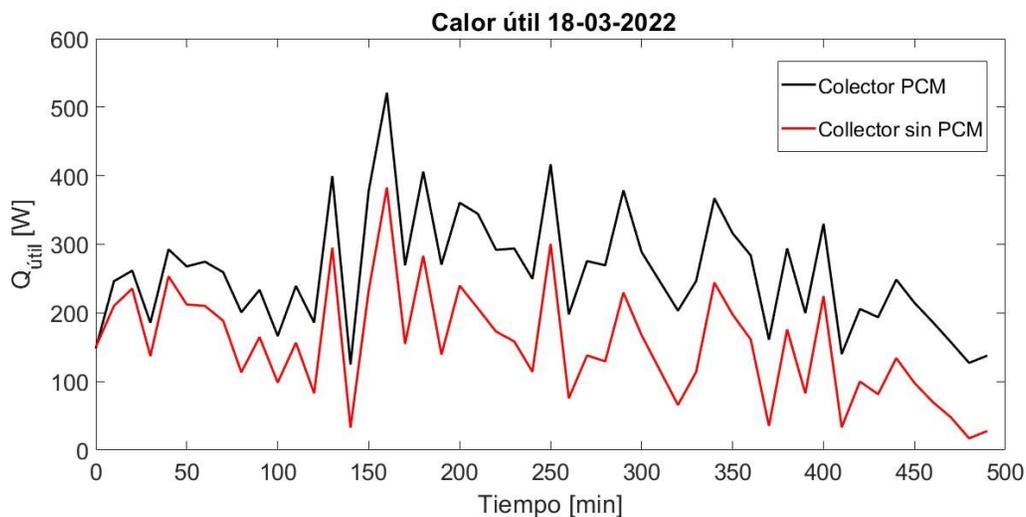


Figura 9. Calor útil para cada colector solar.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE

Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

La figura 10 muestra la eficiencia térmica instantánea cada 10 minutos para ambos colectores, donde se aprecia el mejor rendimiento del colector con PCM, con una mayor diferencia al final del día, cuando la radiación solar ha disminuido y el PCM comienza a transferir calor al aire circundante en convección forzada. Cabe destacar que la curva de eficiencia instantánea presenta inconsistencias debido a que al final del día la radiación solar presenta valores muy bajos y la temperatura ambiente es igual a la temperatura de salida, lo que significa que el colector solar no está operando y se obtiene un resultado ilógico en el cálculo de esta eficiencia, lo que no ocurre para el colector solar con PCM que sigue operando, siendo el objetivo de esta gráfica comparar el rendimiento de ambos colectores cuando se descarga el calor almacenado en el PCM.

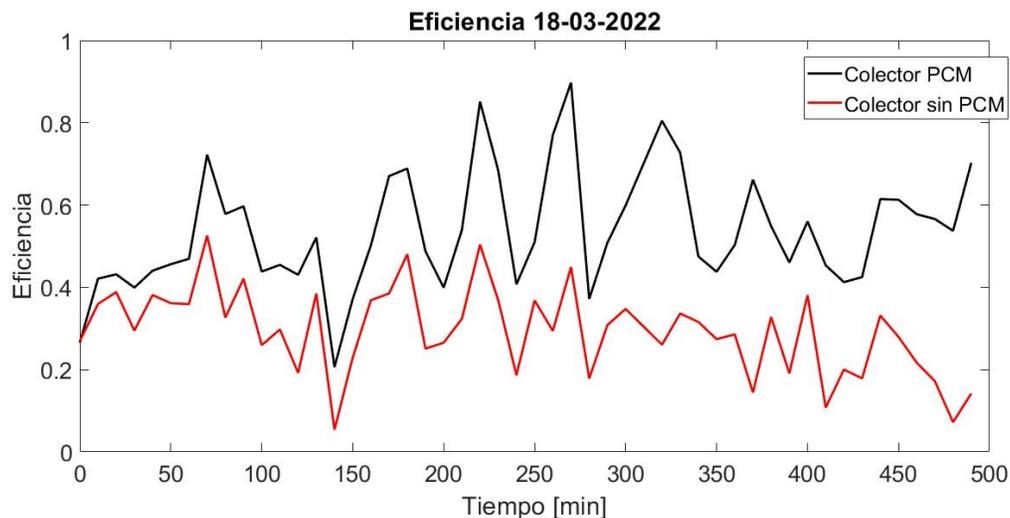


Figura 10. Eficiencia instantánea para cada colector.

La figura 11 muestra la eficiencia térmica de ambos colectores durante el día. De esta manera se evidencia que el colector solar con TES mantiene un mejor rendimiento durante el día.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años



Figura 11. Eficiencia térmica por día para ambos colectores.

Condiciones de frontera

Se configuró la entrada de aire con una velocidad de 3 m/s , se especificó un diámetro hidráulico de 0.12 m y una intensidad de turbulencia del 5% , igual que en la salida. Experimentalmente, se encontró que la temperatura de entrada del colector se puede modelar como una regresión polinomial a las mediciones experimentales, de la que se obtuvo la siguiente ecuación.

$$T = 3.78 \cdot 10^{-17} t^4 + 2.4136 \cdot 10^{-12} t^3 - 6.419 \cdot 10^{-8} t^2 + 8.7046 \cdot 10^{-4} t + 28.9199 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Donde t va de 0 a 527 min. En la figura 12 se muestra la curva obtenida mediante regresión polinomial, superpuesta con las mediciones obtenidas experimentalmente.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE

Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

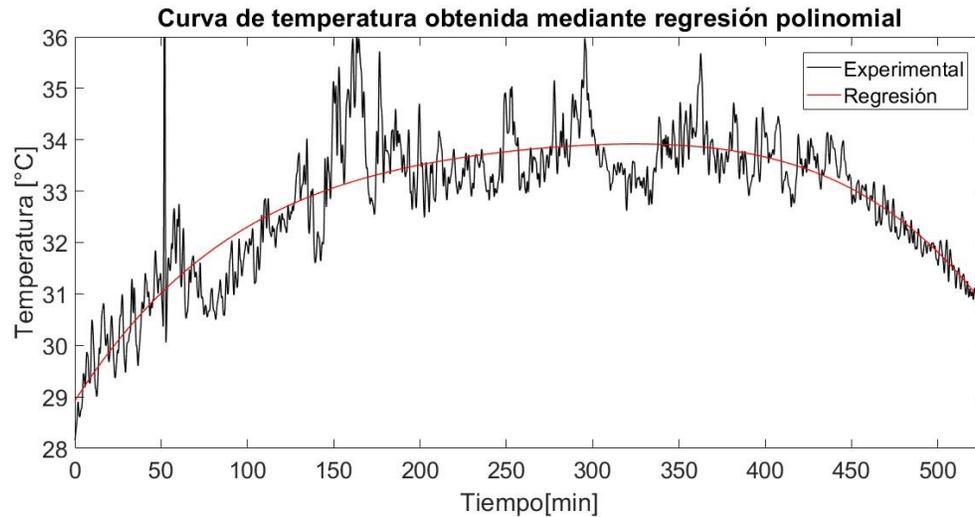


Figura 12. Curva de temperatura obtenida mediante regresión polinomial.

Las interfaces entre aire y los contenedores de aluminio llenas de PCM se modelaron como condiciones de acoplamiento que permitieran transferencia de calor entre las interfaces; también se especificó el espesor de pared del contenedor de aluminio. Una condición de frontera de simetría fue especificada debido a que se modeló la mitad del dominio computacional. La inferior del colector se considera totalmente aislada al igual que las paredes de este. La entrada de calor fue suministrada mediante una condición de frontera en la parte superior, la cual corresponde a la cubierta de vidrio del colector. Se especificó un espesor de $0.004m$ y se realizó una regresión de la curva obtenida de radiación de lo que se obtuvo la ecuación.

$$Q_{rad} = 1.2409 \cdot 10^{-5} t^3 - 0.0194 t^2 + 6.0296 t + 540.3387 [W / m^2]$$

Donde t va de 0 a 527 min. En la figura 13 se muestra la curva obtenida mediante regresión, superpuesta con la curva de radiación experimental.

Por una universidad con calidad, moderna e incluyente

Carrera 6ª. No. 76-103 Montería NIT. 891080031-3 - Teléfono: 7860300 - 7860920 www.unicordoba.edu.co



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

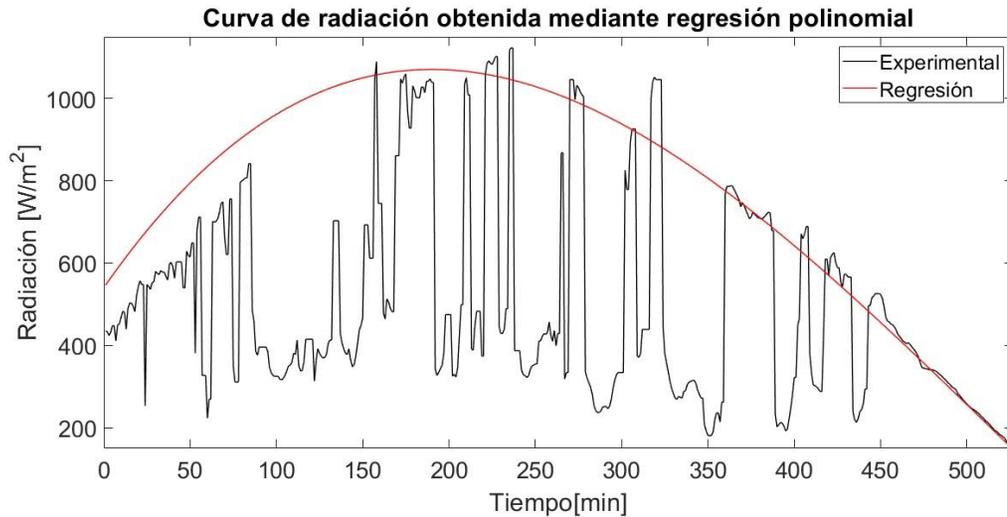


Figura 13. Curva de radiación obtenida mediante regresión polinomial.

La condición de frontera a la salida del dominio del colector, se consideró como una salida de presión atmosférica.

RESULTADOS NUMÉRICOS

Debido al factor de visión con el que trabaja el modelo S2S, no se recomienda implementarlo en modelos donde se tenga una geometría simétrica, por esto se realizó la simulación con un modelo con condición de frontera de simetría y una con el modelo completo, y de esta manera poder comparar. La figura 14 muestra que las temperaturas obtenidas durante la simulación en la placa absorbidora, no se calienta lo suficiente con la curva de radiación suministrada como entrada de calor en ambos casos.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

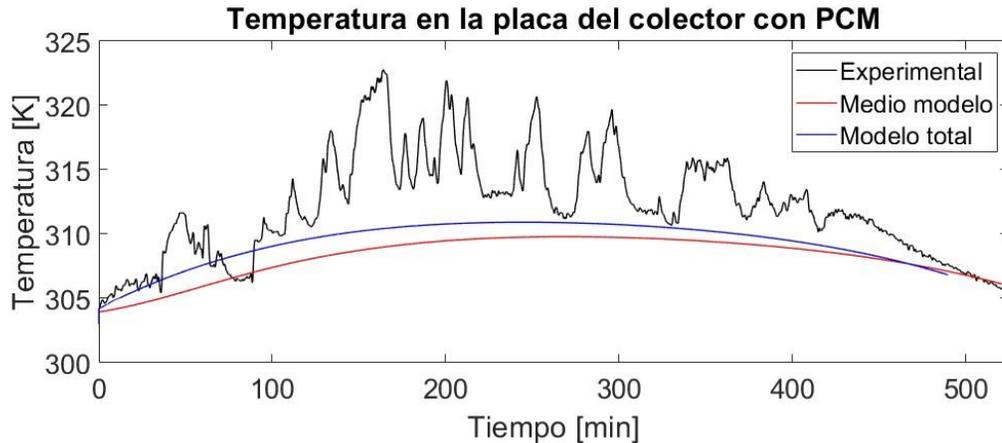


Figura 14. Curva de temperatura en la placa absorbadora obtenida de los modelos de simulación.

Se puede notar que el modelo completo presenta un mayor aumento de temperatura en comparación con el modelo con simetría. La figura 15 muestra una comparación de las curvas de temperatura en la superficie de los contenedores de aluminio, se puede evidenciar que en los resultados obtenidos numéricamente, el modelo completo presenta un mayor ajuste con la curva experimental, especialmente en la primera mitad del experimento, mientras que la curva del modelo simétrico está muy por debajo de los resultados experimentales.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE

Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

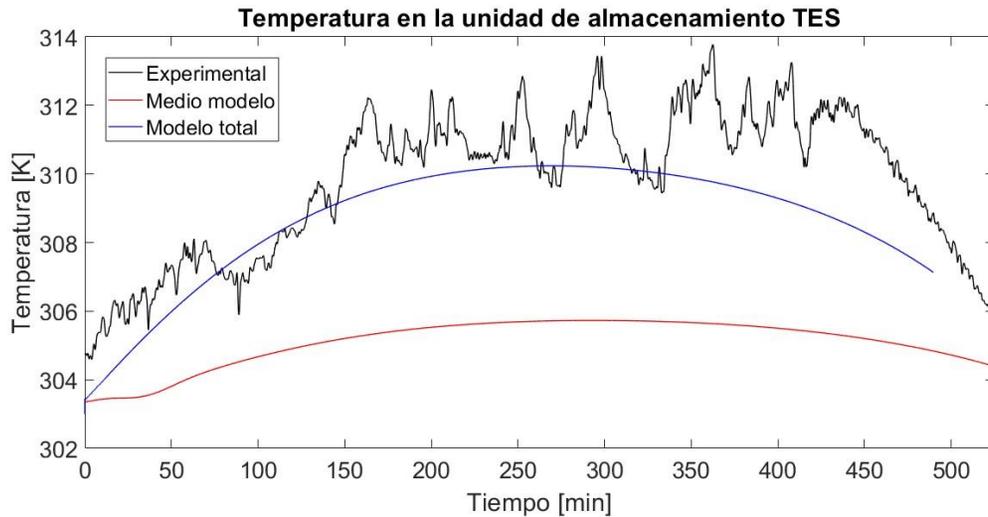


Figura 15. Curva de temperatura en la superficie de la unidad de almacenamiento TES obtenida de los modelos de simulación.

Por otro lado, cuando se analizan las curvas de temperatura en la salida de aire caliente, vemos que este comportamiento no se mantiene, es decir, el modelo simétrico presenta un mejor comportamiento en comparación a lo que se midió experimentalmente. La curva del modelo simétrico se ajusta mejor con la curva experimental, mientras que el modelo completo se mantiene lejano a lo real como se muestra en la figura 16.



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

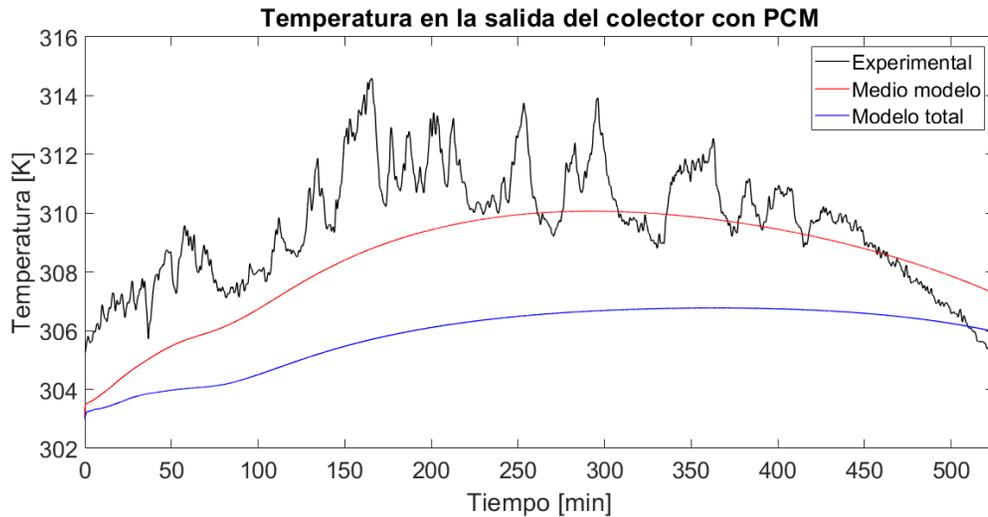


Figura 16. Curva de temperatura en la salida de aire obtenida de los modelos de simulación.

A pesar de que se tuvo una temperatura inferior en la superficie del contenedor de PCM y en la placa absorbadora, el modelo simétrico presentó una mayor temperatura en la salida de aire y por lo tanto un mejor rendimiento.

En cuanto al comportamiento de los patrones de flujo y velocidades del aire dentro del colector, podemos notar que a medida que entra el aire dentro del colector la velocidad de este va disminuyendo mientras se distribuye en toda la zona, pero en la salida de aire caliente se presenta una aceleración y el aire supera la velocidad de entrada en un factor de dos aproximadamente, como se muestra en la figura 17. Las cuales pueden ser explicadas, debido a las pérdidas que ocurren experimentalmente por la tapa de la cubierta de vidrio.

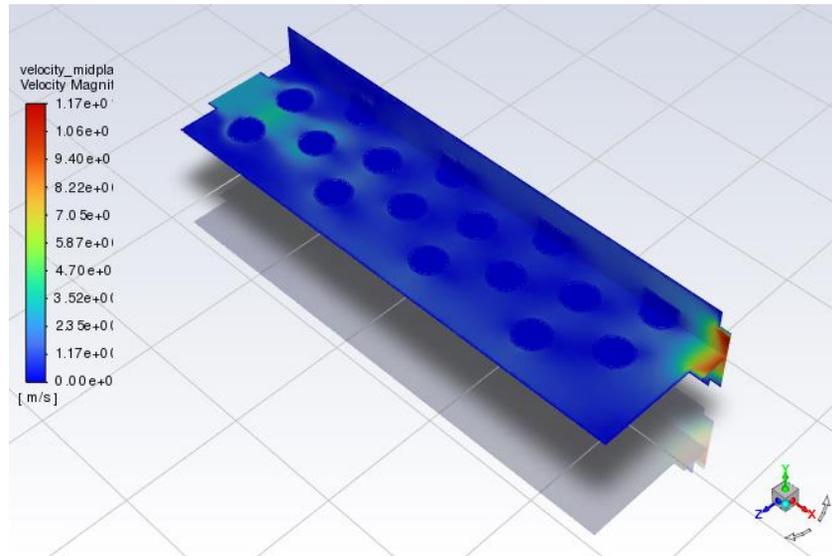


Figura 17. Patrones de flujo y velocidad de aire.

CONCLUSIÓN

Se evidenció el impacto causado por la intermitencia de la energía solar en el rendimiento del sistema. El PCM permitió que el proceso de calentamiento del aire continúe a una temperatura más alta que la del colector sin el sistema de almacenamiento cuando la radiación solar mantenía una tendencia a la baja, como muestran los resultados obtenidos. La temperatura de la placa absorbente del colector sin PCM mantuvo valores de temperatura más altos en comparación con el colector con PCM, la temperatura de salida del colector con PCM se mantuvo por encima de la temperatura de salida del otro colector durante toda la experimentación. En el proceso experimental se encontró que la eficiencia térmica del colector solar con PCM para el día experimental promedio fue del 51%, mientras que la eficiencia térmica del colector sin PCM tuvo un valor del 30% a una velocidad de operación de 3 m/s en cada entrada del fluido de transporte, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Torres-Gallo, et al, 2017, en su investigación, quienes obtuvieron una eficiencia de 43,91%.

A pesar de que la complejidad del modelo numérico en 3 dimensiones es mayor, ya que requiere una mayor cantidad de recursos computacionales, se encontró una adecuada convergencia en los métodos de solución, para resolver los diferentes modelos físicos que lo conforman. El hecho de que se pueda ejecutar simulaciones con un paso de tiempos de 5s, implica que la convergencia de estos modelos puede ser más rápido incluso que el proceso experimental, lo cual abre la posibilidad a explorar diferentes configuraciones y



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019, vigencia: 4 años

establecer posibles mejoras al sistema. Si se limita a analizar y tener en cuenta sólo la temperatura presentada en la salida de aire, el modelo simétrico parece mostrar mejores resultados y con ello una mejor eficacia térmica del sistema, sin embargo, al revisar elementos como la placa absorbadora y la superficie de la unidad de almacenamiento energético, vemos que los resultados numéricos se ajustan mejor en el modelo completo.

REFERENCIAS

- Amraoui, M. A., & Aliane, K. (2018). Three-dimensional analysis of air flow in a flat plate solar collector. *Periodica polytechnica mechanical engineering*, 62(2), 126-135.
- Badie, Z., Eslami, M., & Jafarpur, K. (2020). Performance improvements in solar flat plate collectors by integrating with phase change materials and fins: A CFD modeling. *Energy*, 192, 116719.
- Carmona, M., & Palacio, M. (2019). Thermal modelling of a flat plate solar collector with latent heat storage validated with experimental data in outdoor conditions. *Solar Energy*, 177, 620-633.
- Garzón Romero, J. D., & Ramírez Sapuy, J. C. (2015). Determinación de la eficiencia térmica instantánea y la temperatura de salida del colector solar PSHC-1C, del sistema de entrenamiento en energía solar térmica, ubicado en la Fundación Universitaria Los Libertadores.
- Hamed, M., Fallah, A., & Brahim, A. B. (2017). Numerical analysis of an integrated storage solar heater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(13), 8721-8732.
- Hernández, S. D. (2011). LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.
- Ingle, P. W., Pawar, A. A., Deshmukh, B. D., & Bhosale, K. C. (2013). CFD analysis of solar flat plate collector. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(4), 337-342.
- Kürklü, A., Özmerzi, A., & Bilgin, S. (2002). Thermal performance of a water-phase change material solar collector. *Renewable Energy*, 26(3), 391-399.
- Manilal, K. M. (2016). Design, CFD analysis and fabrication of solar flat plate collector. *Ren Energy*, 6, 1000-1012.
- Martínez, A.; Carmona, M.; Cortés, C.; Arauzo, I. Characterization of Thermophysical Properties of Phase Change Materials Using Unconventional Experimental Technologies. *Energies* 2020, 13, 4687. <https://doi.org/10.3390/en13184687>



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



acreditada
INSTITUCIONALMENTE
Res. MEN 2956 de 22 de marzo de 2019. vigencia: 4 años

- R. Torres-Gallo, P.J. Miranda-Lugo y K.A. Martínez-Padilla, "Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca.", *Tecnológicas*, vol. 20, no. 39, 2017.
- Rincón Ortega, A. Z. (2019). Evaluación analítica y experimental de un sistema de calentamiento solar de agua a baja temperatura con tecnología de almacenamiento térmico con material de cambio de fase (PCM) en términos energéticos y exergéticos (Master's thesis, Universidad del Norte).
- Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318-345.
- Souliotis, M., Singh, R., Papaefthimiou, S., Lazarus, I. J., & Andriosopoulos, K. (2016). Integrated collector storage solar water heaters: survey and recent developments. *Energy Systems*, 7(1), 49-72.
- Victoria, Á. H. R., & Jaramillo, J. C. B. (2005). Disponibilidad térmica solar y su aplicación en el secado de granos. *Scientia et Technica*, 1(27), 127-132.
- Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza, L. F., & Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied thermal engineering*, 23(3), 251-283.