UJAT
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
"Estudio en la duda. Acción en la fe"

JEEOS

Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability

2026



Vol. 10 Núm. 3 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 04-2026-050410175100-102. ISSN: 2448-8186

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.http://www.1atindex.unam.mx/ JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 3, Año 2026, es una publicación continúa editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/, Email: jeeos@ujat.mx. Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2026-050410175100-102, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 15 de diciembre 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

JEEOS
UJAT
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
"Estudio en la duda. Acción en la fe"

Índice Vol. 10 Núm. 3 (2026)

Transformación material en la vivienda chontal, caso de estudio: Huimango, Cunduacán, Tabasco 1-12
Campos-de Dios P.C.[1*], Govea-Ek A.[1]

Inhibición de corrosión en acero API 5L-X52 mediante extracto etanólico de *Tradescantia spathacea Sw* 13-25
Estrada-Hernández G. V., Figueroa-Ramírez S.J.[*], Sierra-Grajeda J.M.T., Santis Espinosa L.F., Benavides O., De la Cruz-May L.

Efecto de las nanoparticulas metálicas sobre el crecimiento de la microalga *Coelastrella sp*. para la producción de biocombustible 26-37
Santis-Espinosa L.F[1*], Figueroa-Ramírez S.J.[1], Vargas-Estrada L.[2], López-Vidaña E.C.[3]

Influence of dopant material on a silicone polymer subjected to low-pressure air plasma treatments 38-52
Alarcón-Hernández F.B.[1]*, Fuentes-Albarrán M. del C.[1], Paredes-Olguín M.[2], Avelar-Domínguez F.[1], Gadea-Pacheco J.L.[1], Sandoval-González A.[3]

Cambio en la producción de potencia empleando Na_2SO_4 en el cátodo de una celda de combustible microbiana 53-60
Fuentes-Albarrán M. del C.[1]*, Alarcón-Hernández F.B.[1], Cornejo-Tapia C.P.[1], Sandoval-González A.[2]

Estudio exploratorio del contenido de etanol en la pulpa de la T*hevetia peruviana* (Pers.) K. Schum en Yucatán, México 61-79
Koh-Echeverría L.E.[1], Amado-Méndez K.[2], Díaz-Ballote, L.F.J.[2], Herrera-Zamora, D.M.[2]*

Determinación de carbohidratos por HPLC: comparación de detectores UV-Vis *vs* índice de refracción 80-93
Fernández-Orozco I.V.[1], Grijalva-Haro M.I.[2], Madrigal-Diaz S.C.[1], Ojeda-Morales M.E.[1], Díaz-Reyes C.C.[1], García-López S.[1], Juárez-Zirate S.J.[3]*

Efecto de un plasma pulsado de aire en las propiedades superficiales de caucho butílico 94-103
Alarcón-Hernández F.B.[1]*, Fuentes-Albarrán M. del C.[1], Garay-Galicia J.A.[1], Sandoval-Gonzáles A.[2]

Estudio del tiempo de fraguado en pastas de cemento con sustitución parcial por biocemento de ostión 104-116
Segundo-Díaz T. de J.[1], Mora-Ortiz R.S.[1]*, Díaz-Alvarado S.A.[1], Ramón-de los Santos C. [2]

Estudio teórico de un captador solar de aire con y sin material de cambio de fase 117-128
Álvarez-Alor B.[1*], Cruz-Valdez J. A. [2], Montalvo D. [3], López-Santos F.[1], Alvarado-Méndez P. E.[4], Zetina-Ríos I. I.[5].

Índice Vol. 10 Núm. 3 (2026)

Estudio teórico de un captador solar de aire con y sin material de cambio de fase

Theoretical study of an air solar collector with and without phase change material

Álvarez-Alor B.[1*], Cruz-Valdez J. A. [2], Montalvo D. [3], López-Santos F.[1], Alvarado-Méndez P. E.[4] Zetina-Ríos I. I. [5].

[1] División de Ingeniería Mecánica, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[2] División de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[3] División de Ingeniería Bioquímica, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[4] División de Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[5] División de Ingeniería en Semiconductores, Instituto Tecnológico Superior de Coatzacoalcos (ITESCO).
[a] Carretera Antigua Minatitlán-Coatzacoalcos Km. 16.5 Col. Reserva Territorial.
* balvareza@itesco.edu.mx

Artículo Científico
Publicado:15 de diciembre 2026

RESUMEN

En la presente investigación se realizó un estudio de la transferencia de calor a un captador solar de aire de dos canales (CSA-2C) con y sin material de cambio de fase (PCM) en la placa absorbedora. El captador se estudió utilizando la técnica de balances globales de energía en una dimensión (1-D) y en estado transitorio. El estudio paramétrico consistió en la modelación numérica del CSA-2C para el día más frío y más cálido de cada mes del año 2022 en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Adicionalmente, se consideró el captador sin PCM y se probaron 4 diferentes PCM en la placa absorbedora con espesores de 0.01 m y 0.025 m. Se desarrolló un código numérico en C el cual consiste en una serie de subrutinas que resuelven el modelo matemático obtenido de la técnica de balances globales de energía. Finalmente, del estudio paramétrico se encontró que la mejor configuración fue el CSA-2C con PCM Rubitherm RT28 con 25 mm de espesor, el cual puede suministrar hasta 13 horas de confort térmico, tiene un tiempo de recuperación de la inversión inicial de 18 años y evita emitir al ambiente hasta 420 kg de CO_2 al año, reduciendo los gases de efecto invernadero.

Palabras clave: Captador solar de aire; Eficiencia térmica; Estudio paramétrico; Material de cambio de fase; Modelo numérico transitorio.

ABSTRACT

This research presents a study of heat transfer in a two-channel air-source solar collector (SAC-2C) with and without phase-change material (PCM) on the absorber plate. The collector was analyzed using one-dimensional (1-D) global energy balances under transient conditions. The parametric study involved numerical modeling of the CSA-2C for the coldest and warmest days of each month in 2022 in Cuernavaca, Morelos, Mexico. Additionally, the collector was tested without PCM, and four different PCMs with thicknesses of 0.01 m and 0.025 m were applied to the absorber plate. A numerical code was developed in C, consisting of a series of subroutines that

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

solve the mathematical model obtained from the global energy balance technique. Finally, the parametric study found that the best configuration was the CSA-2C with PCM Rubitherm RT28 with a thickness of 25 mm, which can provide up to 13 hours of thermal comfort, has a payback period of 18 years and avoids emitting up to 420 kg of CO2 per year into the environment, reducing greenhouse gases.

Keywords: Parametric study; Phase change material; Solar air collector; Transient numerical model; Thermal efficiency

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de energías renovables, como la solar, aplicada al diseño de captadores solares, contribuye al ahorro y uso eficiente de energía en aplicaciones como el secado de productos y semillas agrícolas, la climatización de edificaciones y la generación eléctrica [1]. Los captadores solares de aire (CSA) son dispositivos diseñados para transferir la energía solar incidente a un fluido de trabajo (aire), que se emplea con distintos fines [2].

Actualmente, se han desarrollado estudios teórico-experimentales en estado transitorio para mejorar su eficiencia térmica, utilizando la técnica de Balances Globales de Energía (GEB) [1,3-11]. Una de las principales limitaciones de los captadores solares convencionales es la dependencia directa de la disponibilidad de radiación solar. Para reducir este efecto, se ha estudiado la incorporación de PCM como sistemas de almacenamiento de energía térmica. Estos materiales permiten almacenar una cantidad considerable de energía mediante calor latente durante el proceso de fusión y liberarla posteriormente durante la solidificación [11–16]. Su aplicación en captadores solares puede favorecer una mayor continuidad en el suministro de energía térmica durante los periodos de baja radiación solar [13,15].

El modelado del proceso de cambio de fase representa un desafío debido a la interacción entre la transferencia de calor sensible y latente, así como a la evolución de la interfaz sólido-líquido [17–20]. En trabajos previos se ha demostrado la utilidad de los modelos transitorios para analizar el comportamiento térmico de captadores solares de dos canales [1,3]. Particularmente, Álvarez et al. [21] analizaron teóricamente la incorporación de PCM en un captador solar de aire de dos canales, evaluando diferentes materiales y espesores. A partir de la revisión de la literatura, el presente estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento térmico de un CSA-2C en estado transitorio, con y sin PCM en la placa absorbedora, bajo las condiciones climáticas de Cuernavaca, Morelos.

MODELO FÍSICO Y MATEMÁTICO

En este apartado se muestran el modelo físico representativos del caso de estudio, así como los modelos matemáticos en estado transitorio para el CSA-2C con material de cambio de fase que se deben resolver para obtener los perfiles de temperatura.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

Modelo físico. Un captador solar de aire está definido como una clase especial de intercambiador de calor que transforma la energía radiante solar en calor [2]. En general, un captador solar convencional está compuesto por una estructura que sostiene un absorbedor, una cubierta y un aislamiento en la parte trasera. En condiciones normales de operación un captador solar de aire recibe radiación solar en la cubierta superior, una parte de ´esta energía se pierde debido a diversas causas como lo son: la reflexión y absorción de la cubierta superior, convección forzada provocada por la velocidad del viento, convección y radiación entre la cubierta de vidrio y la placa absorbedora, etc., y la otra parte de dicha energía es transferida al fluido de trabajo [2]. Por lo tanto, al lograr que la mayor parte de la energía, proveniente de la radiación solar, sea transferida al fluido provocará un incremento en la eficiencia térmica del captador.

En la **Figura 1** se muestra el diagrama esquemático del CSA-2C con PCM en la placa absorbedora. En particular, se muestran las temperaturas de cada uno de los elementos analizados (T_i), el espesor de cada uno de los materiales (H_{yi}) y los flujos de calor por conducción, convección o radiación ($q_{cond,conv\ o\ rad}$). El dispositivo está formado por una cubierta de vidrio, una placa absorbedora, una capa de PCM, una segunda placa absorbedora, una superficie inferior, una capa de triplay, una capa de material aislante y una placa de metal. El fluido de transferencia de calor (aire) es impulsado mediante convección forzada a través del canal 1 y 2 (f_1 y f_2). Además, se muestra un acercamiento al PCM que se ubica entre las dos placas absorbedoras. Se observa que este elemento se seccionará en $N_{y,PCM}$ elementos.

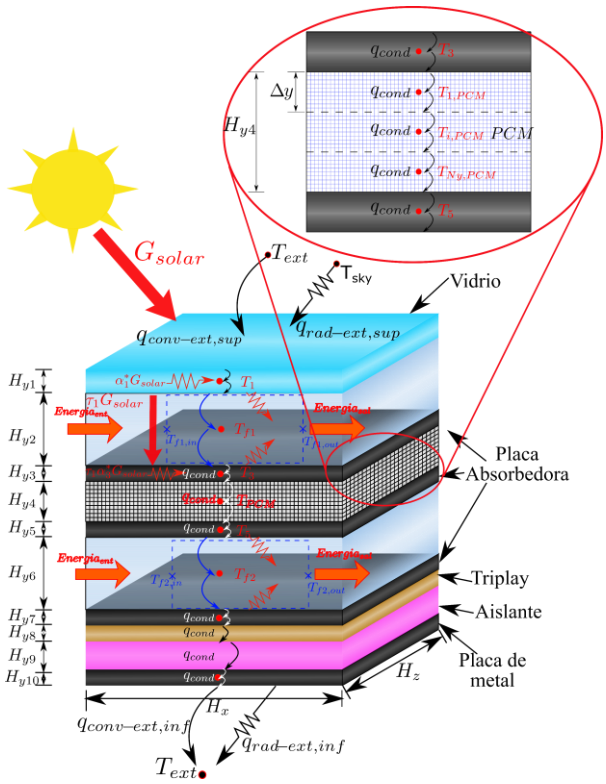


Figura 1. Modelo físico del CSA-2C con PCM en la placa absorbedora

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

Modelo matemático. Para el desarrollo del modelo matemático se utilizó la técnica de balances globales de energía en estado transitorio, Ec. (1), se utiliza la metodología presentada y validada en [3]. Los términos transitorios se discretizaron utilizando el método completamente implícito, realizando una diferencia regresiva como se explica en [1]. Se utilizó el método del Calo especifico efectivo (*Cp-efectivo*) para analizar el fenómeno de transferencia de calor por conducción en el PCM.

$$q_{entra,1} - q_{sale,1} = \frac{d}{dt}(\rho_1 Cp, 1T_1)AH_{y1} \qquad (1)$$

En la Ec. (2) se muestra la matriz tridiagonal que modela el comportamiento térmico del CSA-2c en estado transitorio y con PCM en la placa absorbedora.

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & -a_1a_2a_4 & -a_1a_2a_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -b_2 & A_{2,2} & -b_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1c_3 & -c_2c_3 & A_{33} & -c_1c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -d_2 & A_{4,4} & -d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -e_2 & A_{5,5} & -e_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -f_2 & A_{6,6} & -f_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_2g_3 & A_{7,7} & -g_1g_3 & -g_1g_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -p_2 & A_{8,8} & -p_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_1r_3 & -r_2r_3 & A_{9,9} & -r_1r_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -s_2 & A_{10,10} \end{bmatrix}$$

- $\begin{bmatrix} T_1 \\ T_{f1} \\ T_3 \\ T_{1,PCM} \\ T_{iPCM} \\ T_{Ny,PCM} \\ T_5 \\ T_{f2} \\ T_7 \\ T_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_{4,1} \\ B_{4,i} \\ B_{4,Ny} \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \\ B_8 \end{bmatrix}$

Donde,

$$\begin{aligned}
A_{11} &= a_1a_2a_3 + a_1a_2a_4 + a_2a_3a_4 \\
&\quad + a_1a_2a_3a_4a^0_{p,1} \\
A_{2,2} &= b_1 + b_2 + \tfrac{b_1b_2b_3}{\gamma} + b_1b_2a^0_{p,f1} \\
A_{3,3} &= c_1c_2 + c_1c_3 + c_2c_3 \\
&\quad + c_1c_2c_3a^0_{p,3} \\
A_{4,4} &= d_1 + d_2 + d_1d_2a^0_{p,1,PCM} \\
A_{5,5} &= e_1 + e_2 + e_1e_2a^0_{p,i,PCM} \\
A_{6,6} &= f_1 + f_2 + f_1f_2a^0_{p,Ny,PCM} \\
A_{7,7} &= g_1g_2 + g_1g_3 + g_2g_3 \\
&\quad + g_1g_2g_3a^0_{p,5} \\
A_{8,8} &= p_1 + p_2 + \tfrac{p_1p_2p_3}{\gamma} + p_1p_2a^0_{p,f2} \\
A_{9,9} &= r_1r_2 + r_1r_3 + r_2r_3 \\
&\quad + r_1r_2r_3a^0_{p,7} \\
A_{10,10} &= s_1 + s_2 + s_1s2a^0_{p,8}
\end{aligned} \qquad (2)$$

$$\begin{aligned}
B_1 &= a_2a_3a_4T_{ext} + a_1a_3a_4T_{sky} \\
&\quad + a_1a_2a_3a_4\alpha^*_1G_{solar} \\
&\quad + a_1a_2a_3a_4a^0_{p,1}T^0_1 \\
B_2 &= \tfrac{b_1b_2b_3}{\gamma}T_{f1,in} + b_1b_2a^0_{p,f1}T^0_{f1} \\
B_3 &= c_1c_2c_3\tau^*_1\alpha^*_3G_{solar} \\
&\quad + c_1c_2c_3a^0_{p,3}T^0_3 \\
B_{4,1} &= d_1d_2a^0_{p,1,PCM}T^0_{1,PCM} \\
B_{4,i} &= e_1e_2a^0_{p,i,PCM}T^0_{i,PCM} \\
B_{4,Ny} &= f_1f_2a^0_{p,Ny,PCM}T^0_{Ny,PCM} \\
B_5 &= g_1g_2g_3a^0_{p,5}T^0_5 \\
B_6 &= \tfrac{p_1p_2p_3}{\gamma}T_{f2,in} + p_1p_2a^0_{p,f2}T^0_{f2} \\
B_7 &= r_1r_2r_3a^0_{p,7}T^0_7 \\
B_8 &= s_1T_{ext} + s_1s2a^0_{p,8}T^0_8
\end{aligned}$$

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

Los coeficientes $(a_i,\ b_i,\ etc.)$ mostrados en la matriz corresponden a resistencias conductivas, convectivas y/o radiativas, que tienen la siguiente estructura:

$$h_{conv} + \frac{H_{yi}}{2\lambda_i}, \qquad \frac{H_{yi}}{2\lambda_i} + \frac{\Delta_{yi,PCM}}{2\lambda_{yi,PCM}}, \qquad \frac{1}{h_{rad}}$$

Los coeficientes de transferencia de calor asociados a estas ecuaciones se calculan en cada instante de tiempo con la temperatura media de los distintos elementos utilizando las correlaciones empíricas que se presentan en [3].

Se utilizó el método del *Cp-efectivo* para modelar el comportamiento del PCM. En donde, se contempla que el término de la entalpía de cambio de fase forma parte del término Cp en cada ecuación resultante. La implementación del método del Cp-efectivo para modelar el comportamiento térmico del PCM ha sido ampliamente utilizado en la literatura [14,19-21].

$$C_{p-efectivo} = \begin{cases} C_{p,sol} & T < T_{sol} \\ \frac{C_{p,sol}+C_{p,liq}}{2} + \frac{h_{ls}}{\Delta T} & T_{sol} \leq T \leq T_{liq} \\ C_{p,liq} & T > T_liq \end{cases}$$

En la **Tabla 1** se muestran las propiedades y sus equivalencias de acuerdo con los posibles escenarios durante la transferencia de calor por conducción.

Tabla 1. Propiedades del sistema para cada fase

Sólido si $T < T_{sol}$
$\rho(i,j) = \rho_{sol}$
$\lambda(i,j) = \lambda_{sol}$
$C_{p,efectivo}(i,j) = C_{p,sol}$
Mezcla si $T_{sol} \leq T \leq T_{liq}$
$\rho(i,j) = \frac{\rho_{sol} + \rho_{liq}}{2}$
$\lambda(i,j) = \frac{\lambda_{sol} + \lambda_{liq}}{2}$
$C_{p,efectivo}(i,j) = \frac{C_{p,sol} + C_{p,liq}}{2} + \frac{h_{ls}}{\Delta T}$
Líquido si $T > T_{liq}$
$\rho(i,j) = \rho_{liq}$
$\lambda(i,j) = \lambda_{liq}$
$C_{p,efectivo}(i,j) = C_{p,liq}$

Nota: Recuperado de [21]

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

RESULTADOS

El estudio paramétrico consistió en la evaluación del CSA-2C con y sin PCM en la placa absorbedora. En cuanto al estudio paramétrico, se estableció como condición de referencia la configuración del CSA-2C sin incorporación de PCM en la placa absorbedora como un dispositivo de control para comparar los resultados obtenidos por el CSA-2C con PCM. Se evaluó el comportamiento térmico de cuatro PCM diferentes y se consideraron 2 espesores en el PCM (10mm y 25mm), las propiedades y nombres de estos se muestra en la **Tabla 2**. En la columna 5 de la Tabla 2, se muestra el intervalo de temperatura de cambio de fase (T_{pc}). En este sentido, el PCM se comporta como sólido abajo del límite inferior, como líquido sobre el límite superior y se comporta como mezcla (parte líquida y parte sólida) en el intervalo presentado. El nombre comercial de los PCM estudiados es el valor promedio de dicho intervalo

Tabla 2. Propiedades de los PCM

PCM	λ $\left(\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg°C}}\right)$	C_p $\left(\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg°}C}\right)$	ρ $\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right)$	T_{pc} $(°C)$	h $\left(\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}\right)$
RT 18 HC	0.20	2×10^3	880-770	17-19	260
RT 25 HC	0.20	2×10^3	880-770	22-26	230
RT 28 HC	0.20	2×10^3	880-770	27-29	250
RT 34 HC	0.20	2×10^3	880-770	34-36	240

Nota: Recuperado de [21]

En la **Figura 2** se muestran los perfiles de temperatura de los distintos elementos para el CSA-2C con un espesor de 25 mm de PCM RT-28. En particular, se muestra la temperatura promedio de la cubierta de vidrio de color cian, de negro la placa absorbedora 1, de gris el PCM, de rojo la placa absorbedora 2, de naranja la placa absorbedora 3 y de café la superficie inferior del CSA. Además, se muestra la temperatura de salida del aire del canal 1 y 2 de color verde y azul, respectivamente. De igual forma, se presenta de color rosa la temperatura ambiente, con una línea punteada de color rojo la radiación solar incidente en el captador y de color verde claro la fracción liquida promedio del PCM. Finalmente, se muestra con una franja azul la temperatura de confort para el día y clima analizado.

En la **Figura 2** se observa que la implementación del PCM logra prolongar el tiempo de operación del CSA-2C después de la puesta del sol. Se observa que la temperatura de los distintos elementos se incrementa en hasta 6°C en los periodos donde no existe radiación solar. A diferencia de la configuración sin PCM en la que la temperatura de los distintos elementos es igual a la temperatura ambiente cuando no existe radiación. Además, se observa que el PCM logró fundirse y solidificarse

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

completamente en un día de operación. La implementación del PCM permitió incrementar el periodo de permanencia dentro del rango de confort térmico.

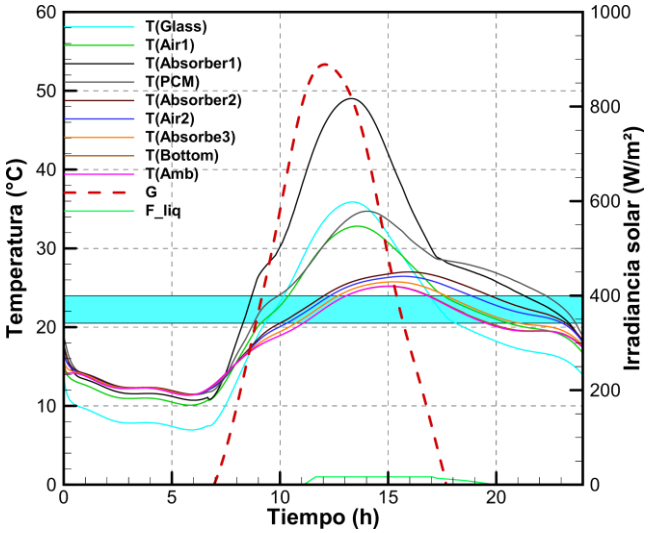


Figura 2. Perfiles de temperatura del CSA-2c con RT-28 y 25mm de espesor, 14 de enero.

En la **Figura 3** se muestra las horas de confort térmico que pueden suministrar las diferentes configuraciones estudiadas para los días más fríos de cada mes. Análogamente, en la **Figura** 4 se muestran las horas de confort térmico de las distintas configuraciones para los días más cálidos de cada mes. Se observa que la configuración sin PCM puede suministrar desde 1.5 hasta 5 horas de confort. Mientras que el RT28 con 25 mm de espesor es la mejor configuración para este tipo de clima tanto para los días fríos como los días cálidos, dado que puede suministrar hasta 12.5 horas de confort térmico. Otra configuración que presentó buenos resultados fue el RT25 con 25 mm de espesor que obtuvo hasta 11 horas de confort térmico. Las demás configuraciones de PCM lograron producir desde 4.5 hasta 9 horas de confort térmico.

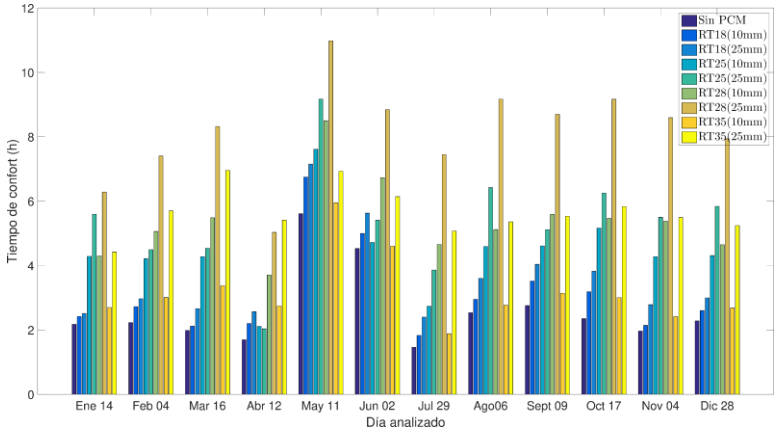


Figura 3 Horas de confort para el CSA-2C sin y con PCM (Días más fríos de cada mes)

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

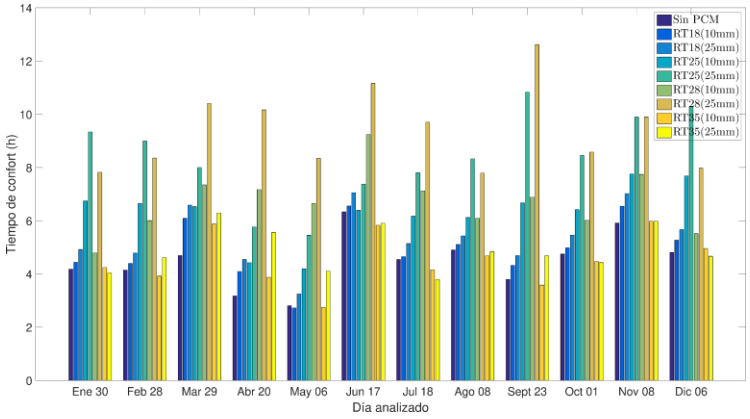


Figura 4 Horas de confort para el CSA-2C sin y con PCM (Días más cálidos de cada mes)

Los resultados obtenidos muestran que la configuración con RT28 y 25 mm de espesor presentó el mejor comportamiento térmico para las condiciones climáticas de Cuernavaca. Este resultado puede atribuirse principalmente a la combinación entre la temperatura de cambio de fase del RT28 y su capacidad de almacenamiento de energía. El espesor de 25 mm permite incorporar una mayor cantidad de material de cambio de fase respecto a una capa de 10 mm, incrementando la masa disponible para almacenar energía en forma de calor sensible y, principalmente, de calor latente durante el proceso de fusión. Aunque un mayor espesor puede incrementar la resistencia a la transferencia de calor dentro del PCM, en este caso el incremento de la capacidad de almacenamiento compensó dicho efecto.

La temperatura de fusión del RT28 resulta adecuada para las temperaturas alcanzadas por la placa absorbedora durante la operación del captador. Esto permite que una parte importante de la energía solar absorbida sea almacenada durante los periodos de mayor radiación, evitando un incremento excesivo de la temperatura de la placa. Posteriormente, cuando la radiación solar disminuye, el PCM inicia su solidificación y libera gradualmente la energía almacenada hacia la placa y el flujo de aire.

Por lo tanto, el mejor desempeño del RT28 de 25 mm no se relaciona únicamente con alcanzar una mayor temperatura, sino con su capacidad para almacenar una mayor cantidad de energía y prolongar la entrega de calor al aire durante los periodos de menor radiación solar. En las condiciones analizadas, esta configuración representa un equilibrio favorable entre capacidad de almacenamiento, temperatura de cambio de fase y transferencia de calor.

Finalmente, se realizó un análisis de la inversión inicial, considerando un tiempo de vida útil del PCM de 27.4 años. Para este estudio se consideró los costos de construcción del CSA-2C con y sin PCM. Se encontró que el CSA-2C sin PCM tiene un costo aproximado de $7,800.00 MXN. Mientras que la configuración con PCM tiene un costo aproximado de $32,000.00 MXN y $65,000.00MXN para la configuración de 10 mm y 25 mm de espesor, respectivamente. Para calcular el tiempo de retorno se parte de la premisa que el CSA-2C suplirá la carga térmica de un calentador eléctrico con el 100% de la eficiencia. Se aplicó la regla del trapecio para encontrar la

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

energía total entregada por el dispositivo y se consideró que el mes se comporta con la mitad de día fríos y la mitad de días cálidos. Para el análisis de la inversión inicial se utilizó la metodología presentada por Alvarez *et al.* [5] se consideró la inflación en el calculo del retorno de la inversión inicial, para ello se utilizó la Ec. (3).

$$\begin{aligned} CTR_i &= CTR_{i-1} + GAM \cdot Inflation \\ &\quad + GEV \cdot Inflation \\ &\quad - CEA \cdot Inflation \end{aligned} \qquad (3)$$

Del estudió se encontró que para la ciudad de Cuernavaca se tendría un periodo de recuperación de 18 años donde el CSA-2C con RT-28 y 25 mm de espesor sería totalmente autosustentable generando ahorros sustanciales a los usuarios. Posteriormente, se realizó un estudió del impacto ambiental que tendría la implementación de la tecnología presentada. Para ello se implementó la formula presentada por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), la cual establece que el factor de emisión para el año 2024 se puede calcular mediante la Ec. (4).

$$1\text{kWh} = 0.438\text{kg}\,CO_2 \qquad (4)$$

En la **Figura 5** se muestra la cantidad en kg de $C0_2$ que se dejan emitir al ambiente cada año para cada una de las configuraciones. Se encontró que el utilizar este tipo de energía para la climatización pasiva de edificaciones puede dejar de emitir hasta 400 kilogramos de CO_2 anualmente por cada m^2 de instalación.

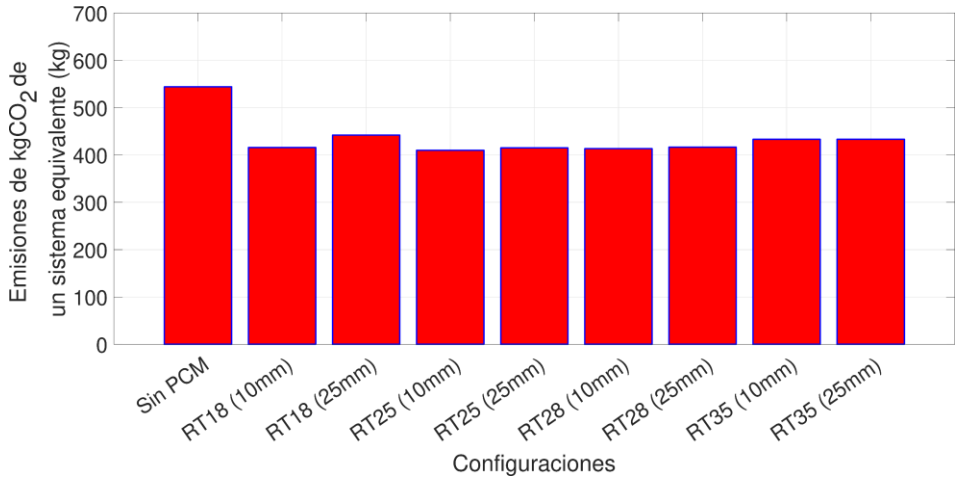


Figura 5 Emisiones equivalentes de kg de CO_2 para las diferentes configuraciones del CSA-2C en Cuernavaca

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

CONCLUSIONES

En la presente investigación se muestra la viabilidad para implementar un CSA-2C utilizando un material de cambio de fase en la placa absorbedora sujeto a las condiciones meteorológicas de la Ciudad de Cuernavaca, Morelos, México. Entre los principals hallazgos de la investigación se encuentran los siguientes:

- Implementar la tecnología PCM provoca un decremento de hasta de 10% en la eficiencia térmica del CSA-2C sin PCM. Sin embargo, los PCM logran prolongar hasta 10 horas el tiempo de operación del CSA-2C.
- La mejor configuración para el clima de Cuernavaca, Morelos es el Rubitherm RT-28 con 25 mm de espesor. El cual puede suministrar hasta 12 horas de confort térmico.
- El tiempo de recuperación del CSA-2C con RT-28 y 25 mm de espesor es de 18 años. Considerando que la vida útil del PCM es de 27.4 año, la implementación de la tecnología PCM para la climatización pasiva de edificaciones se convierte en una alternativa viable.
- Implementar un CSA-2C con o sin PCM en la placa absorbedora puede disminuir las emisiones de CO2 hasta en 550 kg cada año por cada m2 de instalación.

RECOMENDACIONES

Con la finalidad de dar continuidad y contribuir a la mejora de esta línea de investigación se proponen las siguientes recomendaciones:

1. Realizar una evaluación térmica con otras condiciones meteorológicas características de la República Mexicana.
2. Utilizar otros PCM que tengan mayor capacidad de almacenamiento de energía.
3. Implementar la tecnología PCM en un prototipo experimental para validad los resultados obtenidos por el Código numérico.
4. Realizar un estudio teórico implementando la técnica de volumen finito.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Instituto Superior de Coatzacoalcos (ITESCO) por el soporte institucional proporcionado.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

REFERENCIAS

[1] B. Álvarez, J. Arce y D. Colorado,"Transient study (annual) of the heat transfer of a two-channel solar air collector," ASME J. Sol. Energy Eng., vol. 146, no. 1, Art. no. 011005, 2024.

[2] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman y A. S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer,6th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.

[3] B. Álvarez, J. Arce, Y. Chávez y L. Lira, "Theoretical and experimental study of heat transfer in a two-channel flat plate solar air collector," ASME J. Sol. Energy Eng., vol. 147, no. 2, Art. no. 021005, 2025.

[4] C. M. Vivek, "Review of flat plate solar collectors and solar energy utilization in India," Int. J. Sci. Res. Rev.,vol. 8, no. 2, pp. 4391–4405, 2019.

[5] T. T. Zhu, Y. H. Diao, Y. H. Zhao, C. Ma, T. Y. Wang y J. Liu,"A comparative investigation of two types of MHPA flat-plate solar air collector based on exergy analysis," ASME J. Sol. Energy Eng.,vol. 139, no. 5, Art. no. 051011, 2017.

[6] P. Pal y R. Dev,"Thermal modeling, experimental validation, and comparative analysis of modified solar stills," ASME J. Sol. Energy Eng., vol. 141, no. 6, Art. no. 061013, 2019.

[7] J. M. Afaq,"Thermal evaluation of a double-pass unglazed solar air heater with perforated plate and wire mesh layers," Sustainability, vol. 12, no. 9, p. 3619, 2020.

[8] R. Garay, B. Arregi, I. Gomis, P. Bonnamy, S. Raji y J. Lopez, "Performance assessment of an unglazed solar thermal collector for envelope retrofitting," Energy Procedia,vol. 115, pp. 361–368, 2017.

[9] E. Mahmoud y A. Ahmed,"Energy and exergy analysis of a thermosiphon and forced-circulation flat-plate solar collector using MWCNT/water nanofluid," Case Stud. Therm. Eng., vol. 14, Art. no. 100416, 2019.

[10] Z. Liu, Y. Liu, D. Wu, G. Jin, H. Yu y W. Ma,"Performance and feasibility study of solar-air source pump systems for low-energy residential buildings in alpine region," J. Clean. Prod., vol. 256, Art. no. 120735, 2020.

[11] A. D. Tuncer, A. Amini y A. Khanlar, "Experimental and transient CFD analysis of parallel-flow solar air collectors with paraffin-filled recyclable aluminum cans as latent heat energy storage unit," J. Energy Storage, vol. 770, Art.no. 108009, 2023.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707

[12] A. M. Fadhil, J. M. Jalil y G. A. Bilal, "Experimental and numerical investigation of solar air collector with phase change material in column obstruction," J. Energy Storage,vol. 79, Art. no. 110066, 2024.

[13] Z. Badiei, M. Eslami y K. Jafarpur,"Performance improvements in solar flat plate collectors by integrating with phase change materials and fins: A CFD modeling," Energy, vol. 192, Art. no. 116719, 2020.

[14] M. Abuşka, S. Şevik y A. Kayapunar, "Experimental analysis of solar air collector with PCM-honeycomb combination under natural convection," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 195, pp. 299–308, 2019.

[15] A. K. Raj, M. Srinivas y S. Jayaraj,"Transient CFD analysis of macro-encapsulated latent heat thermal energy storage containers incorporated within solar air heater," Int. J. Heat Mass Transf., vol. 156, Art. no. 119896, 2020.

[16] M. Abuşka, S. Şevik y A. Kayapunar, "A comparative investigation of the effect of honeycomb core on the latent heat storage with PCM in solar air heater," Appl. Therm. Eng.,vol. 148, pp. 684–693, 2019.

[17] H. Yang y Y. He,"Solving heat transfer problems with phase change via smoothed effective heat capacity and element-free Galerkin methods,"Int. Commun. Heat Mass Transf., vol. 37, pp. 385–392, 2010.

[18] B. Zivkovic y I. Fuji, "An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers," Energy Build., vol. 70, pp. 51–61, 2001.

[19] L. Klimeš, P. Charvát y M. Ostry, "Challenges in the computer modelling of phase change materials," Mater. Tehnol., vol. 46, pp. 335–338, 2012.

[20] P. Charvát, L. Klimeš y M. Ostry, "Numerical and experimental investigation of a PCM-based thermal storage unit for solar air systems," Energy Build., vol. 68, pp. 488–497, 2014.

[21] B. Álvarez, J. Arce, F. López-Santos, J. A. Cruz, D. Montalvo, D. Colorado-Garrido y L. G. Carreto-Hernandez, "Theoretical study of heat transfer in a two-channel flat-plate air solar collector with and without phase change material," ASME J. Sol. Energy Eng., vol. 148, no. 3, 2026.

Registro ISSN 2448-8186
DOI:10.19136/Jeeos.a10n3.6707