

EVALUACIÓN Y SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DE UN MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO DEL COLECTOR SOLAR CALENTADOR DE AIRE DE DOBLE PASO EN CONTRACORRIENTE DISEÑADO PARA LA CALEFACCIÓN DE EDIFICIOS^Ψ

José E. Quiñonez¹ y Alejandro L. Hernández¹

Universidad Nacional de Salta (UNSa), Avda. Bolivia N° 5.150, CP. 4400, Salta Capital
Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa)
Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO, UNSa – CONICET), Av. Bolivia 5150, A4400FVY, Salta, Argentina.
Tel. 54-0387-4255579 – Fax 54-0387-4255489
E-mail: jeq1@hotmail.com

Recibido 13/08/13, aceptado 22/09/13

RESUMEN: En este trabajo se evalúa la capacidad predictiva de un modelo físico-matemático para la configuración del colector solar calentador de aire de doble paso en contra corriente. La validación del modelo fue realizada mediante la comparación de datos medidos y simulados por el software CLOE[®] (Cambio en la Longitud de Onda Electromagnética). Los ensayos fueron realizados durante la época invernal del 2012 conectando el colector a un prototipo de vivienda, midiéndose las temperaturas de entrada y salida del aire, la temperatura ambiente exterior y la irradiancia solar sobre el plano vertical del colector de la temperatura de salida y energía útil entregada por el colector. Los resultados muestran un excelente acuerdo entre los datos medidos y los valores simulados. Para la temperatura de salida el error del RMSE es menor a 2,93 °C y los C_{ef} son superiores a 0,80. Con respecto a la energía útil, el error RMSE es menor a 36,50 W y los C_{ef} son superiores a 0,90.

Palabras clave: colector solar de aire, simulación computacional, modelo físico-matemático.

INTRODUCCION

La Argentina se encuentra en una situación delicada debido a su alta dependencia en los combustibles fósiles: el 86 % de la energía consumida en el país es provista por el petróleo, el gas natural y el carbón mineral tanto para la generación eléctrica como para el transporte y el consumo en los edificios (cocción de alimentos, calentamiento del agua sanitaria y acondicionamiento térmico). El sector edilicio residencial, comercial y público representa el 32 % de la demanda energética global del país y, a causa de este consumo, genera el 14 % del total de sus emisiones de CO₂.

La mala calidad térmica de las envolventes edilicias genera altos consumos energéticos para su climatización. Alrededor del 50 % de la energía consumida en un edificio corresponde a su calefacción y/o refrigeración (Iannelli y Gil, 2012). Gran parte de este consumo puede ser reducido mediante el empleo de colectores solares calentadores de aire ya que el recurso solar resulta ser suficiente en la mayor parte del país. La región Noroeste de Argentina, cuenta con la mayor disponibilidad solar a nivel nacional, se puede abastecer del orden del 80 % de la demanda anual de calefacción y en las zonas con disponibilidad solar media se puede llegar al 70 %. Tan es así que el uso de los colectores solares calentadores de aire está tomando auge en esta región. En la actualidad existen varios edificios que usan este tipo de aplicación solar para la calefacción, como por ejemplo el hospital bioclimático en la localidad de Susques, provincia de Jujuy que tiene instalado 60 m² de colectores para calefaccionar el sector sur (Hernández et al., 2010); el colegio secundario albergue en la localidad de El Alfarcito-Salta tiene instalado 40 m² de colectores; y en la localidad de Tolar Grande-Salta se han instalado 20 m² en un salón municipal donde se realizan los grandes eventos de los tolareños.

En este marco es importante tener a disposición una herramienta que permita evaluar la performance térmica del colector de una manera confiable. Por este motivo se presenta la validación de un modelo físico-matemático del colector solar de doble paso en contra corriente desarrollado por Hernández y Quiñonez (2013). Las expresiones matemáticas presentadas por ambos autores permiten simular el comportamiento térmico del colector a partir de datos constructivos del mismo y en diferentes condiciones de trabajo. Mediante algoritmos computacionales, las expresiones matemáticas que conforman el modelo fueron introducidas en el software de propósito específico denominado CLOE[®] V2.0 (Cambio en la Longitud de Onda Electromagnética) que es un programa de código cerrado desarrollado por los autores de este trabajo en Visual Basic V.4.0 y que permite diseñar y predecir el comportamiento termo-energético de cuatro tipos de colectores solares calentadores de aire para cualquier ubicación geográfica y bajo diferentes condiciones climáticas. En una primera versión (CLOE[®] V.1.0) se puede trabajar con 3 configuraciones diferentes de colectores. Ahora, mediante el la inclusión del colector de doble paso en

^Ψ Trabajo parcialmente financiado por el Proyecto N° 2025 de CIUNSa y PICTO N° 32.140 de ANPCyT y UNCa, PICTO ENARGAS-2009-0192 de ANPCyT y ENARGAS.

¹ Investigador del Instituto Nacional en Energías No Convencional.

contra corriente, se cuenta con una nueva versión (CLOE[®] V.2.0). Este software cuenta con registro en la Dirección Nacional del Derecho de Autor.

BREVE DESCRIPCION DEL SOFTWARE CLOE[®] V2.0

El programa CLOE[®] V2.0 permite escoger el tipo de colector entre cuatro configuraciones disponibles (flujo sobre absorbedor, flujo bajo absorbedor, doble flujo y doble paso en contra corriente) y la orientación de su eje mayor (vertical o apaisada). La temperatura de entrada del aire se puede elegir como ingresada mediante un archivo si se cuenta con datos medidos o bien estimada por el propio programa mediante un algoritmo de cálculo.

Para el proceso de validación el programa toma los datos meteorológicos desde un archivo que cuenta con la siguiente información: horas de salida y puesta del sol sobre el horizonte; irradiancia diaria sobre plano horizontal; irradiancia diaria extraterrestre; componentes directa, difusa y total de la irradiación horaria sobre plano horizontal (para cada hora diurna); irradiación horaria extraterrestre sobre plano horizontal. Estos datos pueden obtenerse mediante cualquier método de estimación de irradiación solar. En este trabajo se empleó el programa GEOSOL[®] (Hernández, 2003) con el modelo de estimación de Page para días claros. También es necesario que el archivo contenga los valores horarios de la temperatura ambiente, temperatura de entrada del colector y velocidad del flujo de aire, los cuales fueron obtenidos durante los ensayos.

Se debe ingresar datos geográficos, materiales y parámetros geométricos del colector y condiciones de funcionamiento (termosifón o forzado, caudal y temperatura inicial del aire de entrada, etc.). Si no se dispone de datos meteorológicos medidos, CLOE[®] permite el ingreso de valores de temperatura ambiente mínima, media y máxima e irradiancia solar media diaria sobre plano horizontal y realiza con ellos estimaciones analíticas mediante algoritmos específicos para estimar los valores horarios correspondientes.

Las ecuaciones matemáticas [ec(1) a ec.(4)] presentadas a continuación fueron introducidas en CLOE[®] y describen el comportamiento térmico del colector de doble paso en contra corriente. Todas se expresan de forma reducida debido a que son expresiones muy extensas, y fueron presentadas y analizadas en detalle en el trabajo de Hernández y Quiñonez (2013).

Factor de remoción del calor:

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_c[S - U_L(T_i - T_a)]} = \frac{\dot{m}c_p(K_1 + K_2 + D - T_i)}{A_c[S - U_L(T_i - T_a)]} \quad (1)$$

donde \dot{m} es el flujo másico de aire en kg/s, c_p el calor específico del aire a presión constante, A_c el área de apertura solar del colector, T_i y T_o las temperaturas de entrada y salida del aire respectivamente, T_a es la temperatura ambiente, S es la radiación solar absorbida por la placa absorbedora, U_L es el coeficiente global de pérdida de calor y las constantes K_1 , K_2 , D son funciones de los coeficientes de transferencia de calor conductivos, convectivos y radiativos.

Temperatura de salida:

$$T_o = K_1 + K_2 + D \quad (2)$$

Ganancia de energía útil:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L(T_i - T_a)] \quad (3)$$

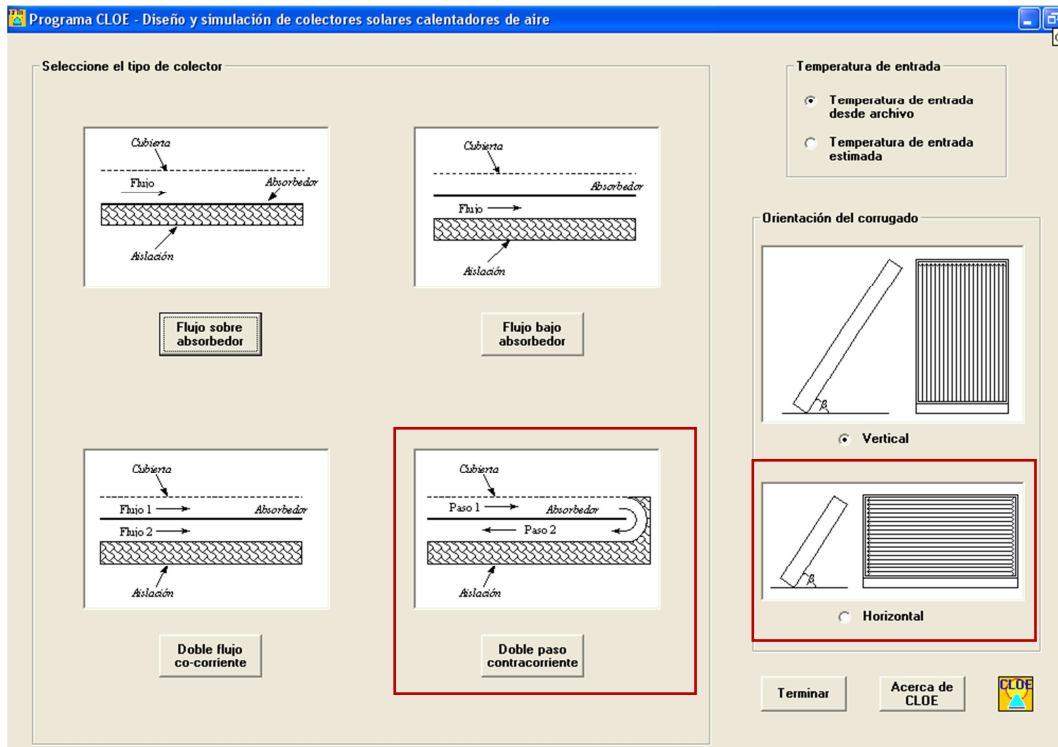
Eficiencia:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c G_p} = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_c G_p} = F_R \left(\frac{S}{G_p} \right) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_p} \quad (4)$$

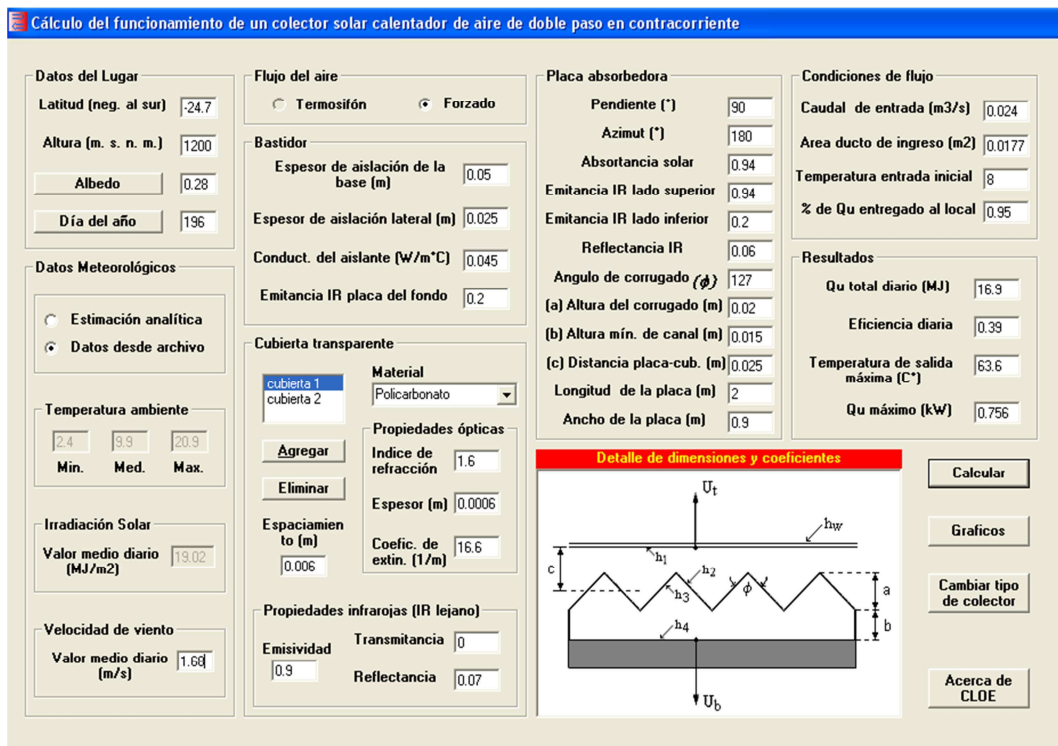
donde G_p es la irradiancia solar global medida sobre el plano del colector.

En la Figura 1(a) se muestra la pantalla inicial del programa donde se selecciona el tipo de colector y la orientación de su eje mayor (vertical o apaisada). La temperatura de entrada del aire se puede elegir como ingresada mediante el archivo mencionado anteriormente si se cuenta con datos medidos o bien estimada por el propio programa mediante un algoritmo de cálculo. Para este caso se escogió la configuración de doble paso contracorriente y posición horizontal (recuadros en color rojo en la figura).

En la Figura 1(b) se muestra la pantalla de ingreso de datos geográficos, materiales y parámetros geométricos del colector y condiciones de funcionamiento (termosifón o forzado, caudal y temperatura inicial del aire de entrada, etc.). Si no se dispone de datos meteorológicos medidos, CLOE[®] V2.0 permite el ingreso de valores de temperatura ambiente mínima, media y máxima e irradiancia solar media diaria sobre plano horizontal y realiza con ellos estimaciones analíticas mediante algoritmos específicos para estimar los valores horarios correspondientes.



(a)



(b)

Figura 1: Interfaz gráfica del programa CLOE® V2.0, (a) muestra las opciones de colector disponibles, (b) muestra la pantalla de ingreso de datos.

CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES DEL PROTOTIPO ENSAYADO

El módulo ensayado tiene 0,95 m de ancho x 2,51 m de largo con un área de apertura solar de 2,16 m² (área útil de colección, A_c). Además se encuentra aislado térmicamente con lana de vidrio de 5 cm de espesor en su fondo y 2 cm de espesor en los laterales. La placa absorbidora es de chapa galvanizada acanalada, ennegrecida en la parte expuesta a la radiación solar con una pintura color negro mate para altas temperaturas. Su absorptancia solar, medida con un espectrómetro LICOR en el rango de longitudes de onda 400 – 1.100 nm, es 0,94. La placa absorbidora forma dos canales: uno superior y otro inferior, y la cubierta transparente es de policarbonato alveolar de 6mm de espesor.

El ingreso y la salida del aire se realizan mediante ductos de sección circular perpendiculares a la placa absorbadora, según se aprecia en la Figura 2, a fin de facilitar la conexión entre el colector y el edificio a través de las paredes orientadas al norte. Al estar ambas aberturas en el mismo extremo del colector se minimizan la longitud de tuberías y las pérdidas térmicas a través de ellas.

EVALUACION EXPERIMENTAL DEL COLECTOR

El colector fue instalado con una inclinación de 90° con respecto a la horizontal y orientado hacia el Ecuador. La posición vertical del colector permite obtener un mayor rendimiento termoenergético durante los meses más fríos del invierno en Salta y la desatención del usuario en el mantenimiento por la deposición de polvo sobre las cubiertas (Quiñonez et al., 2012). Se encuentra ubicado en el campo experimental del INENCO en la Universidad Nacional de Salta ($24^\circ 43,7'$ de Latitud Sur, $65^\circ 24,6'$ de Longitud Oeste y 1.190 m.s.n.m.).

Las mediciones fueron realizadas a circuito cerrado, conectando el colector a un prototipo de vivienda mediante tuberías de 0,15 m de diámetro y 2 m de longitud. El ducto de salida fue aislado térmicamente con lana de vidrio de 4 cm de espesor, según se aprecia en la Figura 2. Dentro del edificio, la cañería de entrada al colector toma el aire desde una posición ubicada a 0,6 m del cielorraso del local mientras que el aire caliente proveniente del colector se descarga a una altura de 0,6 m sobre el nivel del piso. La envolvente de la vivienda es de ladrillo cerámico de 0,15 m de espesor revocado hacia el interior, cubierta de chapa galvanizada, jaula antisísmica y piso de platea de hormigón de 0,10 m de espesor sobre suelo de tipo sedimentario. No posee aislación térmica en paredes ni piso pero sí un cielorraso de poliestireno expandido de 2 cm de espesor que forma, con la cubierta de chapa, una cámara de aire estanco de 0,20 m de espesor.

Se monitoreó el funcionamiento termoenergético del colector en la posición vertical bajo el régimen de convección forzada durante 9 horas continuas, empleando un ventilador axial de 40 W y 1.800 rpm trabajando por succión desde el ducto de salida del colector a fin de favorecer la distribución y el movimiento del aire en su interior. El diámetro de paletas es de 0,17 m. Las temperaturas del aire a la entrada y salida del colector, de la placa absorbadora y del aire en 4 posiciones dentro del colector se monitorearon cada 5 minutos mediante termocuplas tipo K conectadas a un datalogger ADAM 4018 de 8 canales analógicos. La temperatura exterior y la radiación solar sobre el plano vertical del colector fueron registradas, también a intervalos de 5 minutos, mediante una estación meteorológica autónoma marca HOBO modelo H21 cuyo sensor de irradiancia solar es del tipo fotovoltaico. La velocidad del aire a la entrada del colector, necesaria para la estimación del flujo másico circulante, fue sensada mediante un anemómetro manual marca TSI a intervalos de 1 hora aproximadamente.

Este ensayo fue realizado durante los meses de julio, agosto y setiembre del 2012. En algunos días se varió la temperatura del aire de entrada mediante una resistencia eléctrica comandada con un potenciómetro regulable. La potencia disipada se mantuvo en un valor fijo durante todo el día, pero distinto para cada día, a fin de obtener distintos puntos de funcionamiento en la curva de eficiencia instantánea según indica la Norma ASHRAE 93-77 de evaluación de eficiencia de colectores solares planos.



Figura 2: Colector solar conectado al prototipo de edificio.

RESULTADOS DEL MONITOREO

La figura 3 muestra la evolución temporal de las temperaturas medidas del aire, a la entrada y salida del colector, para los días 17, 18, 19 y 23 de julio, y 28 y 19 de agosto de 2012. Estos días representan condiciones normales de funcionamiento, es decir, sin una resistencia disipadora de calor en el ducto de entrada. Se observa que la temperatura máxima alcanzada por el aire a la salida del colector fue de 63°C cuando la temperatura de entrada era de 34°C . Bajo las condiciones climáticas de este ensayo, el colector logró aumentar la temperatura del aire circulante unos 29°C . El valor promedio de velocidad del aire medido a la entrada del colector durante este ensayo fue de 1,35 m/s dando un flujo másico promedio de 0,024 kg/s.

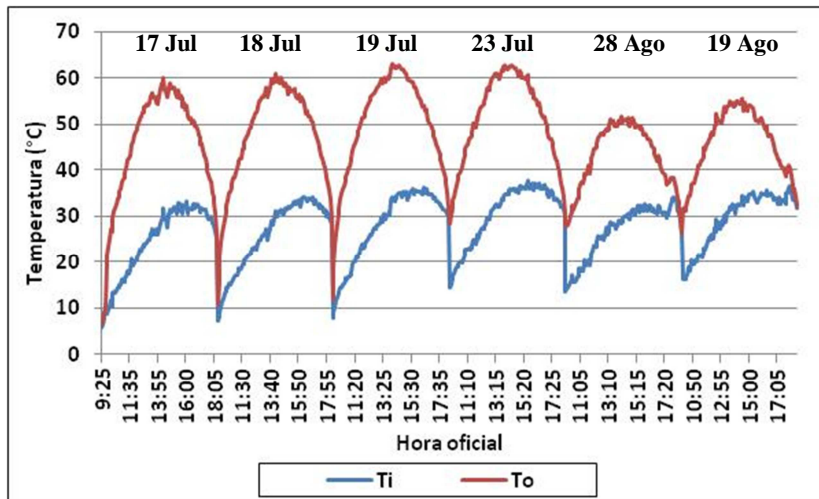


Figura 3: Evolución temporal de las temperaturas del aire de entrada T_i y salida T_o del colector.

En la Figura 4 se presentan los valores medidos de irradiancia solar global sobre el plano del colector y de temperatura ambiente. En todos los días representados en la figura se observa una atmósfera despejada con días claros, para los cuatro primeros días correspondientes al mes de julio los niveles de irradiancia son superiores a los 700 W/m^2 , mientras que para los dos días restantes, finales de agosto, los valores de irradiancia no superan los 700 W/m^2 . Los valores de temperatura ambiente son típicos del invierno en la ciudad de Salta, con bajas temperaturas por la mañana y grandes amplitudes térmicas durante el día.

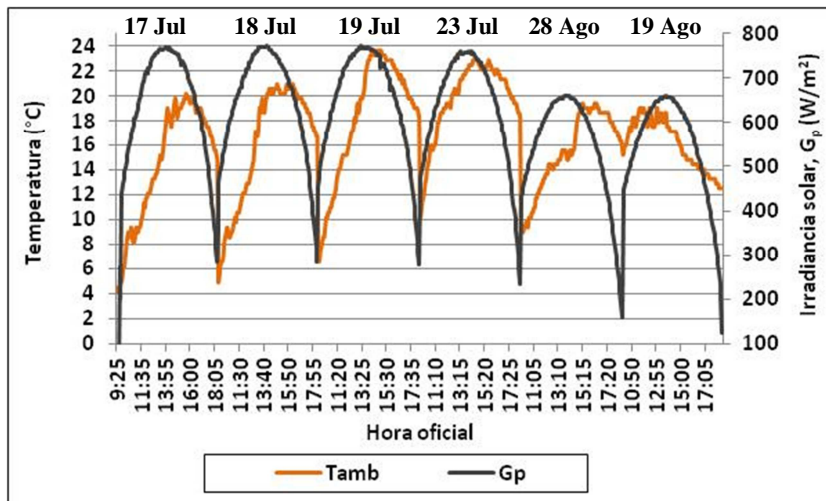


Figura 4: Evolución temporal de la temperatura ambiente T_{amb} y la irradiancia solar G_p .

VALIDACION DEL MODELO DEL COLECTOR SOLAR

A fin de realizar la validación del modelo físico-matemático del colector solar de doble paso en contra corriente, se realizan comparaciones entre los datos medidos y valores simulaciones de temperaturas de salida y energía útil entregada. Como fue mencionado con anterioridad, las mediciones de temperaturas en el interior del colector y de las variables climáticas fueron realizadas de forma continua durante el periodo de medición. El programa CLOE[®] estima los valores de la temperatura de salida y energía útil en el paso temporal de una hora solar, y los datos medidos fueron realizados teniendo en cuenta la hora oficial. Por lo tanto para poder realizar la comparación, los datos medidos fueron corregidos y expresados en función de la hora solar.

La selección de los días medidos durante el invierno del 2012 fueron: 17, 18, 19, y 23 de julio; 28 y 29 de agosto, debido a que corresponden a días claros y representan días en condiciones normales de funcionamiento. A fin de evaluar la capacidad predictiva del modelo se optó por cuantificar la predicción mediante dos criterios de ajuste: el valor RMSE y el coeficiente de eficiencia C_{ef} .

El primero permite cuantificar la magnitud de la desviación entre valores medidos y simulados en términos de las unidades de la variable mediante la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X_{sim})_i - (X_{med})_i]^2}{N}} \quad (5)$$

donde X_{sim} representa los valores simulados, X_{med} los medidos y N la cantidad de mediciones.

El segundo es un número adimensional ampliamente utilizado por su flexibilidad para ser aplicado a diversos tipos de modelos matemáticos (McCuen et al., 2006). Permite tomar una decisión sobre los resultados del ajuste según un rango de criterio establecido por los autores (Nash y Sutcliffe, 1970). El coeficiente de eficiencia se define como:

$$C_{ef} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [(X_{sim})_i - (X_{med})_i]^2}{\sum_{i=1}^N [(X_{sim})_i - \bar{X}_{med}]^2} \quad (6)$$

donde \bar{X}_{med} es el valor promedio sobre todas las mediciones.

El rango de criterio establece que: un $C_{ef} < 0,2$ el ajuste resulta insuficiente; mientras que $0,2 < C_{ef} < 0,4$ es satisfactorio; entre $0,4 < C_{ef} < 0,6$ es bueno; entre $0,6 < C_{ef} < 0,8$ es muy bueno; y $C_{ef} > 0,8$ es excelente.

Simulación de la temperatura de salida

En la Figura 5 se comparan los valores de las temperaturas de salida del aire medidos, To_{med} , y simulados mediante la ecuación (2), To_{CLOE} . Según se observa el acuerdo logrado durante los días de medición es muy bueno. El error cuadrático medio, RMSE, que mide la desviación promedio entre valores medidos y simulados durante los respectivos períodos de monitoreo es menor a 3 °C.

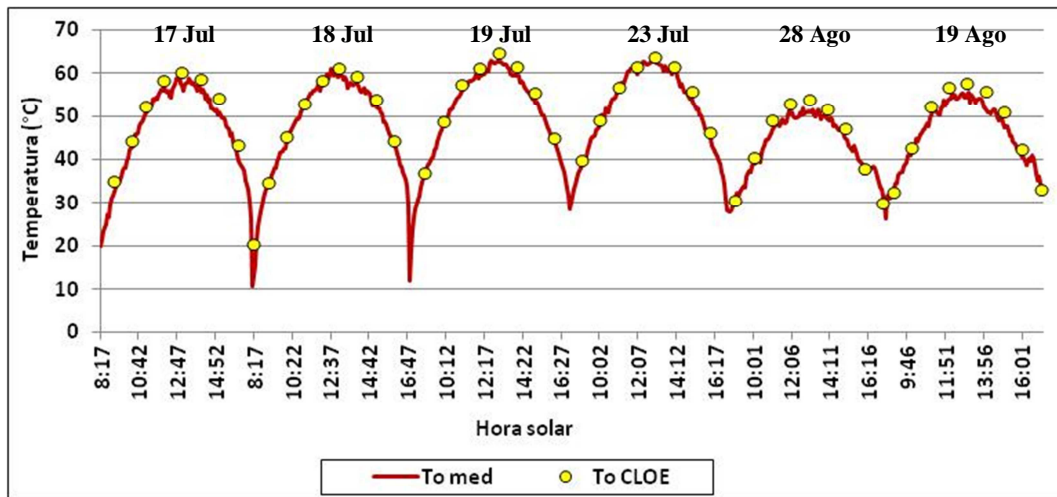


Figura 5: Valores medidos y simulados por CLOE® de la temperatura de salida del colector.

Simulación de la energía útil

La energía útil instantánea generada por el colector se calcula mediante:

$$Q_u = \rho(T_i, H) v A_t c_p (T_o - T_i) \quad (7)$$

donde $\rho(T_i, H)$ es la densidad del aire calculada a la temperatura de entrada y a una altitud de 1.200 metros sobre el nivel del mar, v la velocidad de flujo medida a la entrada del colector y A_t el área transversal del ducto de entrada cuyo diámetro es 0,15 m. El calor específico tiene una dependencia con la temperatura y fue correlacionado mediante los valores tabulados por Incropera y DeWitt (1990) evaluado a la temperatura de entrada del aire.

En la Figura 6 se presentan los valores “medidos” (calculados con la ecuación (7)) y simulados por CLOE® mediante la ecuación (3). Se observa que los valores medidos de energía útil máxima son superiores y cercano a los 700 W para los días correspondientes a julio mientras que para los dos últimos días de agosto la energía útil es próxima a los 550W. El acuerdo obtenido entre valores medidos y simulados es muy bueno en todos los días, resultando el peor día de ajuste el 29 de agosto debido a las oscilaciones en la temperatura ambiente en horas próximas al medio día solar, la cual es una variable de entrada que CLOE® utiliza para calcular las estimaciones.

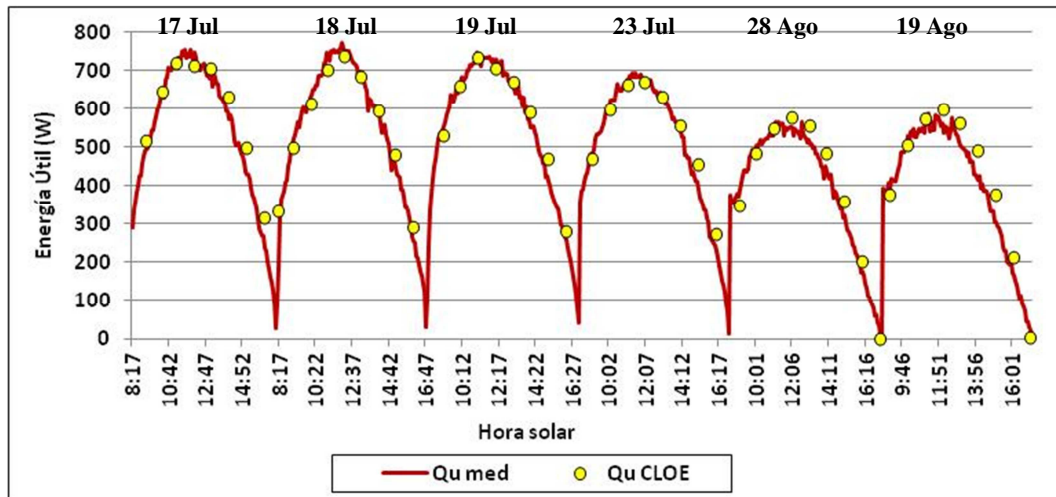


Figura 6: Valores horarios medidos y simulados por CLOE de la energía útil generada por el colector.

En la Tabla 1 se presentan los valores del RMSE y C_{ef} para la temperatura de salida y la energía útil generada en cada día analizado. El valor del RMSE para la temperatura de salida muestra desviaciones promedio inferiores a 2,93 °C. Con respecto a la energía útil el RMSE muestra desviaciones menores a los 37 W. De acuerdo al rango de criterio del C_{ef} , el modelo proporciona un excelente ajuste para todos los días analizados, tanto en los datos de temperatura de salida como en la energía útil generada.

Día	RMSE T_o (°C)	RMSE Q_u (W)	$C_{ef} T_o$	$C_{ef} Q_u$
17/07/2012	2.65	32.53	0.90	0.95
18/07/2012	1.23	17.17	0.99	0.99
19/07/2012	1.74	20.47	0.96	0.98
23/07/2012	2.92	20.11	0.90	0.98
28/08/2012	2.22	31.61	0.90	0.94
29/08/2012	2.75	36.46	0.88	0.94

Tabla 1: Error cuadrático medio, RMSE, y Coeficientes de eficiencia, C_{ef} , entre datos medidos y valores estimados por CLOE, para la temperatura de salida y la energía útil generada por el colector.

El análisis de ajuste mediante los criterios del RMSE y C_{ef} demuestra que el modelo físico-matemático desarrollado para el colector de doble paso en contra corriente predice resultados confiables cuando se desea realizar un estudio termo-energético de una instalación de calentamiento solar mediante este tipo de colector.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la capacidad predictiva de un modelo físico-matemático del colector solar de doble paso en contra corriente mediante la simulación computacional con CLOE® (Cambio en la Longitud de Onda Electromagnética). El monitoreo del colector fue realizado en el invierno del 2012 durante nueve horas diarias de funcionamiento continuo. Conectando el colector a un prototipo de edificio mediante tuberías de entrada y salida de 2 m de largo, el flujo másico de aire promedio fue de 0,024 kg/s. Siguiendo los lineamientos de la norma ASHRAE 93-77 de evaluación de performance de colectores solares, se varió la temperatura de entrada del aire mediante una resistencia eléctrica comandada con un potenciómetro regulable. Los días seleccionados para la validación del modelo fueron: 17, 18, 19, y 23 de julio; 28 y 29 de agosto, debido a que corresponden a días claros y representan días en condiciones normales de funcionamiento.

El modelo físico-matemático desarrollado y publicado por los autores del presente trabajo fue introducido en el programa CLOE® para realizar la validación, evaluando la performance termo-energética del colector comparando los valores medidos y simulados de temperatura de salida y energía útil. Los resultados obtenidos fueron evaluados mediante dos criterios de ajuste; la raíz del error cuadrático medio, RMSE, y el coeficiente de eficiencia, C_{ef} . Ambos criterios muestran que las predicciones realizadas por el modelo son precisas, obteniendo valores del RMSE entre 1,23 y 2,92 °C para la temperatura de salida y entre 17,17 y 36,46 W para la energía útil. En cuanto al coeficiente de C_{ef} , los valores que se obtienen son superiores a 0,8, tanto para la temperatura de salida como para la energía útil, estableciendo que el ajuste obtenido es excelente.

De acuerdo a los resultados obtenidos, el programa CLOE® resulta ser una herramienta muy valiosa para el diseño y evaluación termo-energética de este tipo de tecnología solar. Proporcionando resultados confiables a la hora de realizar un estudio previo a la instalación o construcción del colector. Además presenta la ventaja de poder simular el desempeño del colector en distintos sitios geográficos, épocas del año y bajo distintas condiciones de funcionamiento, con datos climáticos medidos o estimados por el programa.

REFERENCIAS

- Hernández A.; Quiñonez J., 2013. Analytical models of thermal performance of solar air heaters of double-parallel flow and double-pass counter flow. *Renewable Energy*, Vol 55, pág. 380-391.
- Hernández, A. L.; Lesino, G.; Rodríguez, L.; Linares, J. (2010). Design, Modelling and Computational Assessment of Passive and Active Solar Collectors for Thermal Conditioning of the First Bioclimatic Hospital in Argentina. *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 3, N° 3, p. 217 – 232.
- Hernández A., (2003), “Geosol: Una Herramienta Computacional Para el Cálculo de Coordenadas Solares y la Estimación de Irradiación Solar Horaria”, AVERMA, *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 7 – N° 2, pág. 11-19 a 11-24. ISSN: 0329-5184, Argentina.
- Iannelli, L.; Gil, S. (2012). *Acondicionamiento térmico de aire usando energía geotérmica-ondas de calor*. Latin-American Journal of Physics Education. Vol. 6, N° 1, pp. 99-105. ISSN 1870-9095. March 2012.
- McCuen, R.H., Knight, Z. y Cutter, A.G. 2006. Evaluation of the Nash Sutcliffe Efficiency Index. *J. Hydrol. Eng.* 11, 597-602.
- Nash, J.E. y Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. 282-290.
- Quiñonez J.; Hernández A; y Flores Larsen S., 2012. Evaluación termoenergética de un colector solar calentador de aire de doble paso en contra corriente diseñado para la calefacción de edificios. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol.16, pág. 03-55 a 03-62.
- Incropera F. & DeWitt D. (1990). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 3rd edition. John Wiley & Sons, New York.

ABSTRACT

In this paper, the predictive capacity of a physical-mathematical model for configuration of solar air heater collector of double pass-counter flow was evaluated. Model validation was performed by comparing measured and simulated data by CLOE[®] (Change in wavelength electromagnetic) software. The tests were conducted during the winter of 2012 connecting the collector to a building prototype. Air temperature at the collector inlet and outlet, outdoor air temperature and solar radiation on the collector surface were measured. The results show an excellent agreement between the measured data and the simulated values. To the outlet temperature, the RMSE error is less than 2.93 °C and C_{ef} is higher than 0.80. With regard to the useful energy, the RMSE error is less than 36.50 W and C_{ef} above 0.90.

Keywords: solar air collector, computational simulation, physical-mathematical model.