

Investigación experimental de un calentador solar de aire de doble flujo de convección natural de alta eficiencia

Experimental research of a high efficiency natural convection double-flow solar air heater

José Quiñonez Choquecota 

Departamento Académico de Físico Matemáticas, Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú

Autor para correspondencia e-mail: josequch@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-1966-2146>

ARTÍCULO ORIGINAL

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Artículo recibido: 11/05/2019
Artículo aceptado: 28/09/2019
En línea: 25/10/2019

PALABRAS CLAVE:

absorbente corrugado en V,
calentador solar de aire,
convección natural,
eficiencia térmica,
flujo en paralelo

ORIGINAL ARTICLE

ARTICLE INFORMATION

Article received: 11/05/2019
Article accepted: 28/09/2019
On line: 25/10/2019

KEYWORDS:

corrugated absorbent V,
natural convection,
parallel flow,
solar air heater,
thermal efficiency

RESUMEN

Se presenta el diseño, construcción y evaluación de un colector solar calentador de aire de doble flujo en paralelo que tiene la placa absorbente corrugada en forma de V y que funciona por convección natural. El colector se ha evaluado para cielo claro al instalar sobre una pared vertical en la ciudad de Puno, orientado hacia el norte geográfico en época de otoño. Los parámetros de rendimiento permitieron obtener alta eficiencia y la construcción es de bajo costo. La temperatura máxima de salida del aire del colector alcanzó 95,7 °C para una intensidad solar de 758 W/m², y el flujo másico promedio para días soleados fue de 0,0094 kg/s, además se encontró que el flujo másico es muy sensible a la velocidad y densidad del aire. La eficiencia promedio del colector es de 51,1 % el cual representa un buen rendimiento dado que extrae gran cantidad de energía térmica completamente pasiva sin requerir una energía exterior adicional. El colector diseñado es respetuoso con el medio ambiente y está diseñado para satisfacer las demandas de energía en regiones frías, puede operar con mayor eficiencia en los periodos de otoño e invierno por poseer en esta época de mayor ángulo de incidencia.

ABSTRACT

The design, construction and evaluation of a parallel dual-flow air heater solar collector that has the V-shaped corrugated absorbent plate and that works by natural convection is presented. The collector has been evaluated for clear sky when installed on a vertical wall in the city of Puno, oriented towards the geographical north in the autumn season. The performance parameters allowed to obtain high efficiency and the construction is low cost. The maximum outlet air temperature of the collector reached 95,7 °C for a solar intensity of 758 W/m², and the average mass flow for sunny days was 0,0094 kg/s, in addition it was found that the mass flow is very sensitive to air velocity and density. The average efficiency of the collector is 51,1% which represents a good performance since it extracts a large amount of completely passive thermal energy without requiring additional external energy. The designed collector is respectful with the environment and is designed to meet the energy demands in frigid regions, it can operate more efficiently in the autumn and winter periods because it has a higher incidence angle at this time.

INTRODUCCIÓN

La demanda de energía aumenta considerablemente cada año producto del desarrollo económico, en consecuencia, el aumento de gases de efecto invernadero provenientes principalmente por el consumo de combustibles fósiles ha originado el aumento de la temperatura promedio mundial y la concentración del CO₂. Para remediar los impactos climáticos adversos por el consumo de los combustibles fósiles, los científicos se han interesado por aprovechar los recursos renovables, principalmente la energía solar y la energía eólica. La energía solar es la más utilizada para la refrigeración y la calefacción, ya que puede ser utilizada directamente, no contamina el medio ambiente, es continua y libre. Uno de los sistemas más importantes para la calefacción es el calentador solar de aire (CSCA), que es un artefacto térmico que se utiliza para convertir la energía solar incidente en energía térmica transferida al aire que circula. La estructura del CSCA es relativamente simple, el mantenimiento y el costo de construcción son bajos. Las aplicaciones más frecuentes del calentador solar de aire son para el secado de productos agrícolas, la calefacción o ventilación de espacios y edificios para mantener la comodidad durante el invierno o el verano (Saravanakumar, Somasundaram, y Matheswaran, 2019; Sharma, Madhwesh, y Karanth, 2019; Singh Patel y Lanjewar, 2019).

Los CSCA han sido estudiados durante muchos años y los investigadores han orientado su atención en aumentar su rendimiento térmico y rentabilidad. Se ha observado que la desventaja del CSCA de absorbente plano, es su baja eficiencia a causa de la escasa capacidad calorífica del aire y la formación de una subcapa laminar viscosa sobre la superficie absorbente que causa la baja transferencia del calor por convección entre la placa absorbente y el aire que fluye (Singh Bisht, Kumar Patil, y Gupta, 2018; Singh y Singh, 2018). Para mejorar el rendimiento del CSCA se ha desarrollado diversas técnicas y teorías (Duffie y Beckman, 2013; Ong, 1995) como por ejemplo, proporcionar una rugosidad artificial en la parte inferior o superior de la placa absorbente para romper la subcapa laminar, hacer fluir el fluido

Rev. Investig. Altoandín. 2019; Vol 21 Nro 4 274 - 282

a ambos lados de la placa absorbente, inducir en la transferencia de calor por convección forzada, reciclar el aire, unir las aletas o deflectores a la placa absorbente o corrugar la placa absorbente e incorporar materiales porosos (Mzad, Bey, y Khelif, 2019; Saravanakumar et al., 2019).

La literatura demuestra que el CSCA de doble paso del aire ya sea en flujo paralelo (Forson, Nazha, y Rajakaruna, 2003; Hegazy, 2000; Jha, Choudhury, Gargi, y Zaidp, 1992; Pawar, Takwale, y Bhide, 1994), o en contraflujo (González, Larsen, Hernández, y Lesino, 2014; Karim, Perez, y Amin, 2014) pueden proporcionar un rendimiento térmico mayor en comparación con el CSCA de único paso de aire para las mismas condiciones de operación (Alam y Kim, 2017; Hernández y Quiñonez, 2013). El principal inconveniente de un calentador solar de aire de flujo paralelo es que para alcanzar tal eficiencia requiere de usar una fuente con una capacidad de potencia de bombeo muy alta para reducir pérdidas de calor (Fudholi y Sopian, 2019). Sin embargo, en CSCA de contraflujo el factor más indeseable es que además de requerir una fuente de bombeo también aumenta la caída de presión durante el funcionamiento (Singh, Dhruw, y Chander, 2019).

Aunque existen sobre todo investigaciones de los CSCAs que operan por flujo forzado por su mayor eficiencia, impera un importante interés por estudiar los CSCAs que funcionan por convección natural, debido a que es independiente de las fuentes de energía externas para impulsar el aire, reduciendo el costo de operación y mantenimiento. Cuzminschi, Gherasim, Girleanu, Zubarev, y Stamatina (2018) analizaron numéricamente un nuevo diseño de CSCA de doble flujo en paralelo, multiuso de libre convección con placa absorbente corrugado en forma de V. El rendimiento térmico promedio del calentador de aire diseñado es 60,4% para las horas pico de sol, y concluyeron que el dispositivo puede reducir significativamente los costos de calefacción y proteger el medio ambiente. Hernández y Quiñonez (2018) estudiaron analítica y experimentalmente un CSCA de doble flujo en

paralelo que funciona por convección natural con placa absorbente en forma de V, ellos observaron que los valores diarios de eficiencia oscilaron entre 48% y 50% durante los días soleados.

Teniendo en cuenta la literatura, el objetivo de la investigación fue diseñar, construir y evaluar un nuevo CSCA de doble flujo en paralelo, que opera por convección libre que tiene una placa absorbente corrugada en forma de V. Se evaluó los parámetros de rendimiento, asimismo la eficiencia teórica y experimentalmente del CSCA al instalarlo sobre una pared vertical orientada al norte geográfico. El diseño es novedoso por que se incorpora una placa absorbente corrugada en forma de V con ápice de 90°, una campana en forma de capucha en la parte superior del colector para recoger el aire caliente de salida y una forma amplia del colector en la entrada del aire a lo ancho del colector. El desarrollo del nuevo CSCA, brinda a la industria y la ciencia, parámetros para construir CSCAs de alta eficiencia y contribuimos a la sociedad con un nuevo sistema de calefacción de bajo costo, para las regiones frías.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño y construcción

El diseño del CSCA se realizó en base a los diseños de los investigadores Cuzminschi et al. (2018), Hernández y Quiñonez (2013), Hernández y Quiñonez (2018), Sevik y Abuska (2019), Karim et al. (2014), El-Sebaili, Aboul-Enein, Ramadan, Shalaby, y Moharram (2011) y Hatami y Bahadorinejad (2008), combinando convenientemente los aspectos comunes entre ellos sobre, la forma, las dimensiones, la construcción y los componentes que mejoran la eficiencia. La investigación se realizó en el Centro de Investigación en Energías Renovables CINER - Puno, en la región Puno, Perú, (latitud: - 15,823°, longitud: -70,012° y 3832 m.s.n.m).

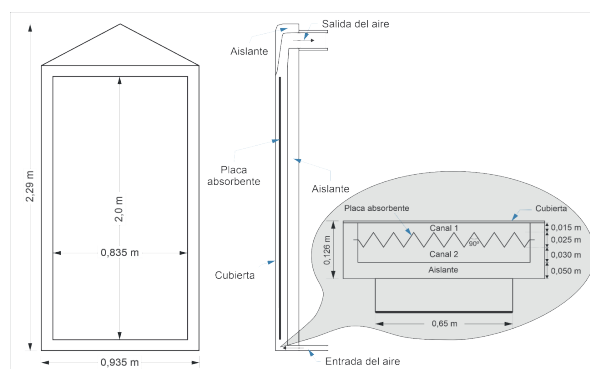


Figura 1. Vista frontal y lateral del CSCA.

El diseño del colector (figura 1) consta de dos canales de flujo por donde el aire que entra se divide por estos dos canales, recorre los canales en la misma dirección hasta llegar al final del colector donde a través de la estructura en forma de campana vuelve combinarse de nuevo. El CSCA posee una placa de absorción de la radiación corrugada en forma de V con ápice de corrugado de 90° (Hernández y Quiñonez, 2018; Karim et al., 2014), al corrugar la placa, se hace mayor el área de contacto de la placa absorbente con el aire que circula, que cuando se tiene una placa de absorción plano (Saha y Sharma, 2018), y el efecto de la subcapa laminar existente es mínima en comparación a la placa plana.

La construcción del CSCA se realizó con los materiales de menor costo disponibles en la región. La estructura del soporte fue construida de madera Pino (figura 2), la parte interior del colector (Canal 2) fue recubierto con una lámina reflectante de lámina de aluminio de 0,2 mm, la placa absorbente de acero inoxidable galvanizado de 0,8 mm de espesor y pintado por ambos lados con pintura negro mate resistente a altas temperaturas con una absorción igual a 0,90. La cubierta protectora y transparente del CSCA es de policarbonato alveolar transparente de 6 mm espesor, el aislante de 5 cm de poliestireno. En la entrada del colector, existe una abertura en forma de boquilla de polietileno que tiene un área transversal de 2 cm x 65 cm. En la salida del colector se ha acoplado un tubo de PVC de 80 mm de diámetro recubierto con aluminio de 0,02 mm. La carcasa fue de plancha galvanizado de 0,3 mm.



Figura 2. CSCA instalado verticalmente.

Procedimiento experimental

El CSCA fue instalado en una pared vertical con orientación hacia el norte geográfico en una pequeña habitación tipo caseta hecha de madera, triplay y cartón prensado (figura 2). La evaluación del CSCA se realizó en condiciones reales para cielo despejado, durante los días 30 de mayo, 31 de mayo, 01 de junio, 02 de junio y 12 de junio de 2018, desde las 8:00 horas hasta las 16:00 horas. Los parámetros medidos fueron: la temperatura ambiental, temperatura de entrada del aire, temperatura de salida del aire, temperatura de la placa absorbente, la velocidad de aire de salida, la radiación solar incidente sobre el colector. Los instrumentos utilizados fueron: dos termómetros digitales de doble entrada Fluke modelo 54 IIB con termocupla tipo K, un anemómetro digital Lutron modelo AM-4247SD, un piranómetro Apogee Instruments modelo MP-200. La instalación de los instrumentos se realizó cumpliendo en parte la norma ASHRAE (ASHRAE-Standard, 93-2003). Las termocuplas tipo K se instalaron en: la mitad de la placa absorbente, en la entrada y salida del aire y adyacente al colector para la temperatura del medio ambiente. La toma de los datos se realizó con una frecuencia de 10 minutos.

Análisis teórico

El modelo matemático desarrollado por Duffie y Beckman (2013) y Ong (1995), aplicadas y detalladas Rev. Investig. Altoandín. 2019; Vol 21 Nro 4 274 - 282

por Hernández y Quiñonez (2013) permite calcular la eficiencia del CSCA. El modelo se deduce a partir del balance de energía en estado estacionario, con las siguientes principales consideraciones: 1) El CSCA opera en condiciones estacionarias para el aire que fluye en el interior del colector solar, 2) los gradientes de temperaturas se consideran solamente en dirección del flujo.

La eficiencia instantánea del CSCA, se calcula por cualquiera de las dos expresiones siguientes:

$$\eta_c = \frac{q_u}{G_p} = \frac{Q_u}{A_c G_p} = \frac{\dot{m} c_p (T_o - T_i)}{A_c G_p} = F_R \frac{S}{G_p} - F_R U_L \frac{(T_o - T_i)}{G_p} \quad (1)$$

Donde: S es la radiación incidente sobre la placa absorbente, T^a es la temperatura del ambiente exterior, T_i y T_o son las temperaturas de entrada del aire y salida del aire respectivamente, G_p es la irradiancia solar total en el plano inclinado del colector, Q_u es la ganancia de energía útil, F_R es el factor de extracción del calor, U_L es el coeficiente global de pérdidas de calor, \dot{m} es el flujo masico total (producto de la densidad del aire y el caudal), c_p es el calor específico del aire y A_c es el área de apertura del colector. La determinación de la curva de la eficiencia instantánea es muy importante para la estimación de la energía útil que el colector puede producir de acuerdo a las condiciones climáticas que prevalecen en un lugar donde se va a instalar el CSCA.

La ecuación (1) se puede escribir en forma de una recta:

$$y' = \eta_0 + \eta_i x' \quad (2)$$

Donde:

$$y' = \eta_c = \dot{m} c_p (T_o - T_i); \eta_0 = F_R \frac{S}{G} = F_R (\tau \alpha)_\theta$$

$$\eta_i = -F_R U_L; x' = \frac{(T_i - T_a)}{G_p}$$

Siendo $(\tau \alpha)_\theta$ el producto de la absorptancia de la placa (α) y la transmitancia de la cubierta (τ) cuando el ángulo de incidencia es (θ). El modelo que permite determinar la eficiencia del colector se aplica para los colectores solares calentadores de aire de flujo paralelo que opera por convección natura o forzado con placa plana o corrugado. Este desarrollo es válido para evaluar el CSCA instalado verticalmente.

El calor específico del aire a presión constante se escribe como función de la temperatura mediante un polinomio cubico (Kreith, Manglik, y Bohn, 2012):

$$c_p(T) = \frac{28,11 + 0,1967 \times 10^{-2} T_m + 0,4802 \times 10^{-5} T_m^2 - 1,966 \times 10^{-9} T_m^3}{28,97} \quad (3)$$

Dónde: $T_m = \frac{T_i + T_o}{2}$ está en (K), y en (kJ/kgK).

La transmitancia y absortancia dependen del ángulo de incidencia, para esto se incorpora un factor modificador de incidencia. Por tanto, el producto de la transmitancia y absortancia para un ángulo de incidencia θ estaría dado por:

$$(\tau\alpha)_\theta = k_{\tau\alpha} (\tau\alpha)_n \cong k_{\tau\alpha} 1,01\tau\alpha \quad (4)$$

Donde: $k_{\tau\alpha} = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right)$ se denomina factor modificador de incidencia, siendo $b_0 = 0,136$, admitido para $\theta < 60^\circ$.

Análisis experimental

Para analizar los parámetros de rendimiento y calcular la eficiencia, se han procesado los datos paramétricos recogidos en hoja de cálculo Excel. Para hallar la eficiencia teórica se realizaron primero el cálculo de flujo

másico y calor específico del aire para luego reemplazar en la ecuación (2), y la eficiencia experimental fue obtenida con el método de mínimos cuadrados. Por otro lado, para comparar la eficiencia teórica y experimental se determinó la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) y finalmente la eficiencia experimental se simuló con el software Matlab.

RESULTADOS

Parámetros de rendimiento

De las tendencias horarias de los parámetros medidos (figura 3), se observa que, a medida que transcurre el día la intensidad solar varía de modo que alcanza su valor máximo al mediodía, asimismo la variación de la irradiancia incidente afecta directamente en la variación de los demás parámetros. Se observa que la temperatura de la placa absorbente tiende a ser aproximadamente igual que la temperatura de la salida al inicio y al final del periodo de medición, pero al mediodía la diferencia de ambas temperaturas aumenta hasta $7,6^\circ\text{C}$. La temperatura ambiente y la temperatura de entrada del aire en las tardes presenta una brecha entre ambas, debido principalmente por la presencia del viento que circula a una velocidad promedio de 3 m/s por las tardes.

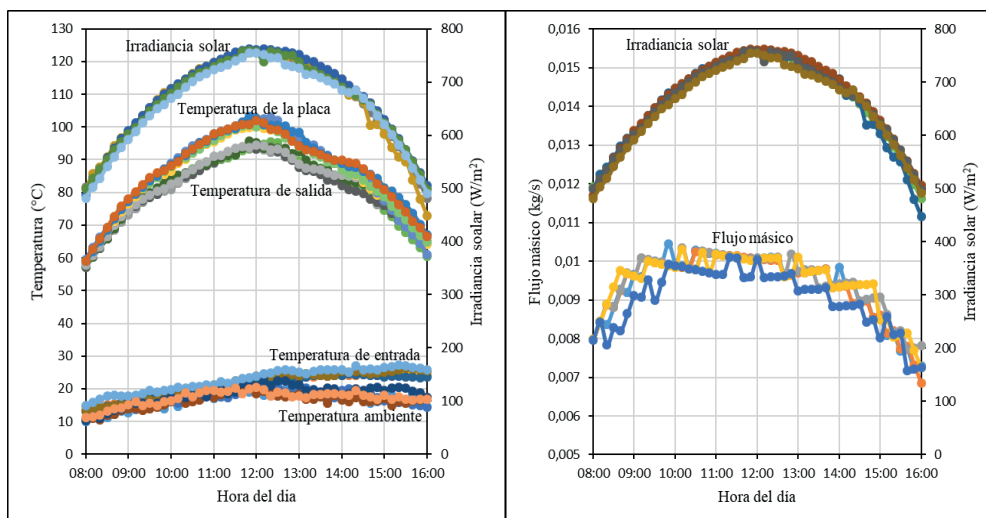


Figura 3. Tendencias de los parámetros de rendimiento del CSCA.

El flujo másico depende principalmente de la velocidad y la densidad del aire, así que, el comportamiento es similar a la irradiancia solar pues a mayor irradiancia solar mayor flujo de masa, los valores máximos se presentaron al mediodía y su valor promedio es 0,0094 kg/s en los cinco días, que corresponde a una velocidad del aire máximo de 2,1 m/s al mediodía. Además, se observa que la disminución del flujo másico pasado el mediodía es a causa de la disminución de la velocidad del aire y la temperatura ambiente por la presencia de vientos ocasionando mayor pérdida de calor por convección (figura 3).

Los valores máximos y mínimos alcanzados de los parámetros medidos (tabla 1), muestran el comportamiento funcional del CSCA, en la cual cabe destacar las altas temperaturas alcanzadas por la placa y el aire de salida.

Tabla 1

Valores máximos y mínimos de los parámetros de rendimiento.

Parámetros	Valor mín.	Valor máx.	Promedio
Irradiancia (W/m ²)	479	758	664
T. Ambiente (°C)	10,0	22,6	17,1
T. Entrada (°C)	13,2	27,2	21,4
T. Salida (°C)	57,2	95,7	81,4
T. Placa (°C)	59,0	103,3	86,0
Velocidad aire (m/s)	1,3	2,1	1,9

Eficiencia del CSCA

La eficiencia térmica teórica instantánea se calculó por la cuarta expresión de la ecuación (1), y la eficiencia térmica instantánea experimental mediante ecuación (2). La eficiencia experimental para el colector se ha obtenido por mínimos cuadrados con coeficiente de determinación $R^2=0,8$, esta ecuación obtenida es:

$$\eta_c = 0,601 - 13,346 \frac{(T_i - T_a)}{G_p} \quad (5)$$

El valor $\eta_0=0,601$ es la eficiencia máxima del CSCA, que representa el rendimiento óptico del colector y sólo depende de las características con las que está fabricado el colector. El valor $\eta_i=-13,346$ es el factor de pérdidas de calor que representa el producto del factor de remoción de calor F_R por el coeficiente total de pérdidas de calor

del colector U_L , su valor depende de las características térmicas del CSCA como por ejemplo la conductividad térmica o factores ambientales que intervienen principalmente en las pérdidas por radiación (figura 4).

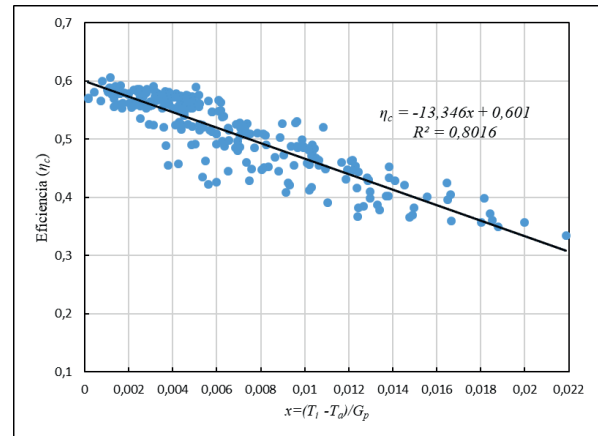


Figura 4. Curva de eficiencia experimental instantánea del CSCA.

Para analizar la calidad del ajuste entre los valores teóricos y los valores experimentales determinamos la raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE, este error cuantifica la desviación media de los valores teóricos respecto a los experimentales. Para el colector, la eficiencia térmica promedio experimental calculado fue de 0,511, y el RMSE de la eficiencia fue de 0,0294; por tanto, la eficiencia experimental diaria promedio en porcentaje esta dado por $\eta_c=(51,1 \pm 2,9) \%$.

En cuanto a la comparación de eficiencia teórica y experimental del CSCA, se observa que existe una regular aproximación entre estos dos valores (figura 5), sin embargo, hay que hacer notar que solamente el 0,1 % varía en el promedio de ambos.

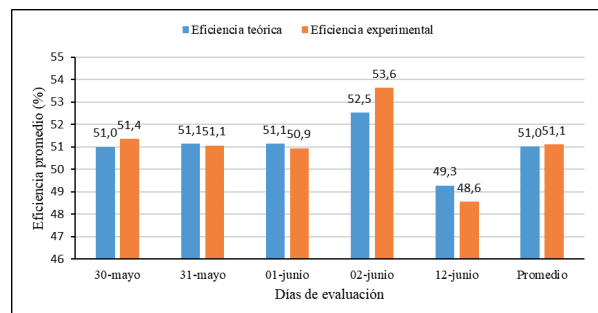


Figura 5. Comparación de la eficiencia promedio teórica y experimental.

Por otro lado, el factor de remoción calculado fue $F_R=0,78$ el cual revela que la transformación de la radiación solar en calor es altamente significativa, además el coeficiente global de pérdidas resultó ser igual a $U_L=17,21$ W/m²K. Por otro parte, adicionalmente se ha calculado el calor útil ganado Q_u y la energía solar incidente sobre el colector $H_p=A_c \bar{G}_p$ para comparar con otros trabajos, cuyos resultados promedios fueron 2,061 MJ/h y 3,991 MJ/h respectivamente. Ahora bien, los cálculos fueron realizados en el periodo de ensayo en los cinco días en donde en ángulo de incidencia en promedio fue de 55° que en el lugar corresponde a valores máximos en todo el año.

Para finalizar, se presenta la simulación en Matlab de la eficiencia térmica experimental (figura 6), en él se aprecia la dependencia de la eficiencia de la irradiancia y de la diferencia entre la temperatura de entrada y la del ambiente, así, el máximo valor que puede alcanzar es 60%. También es necesario resaltar que a medida que la temperatura aumenta, la pérdida de energía es mayor lo que afecta a la eficiencia (figura 6).

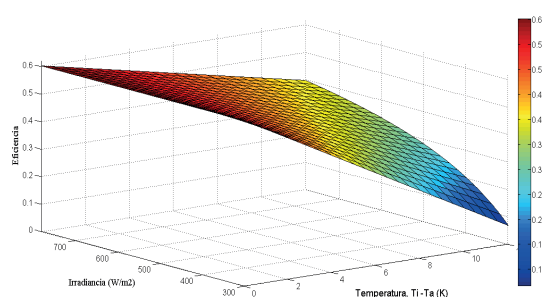


Figura 6. Eficiencia del CSCA en función de la radiación y diferencia de temperatura T_i-T_a .

DISCUSIÓN

El nuevo CSCA tiene los parámetros de diseño y rendimiento prometedor, pues se tiene un adecuado balance de ergonomía, alta eficiencia y se ha construido con materiales al ace en la región, además se puede instalar en una pared vertical a una altura estándar de una habitación. Los prototipos de colectores de los investigadores considerados como Cuzminschi et al. (2018) y Hernández y Quiñonez (2018) han permitido tener mejor panorama del CSCA que opera

por convección natural. Para el diseño del ápice de la placa absorbente se consideró los prototipos modulares evaluados que tenían mayor eficiencia, los cuales fueron, de 60° (Karim et al., 2014) y 120° (Hernández y Quiñonez, 2018), sin embargo en el nuevo diseño se consideró el promedio que es 90°, el cual fue relevante para la eficiencia del colector. La altura del canal se ha diseñado en base al trabajo realizado por Saha y Sharma (2018) y Sharma y Saha (2017), ellos encontraron experimentalmente que la altura del canal óptimo estaba entre 0,02 a 0,03 m los cuales no se habían probado hasta el momento para convección natural; sin embargo podemos señalar que esta altura ayuda en gran medida a mejorar el desempeño del colector.

Los modelos matemáticos desarrollados por reconocidos investigadores (Duffie y Beckman, 2013; Hatami y Bahadorinejad, 2008; Karim et al., 2014; Ong, 1995) ha permitido validar la parte experimental del colector diseñado. La eficiencia y el calor útil ganado del CSCA diseñado tiene similar comportamiento al evaluado por Hernández y Quiñonez (2018) con la diferencia de que el nuestro es de mayor eficiencia y mayor temperatura de salida del aire, sin embargo el flujo másico es menor debido a que el aire es menos denso a mayor altura sobre el nivel del mar.

Comparando con el colector solar investigado por Cuzminschi et al. (2018), el nuevo colector presentado es de baja eficiencia, pero la temperatura de salida y la velocidad de salida del aire son mayores. Es importante resaltar también que nuestro colector se ha evaluado a una mayor altura sobre el nivel del mar en donde la presión del aire es baja y afecta el flujo de masa, pero a pesar de ese inconveniente el colector eficiente y aceptable. Hay que destacar también, que nuestro colector alcanza temperaturas elevadas y es cuando presenta mayores pérdidas de energía, sin embargo, alcanza temperaturas de salida del aire hasta de 95,7 °C y puede alcanzar una eficiencia máxima de 60 %.

En consecuencia, el CSCA diseñado es un nuevo prototipo de colector con alta eficiencia que es aplicable en los lugares donde existe demanda de energía para
Rev. Investig. Altoandín. 2019; Vol 21 Nro 4 274 - 282

calentar espacios como los invernaderos, y en particular se puede usar como un sistema de calefacción de espacios fríos, oficinas o aulas de centros educativos que en épocas de otoño e invierno en las regiones altiplánicas presentan bajas temperaturas.

CONCLUSIONES

La temperatura máxima de salida del aire del colector fue 95,7 °C para una intensidad solar máxima de 758 W/m² en días despejados, sin embargo, se aprecia que a mayor temperatura mayor es la pérdida de calor del colector. El flujo masico es muy sensible a la velocidad del aire y a la densidad del aire.

La eficiencia instantánea experimental promedio es 51,1 % el cual significa un buen rendimiento, puesto que se proporciona una gran cantidad de energía térmica completamente pasiva sin requerir una energía externa adicional y la eficiencia térmica obtenida es coherente con los resultados reportados por otros autores. Existe una semejanza entre el valor teórico y el valor experimental de la eficiencia para todos los días, lo cual muestra la capacidad predictiva del modelo teórico descrito.

El colector se ha evaluado a una mayor altura sobre el nivel del mar en donde la presión atmosférica es baja afectando al flujo de masa, pero a pesar de ese inconveniente el sistema diseñado es eficiente y aceptable. El colector está diseñado para implementar como un sistema de calefacción en edificios residenciales, oficinas, aulas de colegios entre otros, además por sus características se puede utilizar para calentar invernaderos y secar productos agrícolas. El CSCA puede operar con un alto rendimiento durante el periodo de otoño-invierno por presentar mayor ángulo de incidencia solar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alam, T., y Kim, M.-H. (2017). Performance improvement of double-pass solar air heater – A state of art of review. *Renewable and Sustainable Rev. Investig. Altoandin.* 2019; Vol 21 Nro 4 274 - 282

Energy Reviews, 79, 779-793. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.087>

ASHRAE-Standard. (93-2003). Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Sollar Collectors. *American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers.*

Cuzminschi, M., Gherasim, R., Girleanu, V., Zubarev, A., y Stamatin, I. (2018). Innovative thermo-solar air heater. *Energy and Buildings*, 158(1), 964–970. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.082>

Duffie, J. A., y Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4 ed.): John Wiley & Sons, Ltd.

El-Sebaili, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I., Shalaby, S. M., y Moharram, B. M. (2011). Investigation of thermal performance of-double pass-flat and v-corrugated plate solar air heaters. *Energy*, 36(2), 1076-1086. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.042>

Forson, F. K., Nazha, M. A. A., y Rajakaruna, H. (2003). Experimental and simulation studies on a single pass, double duct solar air heater. *Energy Conversion and Management*, 44(8), 1209–1227. doi: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00139-5](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00139-5)

Fudholi, A., y Sopian, K. (2019). A review of solar air flat plate collector for drying application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 102, 333-345. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.032>

González, S. M., Larsen, S. F., Hernández, A., y Lesino, G. (2014). Thermal Evaluation and Modeling of a Double-pass Solar Collector for Air Heating. *Energy Procedia*, 57, 2275-2284. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.235>

Hatami, N., y Bahadorinejad, M. (2008). Experimental determination of natural convection heat transfer coefficient in a vertical flat-plate solar air heater. *Solar Energy*, 82(10), 903–910. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.03.008>

Hegazy, A. A. (2000). Performance of flat plate solar air heaters with optimum channel geometry for constant/variable flow operation. *Energy Conversion & Management*, 41(4), 401-417. doi: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00052-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00052-7)

- Hernández, A. L., y Quiñonez, J. E. (2013). Analytical models of thermal performance of solar air heaters of double-parallel flow and double-pass counter flow. *Renewable Energy*, 55, 380-391. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.050>
- Hernández, A. L., y Quiñonez, J. E. (2018). Experimental validation of an analytical model for performance estimation of natural convection solar air heating collectors. *Renewable Energy*, 117, 202-216. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.082>
- Jha, R. K., Choudhury, I. C., Gargi, I. H. P., y Zaidp, Z. H. (1992). Performance Prediction of a Solar Heated House. *Energy Convers*, 33(4), 263-273. doi: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(92\)90117-F](https://doi.org/10.1016/0196-8904(92)90117-F)
- Karim, M. A., Perez, E., y Amin, Z. M. (2014). Mathematical modelling of counter flow v-grove solar air collector. *Renewable Energy*, 67, 192-201. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.11.027>
- Kreith, F., Manglik, R. M., y Bohn, M. S. (2012). *Principios de transferencia de calor* (7 ed.): Cengage Learning.
- Mzad, H., Bey, K., y Khelif, R. (2019). Investigative study of the thermal performance of a trial solar air heater. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100373. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.100373>
- Ong, k. S. (1995). Thermal performance of solar air heaters: Mathematical model and solution procedure. *Solar Energy*, 55(2), 93-109. doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00021-I](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00021-I)
- Pawar, R. S., Takwale, M. G., y Bhide, V. G. (1994). Evaluation of the Performance of the Solar Air Heater. *Energy Convers*, 35(8), 699-708. doi: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(94\)90054-X](https://doi.org/10.1016/0196-8904(94)90054-X)
- Saha, S. N., y Sharma, S. P. (2018). Performance Evaluation of Corrugated Absorber Double Flow Solar Air Heater Based on Energy, Effective and Exergy Efficiencies. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 17(1), 63-76. http://ijens.org/Vol_17_I_01/172201-3535-IJME-IJENS.pdf
- Saravanakumar, P. T., Somasundaram, D., y Matheswaran, M. M. (2019). Thermal and thermo-hydraulic analysis of arc shaped rib roughened solar air heater integrated with fins and baffles. *Solar Energy*, 180, 360-371. doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.036>
- Sevik, S., y Abuska, M. (2019). Thermal performance of flexible air duct using a new absorber construction in a solar air collector. *Applied Thermal Engineering*, 146(5), 123-134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.100>
- Sharma, N. Y., Madhwesh, N., y Karanth, K. V. (2019). The Effect of Flow Obstacles of Different Shapes for Generating Turbulent Flow for Improved Performance of the Solar Air Heater. *Procedia Manufacturing*, 35, 1096-1101. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.062>
- Sharma, S. P., y Saha, S. N. (2017). Thermohydraulic Performance of Double Flow Solar Air Heater with Corrugated Absorber. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Energy and Power Engineering*, 11(7), 855 - 861. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1131465>
- Singh Bisht, V., Kumar Patil, A., y Gupta, A. (2018). Review and performance evaluation of roughened solar air heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 954-977. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.036>
- Singh, I., y Singh, S. (2018). A review of artificial roughness geometries employed in solar air heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 405-425. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.108>
- Singh Patel, S., y Lanjewar, A. (2019). Experimental and numerical investigation of solar air heater with novel V-rib geometry. *Journal of Energy Storage*, 21, 750-764. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.016>
- Singh, S., Dhruw, L., y Chander, S. (2019). Experimental investigation of a double pass converging finned wire mesh packed bed solar air heater. *Journal of Energy Storage*, 21, 713-723. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.003>