

Bases teóricas para el análisis exergético de los colectores solares de placas planas con tiro forzado

Theoretical Bases for Exergetic Analysis of a Flat Plate Solar Collector with Forced Draft



<http://opn.to/a/thd88>

M.Sc. Lenin Pita Cantos^{I✉}, Dr.C. Miguel Herrera Suárez^{II}, Dr.C. Juan José González Bayón^{III}

^I Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Portoviejo, Manabí. Ecuador.

^{II} Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, Manabí. Ecuador.

^{III} Universidad Tecnológica de La Habana, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Marianao, La Habana, Cuba.

RESUMEN. En el presente trabajo se exponen bases teóricas que fundamentan el análisis exergético de los colectores solares de placas planas con tiro forzado, empleados en el secado y deshidratación de productos agrícolas. Dicho análisis parte de la discusión de los elementos teóricos que se incluyen durante la realización del balance energético de los colectores solares de placas planas y tiro forzado. Posteriormente se analizaron los elementos a tomar en cuenta para la realización del balance exergético de estos tipos de colectores. Los resultados permitieron definir el procedimiento metodológico para la realización del análisis exergético de los colectores solares, además se definieron las variables o factores que determinan la eficiencia energética de los mismos, así como las causas y factores que originan las pérdidas de energía. Finalmente se definió el método propuesto por Pons (2012) como el más adecuado para determinar la exergía de la radiación solar que llega a la superficie terrestre.

Palabras clave: balance energético, balance exergético, pérdidas de exergía, eficiencia exergética, secado, calentadores de aire.

ABSTRACT. In the present paper, theoretical basis for the exergy analysis of solar flat plate collectors with forced draft used in drying and dehydration of agricultural products are exposed. This analysis starts from the discussion of the theoretical elements that are included in the realization of the energy balance of solar flat plate collectors and forced draft. Later the elements to consider for implementing the exergy balance of these types of collectors were analyzed. The results allowed defining the methodological procedure for the realization of exergy analysis of solar collectors. In addition, the variables or factors that determine the energy efficiency were defined, as well as the causes and factors that cause energy losses. Finally, the method proposed by Pons (2012) was defined as the most suitable for determining the exergy of solar radiation reaching the earth's surface.

Keywords: energy balance, exergy balance, loss of exergy, exergy efficiency, drying, air heaters.

✉ Autor para correspondencia: Lenin Pita Cantos. E-mail: miguelhs2000@yahoo.com

Recibido: 02/06/2017

Aceptado: 11/06/2018

INTRODUCCIÓN

Los colectores solares son dispositivos diseñados para recoger energía solar, después de absorber los rayos del sol. La energía, una vez recogida, se emplea en procesos térmicos o fotovoltaicos. Por lo general, en los procesos térmicos la energía solar se utiliza para calentar un gas o un líquido, ya sea para su almacenamiento o distribución. En los procesos fotovoltaicos, la energía solar se transforma en energía eléctrica sin que medie la utilización de algún dispositivo mecánico.

Aunque la utilización de la energía solar por el hombre se remonta prácticamente a su propia existencia, no fue hasta el año 1875 que el francés Mouchont desarrollara el primer colector solar para la producción de vapor las características constructivas y aplicaciones de la energía transformada ([Arellano-Escudero, 2015](#)).

Ya para principios del siglo pasado la utilización de la energía solar cobró especial interés en los Estados Unidos, sobre todo en el estado de California, donde se desarrollaron varios prototipos de colectores de grandes dimensiones ([Díaz Marcano, 2012](#)). A principio de 1913, comenzó la expansión hacia otros países la utilización de estos colectores, lográndose su introducción en varios sectores de la industria y el sector privado.

El desarrollo y expansión de estos sistemas se vio frenado con el desarrollo de la Segunda Guerra Mundial, pues debido a la baja de los precios de los combustibles fósiles la utilización de la energía solar quedó relegada a un segundo plano.

A mediados del siglo XX se emprende una nueva etapa en la utilización de la energía y aunque el desarrollo de estos medios se ha visto frenado en varias etapas, debido a la baja de los precios de los combustibles fósiles o convencionales, no obstante en dicho contexto se aprecia un incremento moderado de las aplicaciones de la energía solar en general y de colectores solares de aire en lo particular.

Una de las principales aplicaciones que han tenido estos colectores solares es el secado de productos provenientes del sector agropecuario, ya para finales del año 1940 se desarrollan una serie de trabajos experimentales que tenían como objetivo aprovechar la energía solar en el secado de granos, aunque los estudios teóricos experimentales tienen sus inicios en la década de los años 60 del pasado siglo ([López, 2012](#)).

Desde entonces se han construido e introducido en la actividad del secado de granos multitud de variantes de secadores, que desde el punto de vista constructivo tienen un elemento común, es decir, poseen un captador solar con una placa o superficie que absorbe la energía solar ([López, 2012](#)). Las características de esta placa varían según la aplicación del secador.

Las aplicaciones de la energía solar en el secado y deshidratación de productos perecederos ha alcanzado cada vez más aplicaciones, lo cual ha estado condicionado en gran medida por la necesidad de introducir energías alternativas que hagan sustentable estos procesos y que reduzcan la carga contaminante que se emite al ambiente.

A esta problemática se le suma que en la actualidad de un 10 a 40% de los productos cosechados nunca llegan al consumidor ([Llosas et al., 2014](#)). Según el propio autor este comportamiento se presenta principalmente en los países en vías de desarrollo debido a la descomposición y la contaminación del producto.

Dichas aplicaciones comprenden el secado y deshidratación de plantas aromáticas, café, cacao, mango, entre muchos otros ejemplos que se pueden citar ([González et al., 2012](#); [López, 2012](#); [Llosas et al., 2014](#); [Esteban, 2015](#)).

Durante estos procesos térmicos los colectores captan la radiación solar en una placa (absorbedor) que luego absorbe un fluido al cual se le denomina fluido portador. Dicho fluido ya sea en estado líquido o gaseoso, se calienta por transferencia de calor desde la placa de absorción. La energía transferida por el fluido portador, dividida entre la energía solar que incide sobre el colector y expresada en porcentaje, se llama eficiencia instantánea del colector.

Según [González et al. \(2012\)](#), los estudios sobre estos colectores en una primera etapa se dirigieron a encontrar una mejor relación eficiencia térmica-costos, alcanzando eficiencias del 75% bajo condiciones normales de operación. Posteriormente el centro de atención se dirigió hacia el incremento del calor transferido hacia el fluido portador a partir de la creación de la turbulencia, lográndose eficiencias superiores al 75% ([Ammari, 2003](#); [Moumni et al., 2004](#); [Romdhane, 2007](#)).

Según [Kurtbas y Durmuş \(2004\)](#), los efectos del material y la geometría del absorbedor en la eficiencia de los colectores son parámetros que habían sido ampliamente reportados en la literatura, sin embargo la influencia del régimen de flujo en la eficiencia de los colectores no había sido estudiada en detalles.

A partir del desarrollo alcanzado por los medios de computación desde la última década del siglo pasado se iniciaron una serie de estudios donde se desarrollaron modelos mediante el método Dinámica de los Fluidos Computacional (DFC) para la simulación de los procesos de circulación del flujo y la transferencia de calor en los colectores solares, teniendo como objetivo la mejora la eficiencia energética y su optimización ([Marroquín et al., 2013](#); [Salame et al., 2014](#); [Uppal et al., 2014](#); [Tapas et al., 2015](#); [Yadav et al., 2015](#); [Singh y Dhiman, 2016](#)), el de Diferencias Finitas ([Durán y Condori, 2012](#); [Marathe et al., 2013](#)), así como, mediante el empleo de las Redes Neuronales Artificiales ([Esen et al., 2009](#); [Omojaro et al., 2013](#); [Abuşka et al., 2015](#); [Liu et al., 2015](#)).

De igual forma, se han desarrollado una serie de investigaciones para determinar el potencial de trabajo útil o la exergía de estos colectores (Akpınar y Koçyiğit, 2010; Chamoli, 2013; Kalogirou, 2013; Oztop *et al.*, 2013; Bouadila *et al.*, 2014; Sahu y Prasad, 2016; Ghiami *et al.*, 2017). Todas estas investigaciones han tomado en cuenta las características constructivas de los colectores de aire caliente, sus principios de funcionamiento, y las condiciones de operación. Aspectos que se incluyen en los modelos teóricos desarrollados para el cálculo de la exergía o pérdida de energía útil.

Las validaciones de estos modelos se han realizado en condiciones o ambientes diferentes a las de las regiones típicas del Ecuador, sobre todo las de las provincias de la costa del Pacífico ecuatoriano.

Tomando en cuenta la importancia de la introducción de la energía solar en el secado y deshidratación de productos provenientes del sector agropecuario, además de la necesidad de contar con colectores cada vez más eficientes desde el punto de vista exergético según las condiciones ambientales y de operación del Ecuador, se desarrolla el presente trabajo que tiene como objetivo exponer las bases teóricas que fundamentan el análisis exergético de los colectores solares de placas planas con tiro forzado, empleados en el secado y deshidratación de productos agrícolas.

MÉTODOS

Bases teóricas para el análisis exergético de los colectores solares de placas planas con tiro forzado

El rendimiento de los colectores solares se describe como un balance que indica la cantidad de energía solar incidente que se transforma en energía útil, el que incluye un análisis de las irreversibilidades que causan destrucción de exergía. Por lo que el análisis exergético de los colectores inicia con un balance de energía del sistema.

Balance energético de un colector solar de placa plana y tiro forzado. La energía recibida en el absorbedor será la diferencia entre la radiación incidente y las pérdidas ópticas, es decir dependerá de la transmisibilidad óptica de la placa receptora.

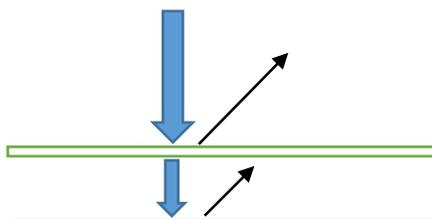


FIGURA 1. Transmisibilidad de la placa receptora y efecto de absorbancia del absorbedor.

De esta forma, el calor útil que llegará al absorbedor estará afectado por el rendimiento óptico del colector (η_o) y la intensidad de la radiación solar I_T , determinándose como:

$$S = (\tau_\alpha)I_T = \eta_o I_T \quad (1)$$

donde:

S , flujo de radiación del absorbedor, W/m^2 ;

τ , transmitancia de la cubierta;

α , absorbancia de la placa;

I_T , radiación solar, W/m^2 ;

η_o , rendimiento óptico del colector.

El valor (τ_α) dependerá del ángulo de incidencia de los rayos solares, aunque la variación es muy pequeña. Cuando los rayos inciden perpendicularmente sobre la placa receptora (I_T) alcanza su valor máximo.

La ganancia de energía útil por el fluido de trabajo se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

Donde:

Q_u , energía útil en el colector, W ;

\dot{m} , son tasa de flujo de masa, kg/seg ;

C_p , calor específico del fluido de trabajo, $J/kg-K$;

T_{in} , temperatura de entrada del fluido, K ;

T_{out} , temperatura de salida del fluido, K .

La ecuación 2 representa el calor entregado por la placa absorbidora del colector hacia el fluido de trabajo, sin embargo no permite observar los efectos de algunos parámetros como los coeficientes de pérdidas de calor y la eficiencia óptica del colector ([Jafarkazemi y Abdi, 2016](#)).

Según [Chamoli \(2013\)](#), tomando en cuenta estos elementos y empleando la ecuación de Hottel-Whillier la potencia útil se determinará, como:

$$Q_u = A_p F_R [S - U_l (T_{in} - T_a)] \quad (3)$$

Donde:

Q_u , Potencia útil de la energía que llega al colector, W ;

A_p , área de la placa absorbidora del colector, m^2 ;

F_R , factor de remoción de calor;

F' , factor de eficiencia del colector;

U_l , coeficiente de pérdidas de calor del colector, $W/m^2 K$;

T_a , temperatura ambiente, K .

El factor de remoción de calor, F_R , se determina por la ecuación 4:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_p U_l} \left[1 - \exp\left(-\frac{F' U_l A_p}{\dot{m} C_p}\right) \right] \quad (4)$$

Determinado el calor útil, la eficiencia energética del colector del colector (η_t) se puede obtener mediante la ecuación 5:

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_u}{A_p I_T} \quad (5)$$

Considerando las correlaciones de distribución de la temperatura en el colector [Duffie y Beckman \(2013\)](#), sistema antes de alcanzar el equilibrio con un entorno de referencia. El balance de exergía en el colector se muestra en la ecuación 7:

$$\sum \dot{E}x_{in} - \sum \dot{E}x_{out} = \sum \dot{E}x_{dest.} \quad (7)$$

Donde $\dot{E}x_{in}$, $\dot{E}x_{out}$, y $\dot{E}x_{dest.}$, representan la tasa de exergía de entrada, de salida y destruida, respectivamente.

Como es de esperarse, la tasa de exergía de entrada al colector incluye la exergía del calor absorbido del sol y la exergía del fluido de entrada. La exergía de salida del colector coincide con la exergía del fluido de salida. La diferencia entre estos dos componentes representa la cantidad de exergía destruida en el colector ([Jafarkazemi y Abdi, 2016](#)).

La tasa de exergía del fluido de trabajo puede ser obtenida por medio de la ecuación 8:

$$\dot{E}x_f = \dot{m} C_p \left[(T_f - T_a) - T_a \ln\left(\frac{T_f}{T_a}\right) \right] \quad (8)$$

La diferencia entre las exergías del fluido a la salida y a la entrada del colector representa el incremento del flujo de exergía que experimenta el fluido a su paso por el colector y es dado por la ecuación 9:

$$\dot{E}x_{f.out} - \dot{E}x_{f.in} = \dot{m} C_p \left[(T_{f.out} - T_{f.in}) - T_a \ln\left(\frac{T_{f.out}}{T_{f.in}}\right) \right] \quad (9)$$

La mayor parte de la energía de entrada al sistema por la radiación solar es absorbida por la placa de absorción, incrementándose su exergía. La tasa de exergía que acompaña a un flujo Q de calor transferido desde una fuente a temperatura T y considerando el ambiente a temperatura T_a , se obtiene por la ecuación 10:

$$\dot{E}x_{calor} = Q \left(1 - \frac{T_a}{T} \right) \quad (10)$$

La tasa de exergía de la radiación solar incidente I_T sobre la superficie colectora es determinada por la ecuación 11:

$$\dot{E}x_{rad} = A_p I_T \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (11)$$

Siendo T_s la temperatura del sol considerado como cuerpo negro.

La cantidad de exergía absorbida por la placa absorbidora del colector solar plano se puede calcular con la ecuación 12:

$$\dot{E}x_{abs.} = \eta_o A_p I_T \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \quad (12)$$

Donde T_p es la temperatura media de la placa absorbidora, K.

Para evaluar la destrucción de la exergía debe considerarse que el proceso de transferencia de energía del sol hacia el fluido de trabajo del colector se compone de dos partes principales, la absorción de la radiación solar por la placa absorbidora y la transferencia de calor de la placa absorbidora al fluido de trabajo (Suzuki, 1988).

La destrucción de la exergía en el proceso de absorción se debe a la diferencia de temperatura entre la placa absorbidora del colector y la temperatura aparente de la radiación solar. Esta parte de la destrucción de la exergía se obtiene de restar las ecuaciones 11 y 12:

$$\dot{E}x_{dest.s-p} = A_p I_T \left[1 - \eta_o + \eta_o \frac{T_a}{T_p} - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right] \quad (13)$$

La pérdida de calor desde la placa absorbidora hacia los alrededores es una fuente de pérdida de exergía del sistema. Dicha pérdida de calor es dada por la ecuación 14:

$$Q_{atrr} = U_l A_p (T_p - T_a) \quad (14)$$

La pérdida de exergía debido a las pérdidas de calor del colector se obtiene según la ecuación 15:

$$\dot{E}x_{pérd.atrr} = U_l A_p (T_p - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \quad (15)$$

La segunda fuente de destrucción de exergía en el proceso de conversión de la energía solar en calor en el colector se halla en la transferencia de exergía de la placa absorbidora al fluido de trabajo a través de una diferencia finita de temperatura, obteniéndose a partir de la ecuación 16:

$$\dot{E}x_{p-f} = \dot{m}_f C_p \left[(T_{f,out} - T_{f,in}) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \right] \quad (16)$$

Considerando que la exergía destruida en el proceso de transferencia de calor entre placa absorbidora y fluido es igual a la diferencia entre la exergía entregada por la placa, dada por la ecuación 16, y la exergía que realmente gana el fluido, dada por la ecuación 9, entonces restando ambas se obtiene la exergía destruida que es mostrada por la expresión 17:

$$\dot{E}x_{dest.p-f} = \dot{m}_f C_p T_a \left[\left(\ln \frac{T_{f,out}}{T_{f,in}} \right) - \frac{T_{f,out} - T_{f,in}}{T_p} \right] \quad (17)$$

El rendimiento exergético del colector se define como la ganancia de exergía que se logra en el fluido de trabajo dividido por la exergía total que llega con la radiación solar al colector (Jafarkazemi & Abdi, 2016). Sustituyendo los valores de la tasa de exergía ganada por el flujo del fluido de trabajo y la exergía de la radiación solar incidente en el colector se obtiene la expresión 18 que permite evaluar el rendimiento exergético del colector.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}_f C_p \left[(T_{f,out} - T_{f,in}) - T_a \ln \left(\frac{T_{f,out}}{T_{f,in}} \right) \right]}{A_p I_T \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_s} \right)^4 \right]} \quad (18)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo de la sección 2 ha sido aplicado considerando valores teóricos aproximados de las variables que intervienen en el proceso de transferencia de calor en los colectores solares planos de aire, los mismos que serán ajustados posteriormente con datos reales a obtenerse de pruebas experimentales mediante simulación CFD.

Para aplicar el modelo se consideran constantes la radiación solar incidente en 1000 w/m^2 , el área del colector de 2 m^2 , el rendimiento óptico del colector 0,85 y la temperatura del aire a la entrada del colector en $26 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la [Figura 2](#) se muestran los efectos de la variación del rendimiento energético en la temperatura de salida del aire, en este caso se ha considerado un flujo de masa constante de $0,05782 \text{ kg/s}$, como resultado se observa un incremento lineal de la temperatura de salida a medida que se incrementa el rendimiento energético.

En la [Figura 3](#) para los mismos valores de flujo de masa y elevación del rendimiento energético se aprecia el incremento de la exergía ganada por el aire a su paso por el colector, para un rendimiento energético de 60 % la exergía ganada es $0,05144 \text{ kw}$.

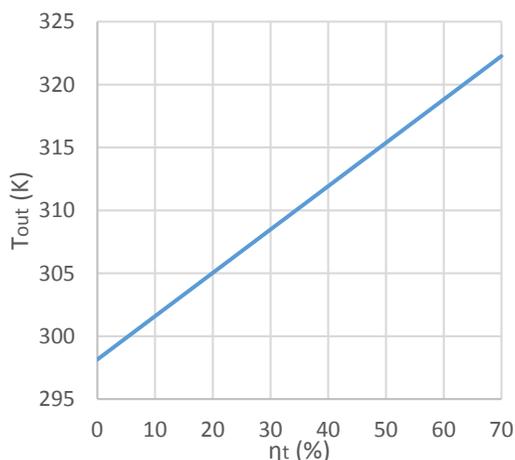


FIGURA 2. Variación de la temperatura de salida del fluido versus el rendimiento energético del colector.

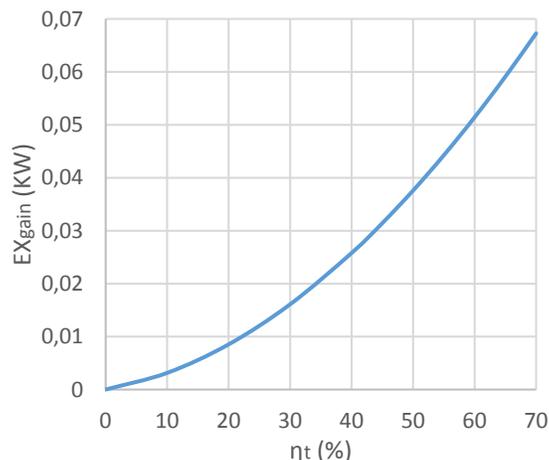


FIGURA 3. Variación de la exergía ganada por el fluido versus el rendimiento energético del colector.

En las [Figuras 4](#) y [5](#) se muestran la influencia de la variación del rendimiento energético sobre el rendimiento exergético del colector y el calor ganado por el aire a su paso por el colector. Para colectores con rendimiento energético del 50 % se obtiene un rendimiento energético de 2 % y 1 kw de calor ganado por el aire.

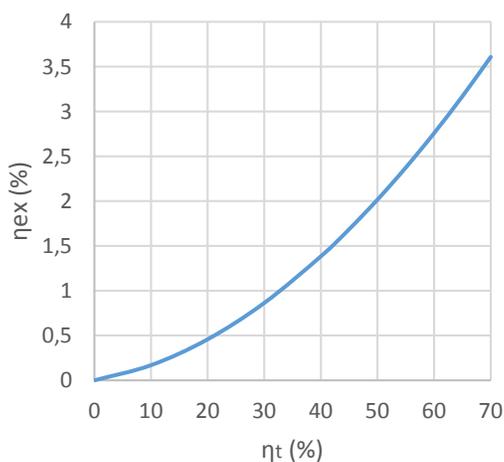


FIGURA 4. Variación del rendimiento exergético versus el rendimiento energético del colector.

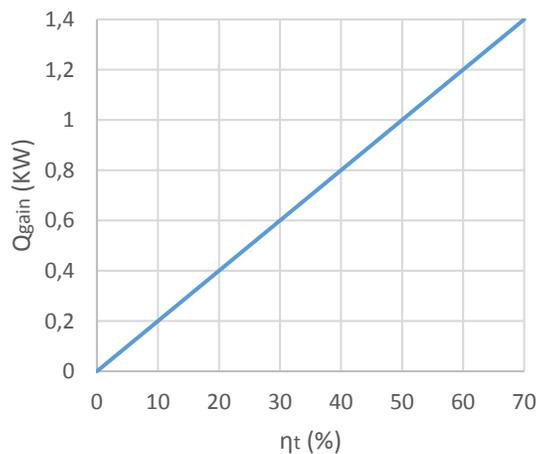


FIGURA 5. Variación del calor ganado por el fluido de trabajo versus el rendimiento energético del colector.

En las [Figuras 6](#) y [7](#) se muestran las variaciones de la exergía ganada por el aire y el rendimiento exergético del colector con respecto a la variación de la temperatura ambiente. En ambos casos se ha mantenido constante el flujo de masa y el rendimiento energético. Se puede apreciar que entre más baja es la temperatura ambiente mayor es la exergía ganada por el fluido y mayor el rendimiento exergético del colector.

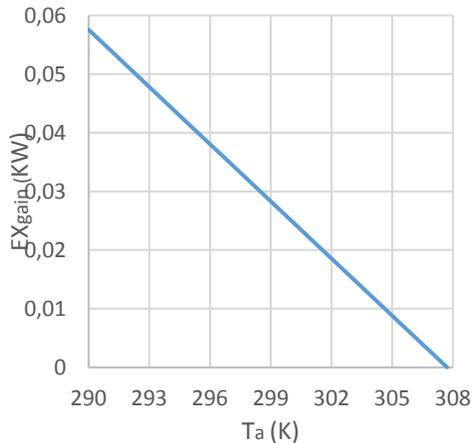


FIGURA 6. Variación de la exergía ganada por el fluido de trabajo versus la temperatura ambiente.

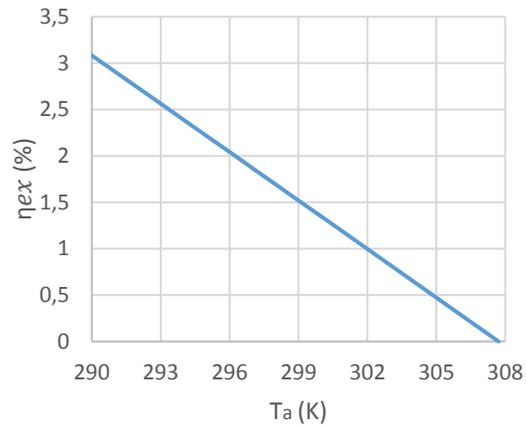


FIGURA 7. Variación del rendimiento exergético del colector versus la temperatura ambiente.

En las Figuras 8, 9 y 10 se muestran la influencia de la variación del flujo de masa sobre la temperatura de salida del aire, la exergía ganada por el fluido y el rendimiento exergético del colector. Se mantiene constante la temperatura ambiente y el rendimiento energético del colector. Se puede apreciar que al aumentar el flujo de masa disminuyen las tres variables descritas, siendo muy importante considerar flujos de masa relativamente bajos.

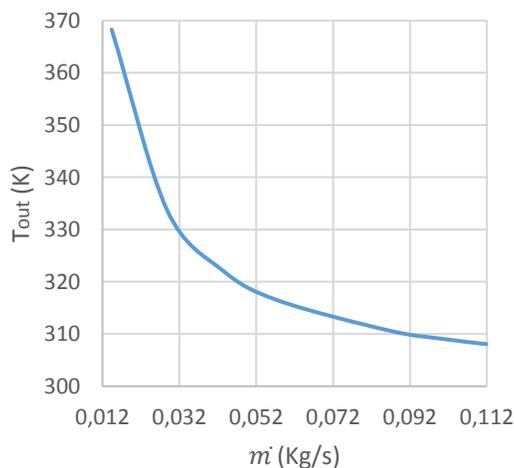


FIGURA 8. Variación de la temperatura de salida del fluido versus la tasa de flujo de masa.

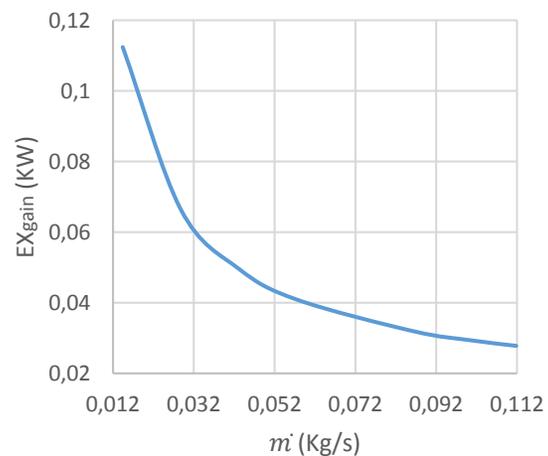


FIGURA 9. Variación de la exergía ganada por el fluido versus la tasa de flujo de masa.

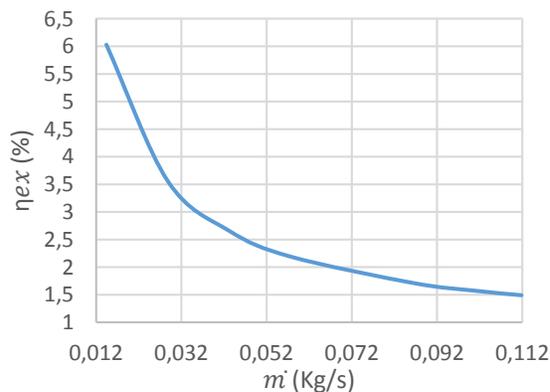


FIGURA 10. Variación del rendimiento exergético del colector versus la tasa de flujo de masa.

Las Figuras 10 y 11 muestran la influencia de la variación de la temperatura de la placa absorbidora sobre la exergía destruida en la transferencia de calor sol-placa y la exergía destruida en la transferencia de calor placa-fluido. Para el efecto se considera flujo de masa variable y temperatura ambiente constante. Se observa que la destrucción de la exergía en el proceso sol-placa disminuye con el aumento de la temperatura de la placa absorbidora; en contrario, la destrucción de la exergía en el proceso placa-fluido aumenta con el aumento de la temperatura de la placa absorbidora.

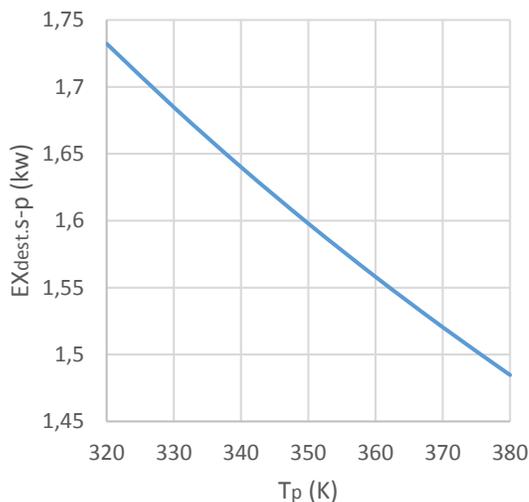


FIGURA 11. Variación de la destrucción de la exergía en la absorción sol-placa versus la temperatura de la placa.

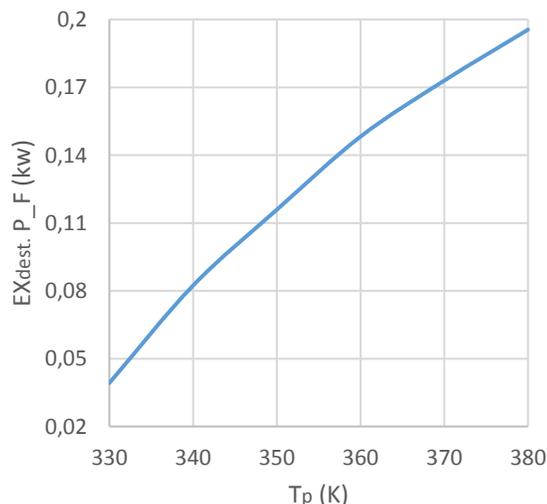


FIGURA 12. Variación de la destrucción de la exergía en la transferencia placa-fluido versus la temperatura de la placa.

CONCLUSIONES

Una vez expuestos los fundamentos teóricos para la realización del balance exergético de colectores solares, se arriba a las siguientes conclusiones:

- La eficiencia exergética de los colectores solares de aire caliente depende de las condiciones atmosféricas en el lugar de instalación (temperatura ambiente, intensidad de la radiación solar), del rendimiento óptico del colector, así como, de las dimensiones de la placa absorbidora del colector;
- Las pérdidas de exergía del sistema disminuyen con el aumento de la eficiencia del colector, debido a la existencia de una relación inversa entre pérdida de exergía adimensional y transferencia de calor;
- Los parámetros de mayor incidencia en la pérdida de exergía de los colectores solares de aire caliente son la eficiencia del colector y las diferencias de temperatura del aire en la entrada y salida del colector;
- El rendimiento exergético de los colectores solares disminuye con la circulación de flujos de masa elevados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABUŞKA, M.; AKGÜL, B.; ALTINTAŞ, V.: *Artificial Neural Network Modeling of the Thermal Performance of a Novel Solar Air Absorber Plate*, Inst. ISITES, Valencia -Spain, 2015.
- AKPINAR, E.K.; KOÇYIĞIT, F.: "Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates", *Applied Energy*, 87(11): 3438–3450, 2010, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.017>.
- AMMARI, H.D.: "A mathematical model of thermal performance of a solar air heater with slats", *Renewable Energy*, 28(10): 1597–1615, 2003.
- ARELLANO-ESCUADERO, N.: *La ingeniería y el descarte artefactual de la desalación solar de agua: las industrias de Las Salinas, Sierra Gorda y Oficina Domeyko (1872-1907)*, Universidad Politécnica de Cataluña, Tesis presentada para optar al grado de Doctor, Barcelona, España, 2015.
- BOUADILA, S.; LAZAAR, M.; SKOURI, S.; KOOLI, S.; FARHAT, A.: "Energy and exergy analysis of a new solar air heater with latent storage energy", *international journal of hydrogen energy*, 39(27): 15266–15274, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.074>.

- CHAMOLI, S.: “Exergy analysis of a flat plate solar collector”, *Journal of Energy in Southern Africa*, 24(3): 08–13, 2013, ISSN: 1021-447X.
- DÍAZ MARCANO, A.: *Diseño de una instalación solar fotovoltaica aislada para una huerta ecológica*, Universidad de Cantabria, Tesis para acceder al título de Ing. Técnico Industrial, España, 2012.
- DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W.A.: *Solar engineering of thermal processes*, Ed. John Wiley & Sons, 2013.
- DURÁN, G.J.; CONDORI, M.A.: “Mecánica Computacional, Volume XXXI. Number 12. Heat Transfer (A)”, 2012.
- ESEN, H.; OZGEN, F.; ESEN, M.; SENGUR, A.: “Artificial neural network and wavelet neural network approaches for modelling of a solar air heater”, *Expert systems with applications*, 36(8): 11240–11248, 2009.
- ESTEBAN BIESCAS, S.: *Actuaciones de un colector solar de aire para secado de productos agrícolas en países en vías de desarrollo*, Escuela Politécnica Superior, B.S. thesis, Madrid, España, 2015.
- GHIAMI, A.; KIANIFAR, A.; ARYANA, K.; EDALATPOUR, M.: “Energy and Exergy Analysis of a Single-Pass Sequenced Array Baffled Solar Air Heater with Packed Bed Latent Storage Unit for Nocturnal Use”, *Heat Transfer—Asian Research*, 46(6): 546–568, 2017.
- GONZÁLEZ, S.M.; LARSEN, S.F.; HERNÁNDEZ, A.: *Simulación del comportamiento térmico de un colector solar de aire de doble flujo mediante el software SIMUSOL*, Inst. ASADES, 2012.
- JAFARKAZEMI, F.; ABDI, H.: “Energy and exergy efficiency of heat pipe evacuated tube solar collectors”, *Thermal Science*, 20(1): 327–335, 2016, DOI: 10.2298/TSCI130227150J.
- KALOGIROU, S.A.: *Solar energy engineering: processes and systems*, Ed. Academic Press, 2013.
- KURTBAS, I.; DURMUŞ, A.: “Efficiency and exergy analysis of a new solar air heater”, *Renewable Energy*, 29(9): 1489–1501, 2004, ISSN: 0960-1481.
- LIU, Z.; LIU, K.; LI, H.; ZHANG, X.; JIN, G.; CHENG, K.: “Artificial neural networks-based software for measuring heat collection rate and heat loss coefficient of water-in-glass evacuated tube solar water heaters”, *PloS one*, 10(12): 16, 2015, ISSN: 1932-6203, DOI: doi:10.1371/journal.pone.0143624.
- LLOSAS, Y.; HARO, A.; SÁNCHEZ, U.; AUDELO, M.: “Modelo matemático de un colector solar bajo las condiciones físicas Y meteorológicas de la ciudad de Riobamba”, *Perfiles*, 2(12): 15-24, 2014.
- LÓPEZ MARTÍNEZ DE GUEREÑU, R.: *Simulación y optimización del captador de un secadero solar*, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, Master’s Thesis, Madrid, España, 2012.
- MARATHE, A.P.; JOSHI, S.M.; THOKAL, G.N.: “Mathematical Modelling of Solar Air Heater”, *Mathematical Modelling*, 3(3): 1000–1010, 2013.
- MARROQUÍN, A.D.J.; OLIVARES, M.J.; JIMÉNEZ, O.; ZAMORA, A.; ENCINAS, A.: “Analysis of Flow and Heat Transfer in a Flat Solar Collector with Rectangular and Cylindrical Geometry Using CFD”, *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(4): 553-561, 2013, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1405-7743\(13\)72265-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1405-7743(13)72265-0).
- MOUMMI, M.; YOUCEF-ALI, S.; MOUMMI, A.; DESMONS, J.Y.: “Energy analysis of a solar air collector with rows of fin”, *Renewable Energy*, 29: 2053-2064, 2004, ISSN: 0960-1481.
- OMOJARO, P.; NWULU, N.I.; ILKAN, M.: “Deploying an Artificial Neural Network Model for Solar Air Heating Modelling”, *Information*, 6(5): 3249-3257, 2013, ISSN: 1463-6697.
- OZTOP, H.F.; BAYRAK, F.; HEPBASLI, A.: “Energetic and exergetic aspects of solar air heating (solar collector) systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21: 59–83, 2013.
- ROMDHANE, B.S.: “The air solar collectors: comparative study, introduction of baffles to favor the heat transfer”, *Solar Energy*, 81(1): 139–149, 2007, ISSN: 0038-092X.
- SAHU, M.K.; PRASAD, R.K.: “Exergy based performance evaluation of solar air heater with arc-shaped wire roughened absorber plate”, *Renewable Energy*, 96: 233–243, 2016.
- SALAME, C.; AILLERIE, M.; PAPAGEORGAS, P.; A. BOULEMTAFES-BOUKADOUM; BENZAOU, A.: “Analysis of Heat Transfer Enhancement in Solar Air Heater Provided with Transverse Rectangular Ribs”, *Energy Procedia*, 50: 761-772, 2014, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.094>.

- SINGH, S.; DHIMAN, P.: “Exergoeconomic analysis of recyclic packed bed solar air heater-sustained air heating system for buildings”, *Journal of Energy Storage*, 5: 33–47, 2016.
- SUZUKI, A.: “A fundamental equation for exergy balance on solar collectors”, *Journal of solar energy engineering*, 110(2): 102–106, 1988, ISSN: 0199-6231.
- TAPAS, V.; SAO, A.K.; SHARMA, P.: “Computational Analysis of an artificial roughened surface of Solar Air heater”, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4(15): 12205-12212, 2015, DOI: 10.15680/IJRSET.2015.0412092.
- UPPAL, A.; KUMAR, V.; SINGH, C.: “CFD Analysis of Heat Transfer Enhancement in a Heat Exchanger Using Various Baffle Arrangements”, *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology*, 4(2), 2014.
- YADAV, A.S.; SAMANT, T.S.; VARSHNEY, L.: “A CFD based analysis of solar air heater having v-shaped perforated blocks on absorber plate”, *Int. Res. J. Eng. Tech*, 2: 822–829, 2015.

Lenin Pita Cantos, Prof. Titular, Universidad Técnica de Manabí. Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Calle Urbina y Che Guevara, Portoviejo, Manabí. Ecuador. <https://orcid.org/0000-0003-4567-5872>. e-mail: miguelhs2000@yahoo.com

Miguel Herrera Suárez, e-mail: miguelhs2000@yahoo.com

Juan José González Bayón, e-mail: jjgbayon@ceter.cujae.edu.cu

NOTAS

*Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

*Este artículo de se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

*La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.