



Diseño de un colector solar de placa plana

Design of a solar flat plate collector

Jeovany Rafael–Rodríguez Mejía
Francisco Eneldo–López Monteagudo
María Auxiliadora–Araiza Esquivel

Carlos–Olvera Olvera
Santiago A.–Dorrbercker

Recibido: junio de 2015

Aprobado: septiembre de 2015

RESUMEN /ABSTRACT

En el presente artículo se integra el uso de un software de diseño mecánico y un algoritmo de simulación de la operación de un colector solar de placa plana, con el objetivo de simplificar el proceso de diseño y manufactura de este último. Se exponen los resultados de la simulación de la operación del colector solar considerando diferentes combinaciones en los parámetros de los materiales utilizados, tales como sus propiedades y características físico químicas, además de la variación de las dimensiones del sistema a diseñar. Finalmente en el artículo se evalúa la operación de un colector solar para las condiciones climatológicas típicas de la irradiancia, velocidad de viento y temperatura ambiente a partir de una serie de curvas sinusoidales, típicas de Cuba, validándose la viabilidad del algoritmo como apoyo en la etapa de diseño y selección de materiales.

Palabras clave: colector solar de placa plana, paquete de software matlab.

In this article the use of mechanical design software and an algorithm for simulating the operation of a flat plate solar collector, with the objective of simplifying the process of design and manufacture of the latter is integrated. The simulation results of the operation of the solar collector considering different combinations in the parameters of the materials used, such as its physicochemical properties and features in addition to the variation of the dimensions of the system design are set. The article finally evaluates the operation of a solar collector for typical climatic conditions of irradiance, wind speed and ambient temperature from a series of sinusoidal, typical Cuba curves is evaluated, validating the feasibility of the algorithm as support in step design and material selection.

Key words: flat plate solar water heater, matlab software package.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la optimización del diseño se ha efectuado utilizando software de simulación y dibujo mecánico; con el objetivo de reducir los costos en el proceso de manufactura, además de incrementar la eficacia en el diseño. En el artículo se utilizan unidades del sistema internacional combinadas con anglosajonas ya que son las magnitudes empleadas en Cuba para designar los diámetros de las tuberías. Las aplicaciones de software más utilizadas para la simulación de procesos son matlab, labview y simulink, los cuales simplifican el proceso de diseño. Con respecto al software de diseño mecánico el de mayor aplicación es Solid Works; por su compatibilidad con aplicaciones de simulación como son ANSYS y Comsol; los cuales pueden simular procesos de transferencia de calor y dinámica de fluidos [1, 2, 3].

En el presente artículo se muestra un algoritmo de cálculo desarrollado en matLab que permite simular y diseñar un colector solar, además se puede evaluar el rendimiento térmico del sistema, considerando distintos parámetros constructivos del colector. Este algoritmo considera parámetros meteorológicos típicos a partir de los cuales se obtiene una serie de curvas de eficiencia del colector, las mismas se utilizan para optimizar el proceso de diseño del sistema en Solid Works.

Mediante la simulación en la etapa de diseño de calentadores solares se puede evaluar la eficacia del calentador, la viabilidad para su construcción, a partir de las características típicas de los parámetros meteorológicos considerados en el diseño del colector y finalmente se optimiza el proceso de diseño con las herramientas del Solid Works [4, 5, 6, 7, 8, 9].

El aporte fundamental del artículo es la simulación de la operación del sistema para el diseño de un calentador solar de placa plana integrando un software de simulación y un software de diseño mecánico en función de las condiciones específicas de cada región.

Calentador solar de agua

Un calentador solar de agua es aquel sistema que a partir de la energía del sol logra elevar la temperatura del agua, este sistema se conforma por un colector solar; que es básicamente un intercambiador de calor, que transforma la energía radiante del sol en calor útil, un tanque acumulador donde se almacena el agua caliente hasta su uso y una serie de conexiones que interconectan estos elementos principales con el fin de que funcione a partir del fenómeno termosifónico. Estos sistemas pueden ser de placa plana, tubos evacuados o de concentración. El diseño del captador de placa plana se basa fundamentalmente en las propiedades y características de los elementos que lo conforman, el mismo está formado por una placa plana delgada que está unida a una serie de tubos paralelos interconectados entre sí en forma de radiador, cuya superficie comúnmente es negra colocada de manera conveniente hacia el sol en una estructura resistente de metal, una cubierta superior transparente y en su interior tiene la placa absorbidora así como aislante térmico a su alrededor con el fin de minimizar las pérdidas de calor con el ambiente, en la figura 1 se muestra un captador solar.

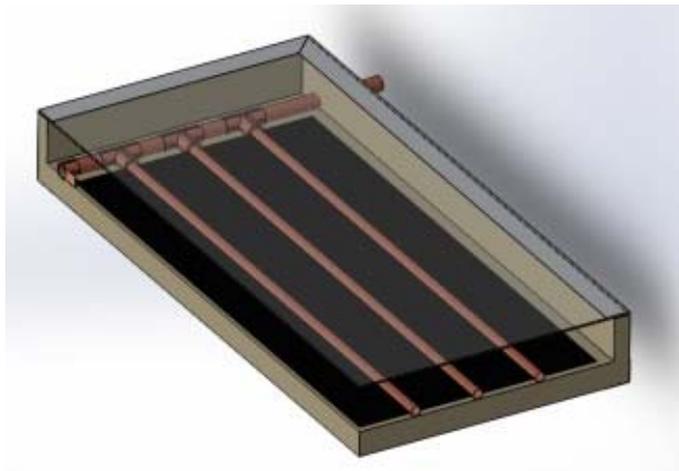


Fig. 1. Captador solar

La operación del colector solar se logra evaluar a partir de un balance energético, en estado permanente mediante las ecuaciones (1) y (2):

$$E_u = E_a - E_p \quad (1)$$

donde E_u es la energía útil del sistema, E_a y E_p son la energía absorbida y la energía pérdida por el sistema, respectivamente.

$$q_u = A_c \cdot F_R \cdot G_T \eta - A_c \cdot F_R \cdot U_L \cdot (T_i - T_{am}) \quad (2)$$

donde $G_T \eta$ corresponde a la radiación solar absorbida por efecto de la eficiencia de los materiales que lo conforman, A_c es el área de colección, F_R queda definido como el factor de remoción de calor, U_L se define como el coeficiente global de pérdidas, T_i es la temperatura de entrada del fluido y T_{am} es la temperatura ambiente. Entonces el calor útil se define como q_u .

El método para evaluar el rendimiento térmico del colector expuesto a la radiación solar incidente de cualquier localidad en cuestión, depende de T_i y T_o que son las temperaturas de entrada y salida del fluido, respectivamente, al igual que m_m definido como el flujo másico y C_p como la capacidad calorífica del agua.

Por lo tanto el calor útil del sistema puede definirse por la ecuación (3) como:

$$q_u = m_m \cdot C_p (T_o - T_i) \quad (3)$$

Simplificando la ecuación 2, se logra obtener la ecuación (4).

$$q_u = A_c \cdot F_R \cdot [G_T \eta - U_L \cdot (T_i - T_{am})] \quad (4)$$

Definiendo G_T como la radiación incidente en el plano inclinado del colector, η se determina como la eficiencia del sistema. A partir de esto se logra determinar la eficiencia térmica del colector η_i como se escribe en la ecuación (5).

$$\eta_i = \frac{q_u}{A_c \cdot G_T} = F_R \eta - \frac{F_R \cdot U_L \cdot (T_i - T_{am})}{G_T} \quad (5)$$

De acuerdo al método ASHRAE 93-2003 para comprobar el método de cálculo deberán censarse las temperaturas del fluido a la entrada y salida, así como el flujo másico del sistema, la irradiancia en el plano del colector, temperatura ambiente y velocidad de viento [10].

La rutina de cálculo considera distintas variables a simular con el fin de optimizar el diseño del colector solar, en el rango más alto de eficiencia térmica. En el diseño se consideran diferentes tipos de tubería de cobre así como distintos diámetros en tubos y cabezales, diferentes tipos de placa absorbadora y pinturas selectivas. En cuanto al aislante se consideran elementos de características diferentes con parámetros constantes para el fluido de trabajo y para las variables climatológicas se simulan los rangos típicos de temperatura ambiente, irradiancia y velocidad de viento.

Se desarrolló un algoritmo en matlab para simplificar el cálculo y simular la operación del colector durante un período de ocho horas de trabajo; con el objetivo de obtener la eficiencia térmica, los valores de temperatura alcanzada por la placa, temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo, pérdidas del sistema así como las gráficas que relacionan estas variables con el tiempo de operación.

RESULTADOS

Los valores de los parámetros de diseño para las condiciones de Cuba son: latitud de 23,12°N, longitud de 82,38°O, altitud de 80 m sobre el nivel del mar, irradiancia media anual aproximada de 5 kWh/m² día, temperatura ambiente promedio 26°C y velocidad de viento promedio 4 m/s. Los valores de irradiancia, temperatura ambiente y velocidad de viento fueron simulados para los rangos típicos en las condiciones de Cuba. Para el diseño se consideró tubería de cobre tipo M y K, las dimensiones de la tubería fueron de ½ pulgada a diferencia de los cabezales los cuales se consideran ½ pulgada y ¾ pulgada. Para determinar las características de la placa absorbadora se tomaron en cuenta placas de cobre y aluminio del mismo calibre. En la simulación se tomaron en cuenta las características de diferentes materiales aislantes como: poliuretano de alta densidad (PAD), polietileno (EPS), fibra de vidrio (FV) y Celulosa.

La grafica de mayor consideración fue la de eficiencia térmica η_i contra un factor conformado por el gradiente de temperatura respecto a la radiación solar incidente $(T_i - T_{am})/G_T$. Con el objetivo de observar la tendencia de operación del sistema, finalmente se linealizó la gráfica para obtener el valor máximo de energía absorbida y la cantidad de pérdidas del sistema. Correlacionando la gráfica con la ecuación de la recta para los coeficientes (a y b) de las ecuaciones del ajuste de la curva, se observa que " a " se relaciona con el máximo calor absorbido por el sistema $F_R \cdot \eta$ y " b " se relaciona con las pérdidas del colector hacia los alrededores $-F_R \cdot U_L$, según se demuestra en [11, 12]. El sistema se evaluó a partir de los parámetros constructivos específicos del colector diseñado, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 1.

Los datos meteorológicos y temperaturas alcanzadas por el sistema se muestran en la figura 2 y los resultados de la primera simulación se muestran en la figura 3.

Tabla 1. Parámetros iniciales de cálculo

Parámetros	Unidades	Cobre		Cobre-Aluminio	
		Tipo M	Tipo K	Tipo M	Tipo K
Tubería	in (1 in = 32 mm)	0,5	0,5	0,5	0,5
		0,75	0,75	0,75	0,75
Aislante térmico	W/m°C	PAD = 0,018	EPS = 0,034	PAD = 0,018	EPS = 0,034
		FV = 0,03	Celulosa = 0,039	FV = 0,03	Celulosa = 0,039
Placa absorbadora	%	$\epsilon = 94 \%$	$\epsilon = 94 \%$	$\epsilon = 94 \%$	$\epsilon = 94 \%$
Dimensiones del colector	m	largo: 2 ancho: 1		largo: 2 ancho: 1	
Temperatura de entrada agua	°C	19		19	
Temperatura de placa propuesta	°C	21		21	
Caudal	l/m	3		3	

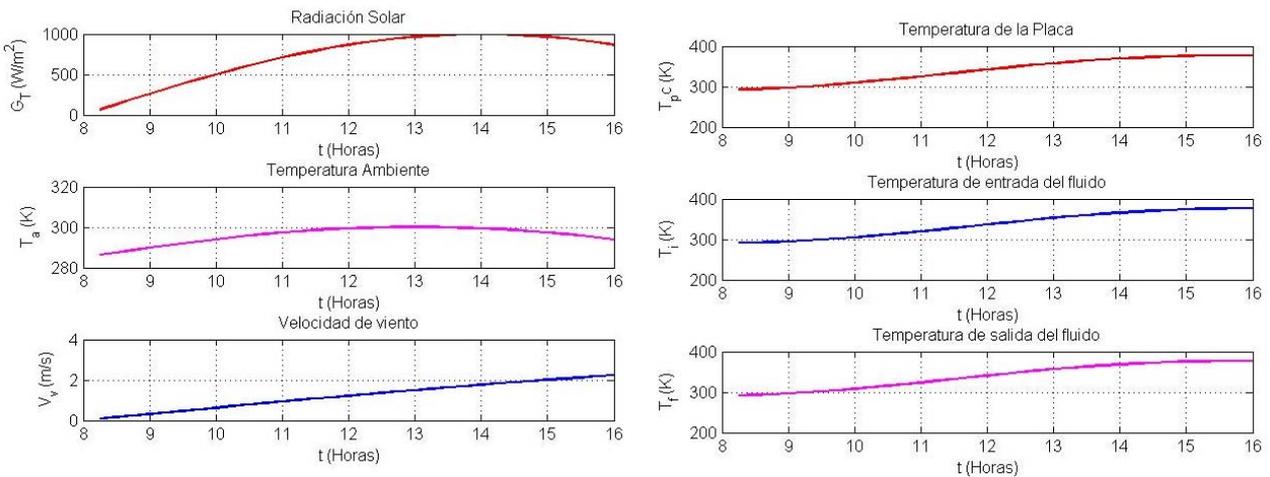


Fig. 2. Datos meteorológicos y temperaturas alcanzadas por el sistema

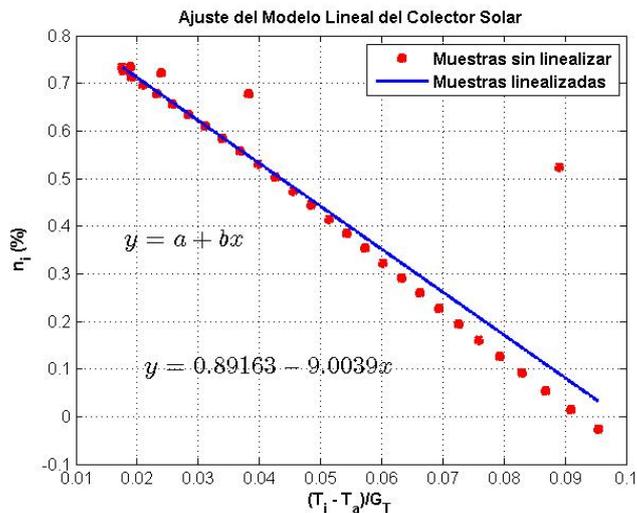


Fig. 3. Ajuste lineal del sistema

Como se observa en la simulación realizada para evaluar la operación del colector; las condiciones meteorológicas influyen de manera directa sobre el sistema, en la simulación se aprecia que la irradiancia típica media alcanzada fue de $729,47 \text{ W/m}^2$, la temperatura ambiente promedio fue de $22,85^\circ\text{C}$ y el valor alcanzado de la velocidad de viento promedio fue de $1,21 \text{ m/s}$, debido a las características del medio ambientales y las características constructivas, en el sistema se incrementa de manera gradual la temperatura del fluido y la de la placa absorbadora. Para las condiciones definidas anteriormente el sistema alcanzó una eficiencia térmica promedio de $45,44\%$ durante el período de evaluación, alcanzándose un calor absorbido del $89,16\%$ con el $9,0039 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ de pérdidas de energía durante la evaluación.

En la operación del colector se puede observar que la eficiencia cae por debajo de cero, debido al descenso de la irradiancia y al incremento en el diferencial de temperatura entra la temperatura del fluido de entrada y la temperatura ambiente. En la segunda simulación se modificaron los parámetros constructivos en los cabezales del colector, considerando las mismas características climatológicas y constructivas que en la primera simulación. Los resultados de la segunda simulación se muestran en la figura 4.

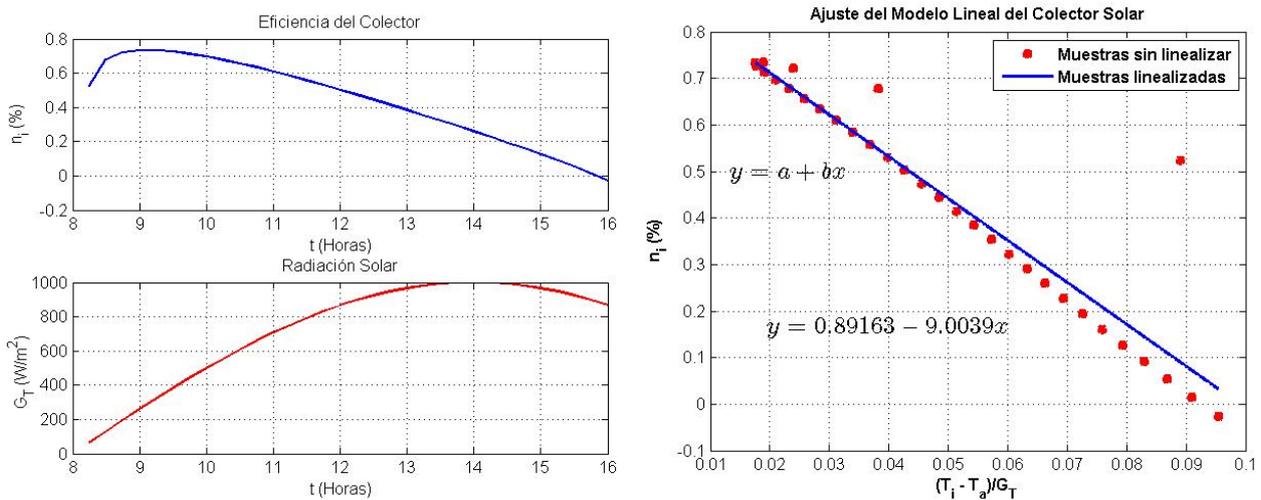


Fig. 4. Modelo del sistema en función de la eficiencia y radiación solar

Como se observa en la simulación no existe un cambio significativo en la operación del sistema ya que la eficiencia térmica del sistema se mantuvo en los mismos rangos, con un calor absorbido de $89,16\%$ y las pérdidas se mantuvieron en $9,0039 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, durante el período de evaluación, demostrándose que no hay cambios considerables al modificar el diámetro entre cabezales y tubería del colector. En la tercera simulación se modifican los parámetros constructivos en la placa absorbadora, los demás parámetros tanto medio ambiental como constructivos son iguales a los de la primera simulación.

Como se observa en esta simulación el sistema alcanzó una eficiencia térmica promedio de $45,13 \%$ durante el período de simulación, el valor de calor absorbido fue de $87,82\%$ y las pérdidas durante el período de evaluación fueron de $8,86 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

El descenso de la eficiencia térmica se debe al coeficiente de conductividad térmica de la placa absorbadora ya que al considerar aluminio, este es menor con respecto al cobre. En la cuarta simulación se modificó el aislante térmico para una placa absorbadora de cobre, considerando los demás parámetros medio ambientales y constructivos iguales a los de la primera simulación, para estas condiciones el sistema alcanzó una eficiencia térmica de $44,27\%$ durante el período de simulación para un calor absorbido de $88,05\%$ y pérdidas de $9,21 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. El aumento en las pérdidas se debe al coeficiente de conductividad térmica que tiene el aislante del polietileno que es mayor al del poliuretano. Los resultados de la tercera y cuarta simulación se muestran en la figura 5.

En la quinta simulación se modificó el parámetro constructivo de la placa absorbadora utilizando aluminio y Polietileno como aislante, los demás parámetros de diseño son iguales a los de la primera simulación para estas condiciones el sistema alcanzó una eficiencia térmica de $43,95\%$ durante el período de simulación, con un calor absorbido de $86,67\%$ y pérdidas de energía térmica de $9,07 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, durante el periodo de evaluación.

El descenso de la eficiencia térmica se debe a las diferencias entre los coeficientes de conductividad térmica de la placa absorbedora ya que al considerar aluminio, este es menor con respecto al cobre, ya que este aislante produce un mayor grado de pérdidas energéticas. En la sexta simulación se utilizar fibra de vidrio como aislante térmico, los demás parámetros tanto medio ambientales como constructivos son iguales a los de la primera simulación, para estas condiciones el sistema alcanzó una eficiencia térmica de 44,55% durante el período de simulación, con un calor absorbido de 88,3% y pérdidas energéticas de 9,17 W/(m²·°C), durante el periodo de evaluación. El descenso de la eficiencia térmica y aumento en las pérdidas se debe a la acción del aislante térmico. Los resultados de la quinta y sexta simulación se muestran en la figura 6.

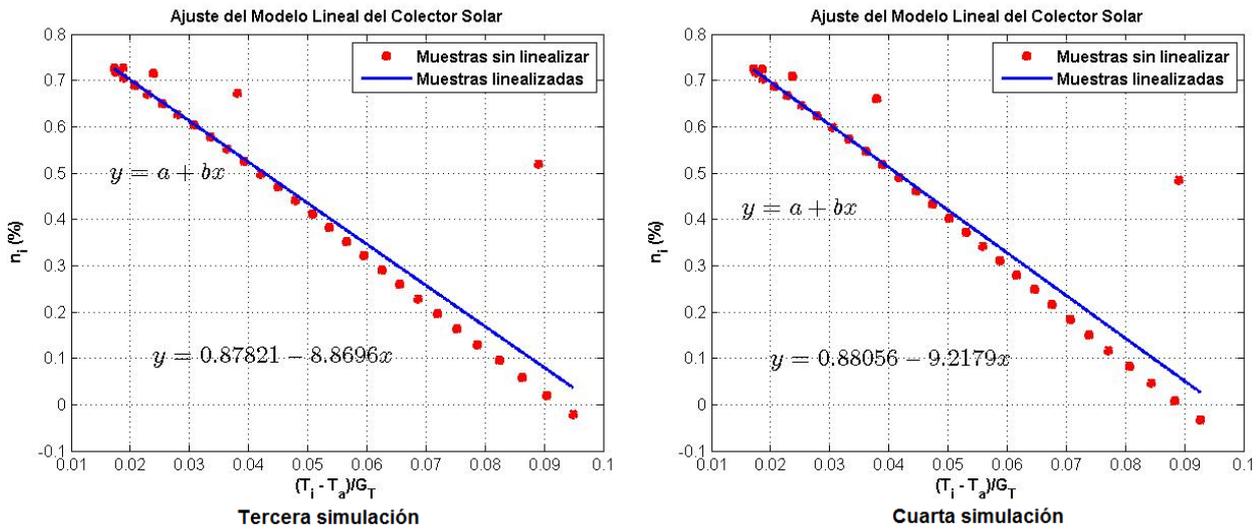


Fig. 5. Ajuste lineal del sistema correspondiente a la tercera y cuarta simulación

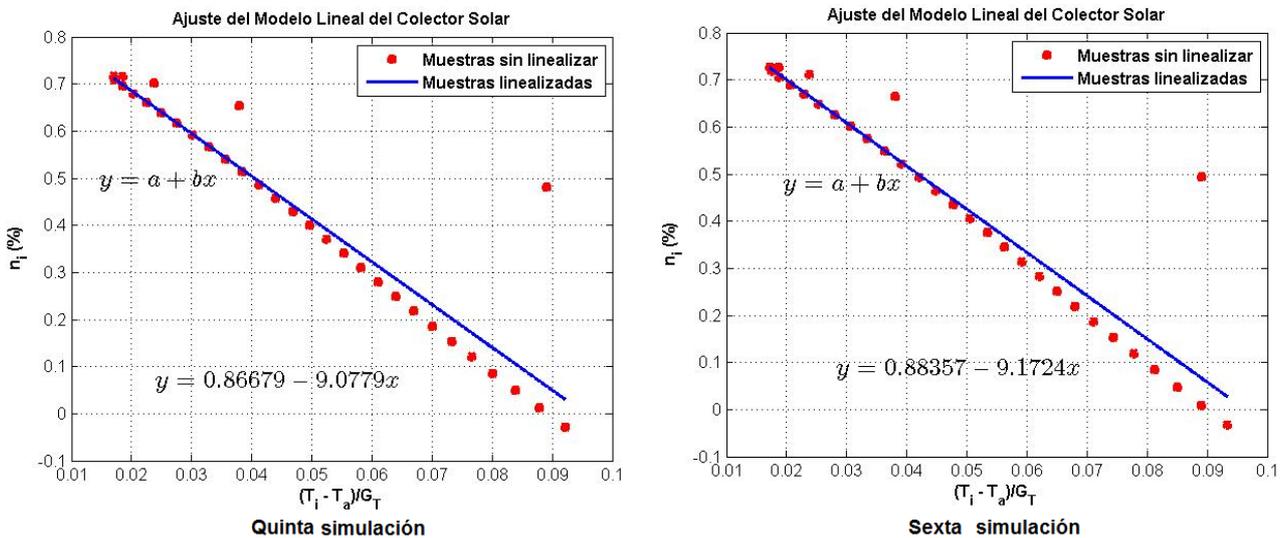


Fig. 6. Ajuste lineal del sistema correspondiente a la quinta y sexta simulación

En la séptima simulación se modificaron los parámetros constructivos en la placa absorbedora, utilizando aluminio, con fibra de vidrio como aislante los demás parámetros son iguales a los de la primera simulación, para estas condiciones el sistema alcanzó una eficiencia térmica de 44,5% durante el período de simulación, con un calor absorbido de 86,95% y pérdidas de energía de 9,02 W/(m²·°C), durante el período de evaluación.

El descenso de la eficiencia térmica se debe al cambio de placa y aislante.

En la octava simulación se modificó el aislante térmico, utilizándose celulosa, los demás parámetros constructivos son iguales a los de la primera simulación, para estas condiciones el sistema alcanzó una

eficiencia térmica de 43,9% durante el período de simulación con un calor absorbido de 87,75% y pérdidas energéticas de 9,29 W/ (m²·°C), durante el período de evaluación. El descenso de la eficiencia térmica y aumento en las pérdidas energéticas es debido al aislante térmico utilizado. Los resultados de la séptima y octava simulación se muestran en la figura 7.

Finalmente en la novena simulación realizada se utilizó una placa absorbedora de aluminio y celulosa como aislante térmico, los demás parámetros tanto medio ambientales como constructivos son iguales a los de la primera simulación, para estas condiciones el sistema alcanzó una eficiencia térmica de 43,6% durante el período de simulación, con un calor absorbido de 86,33% y pérdidas de energía de 9,14 W/(m²·°C), durante el período de evaluación. Los resultados de la novena simulación se muestran en la figura 8.

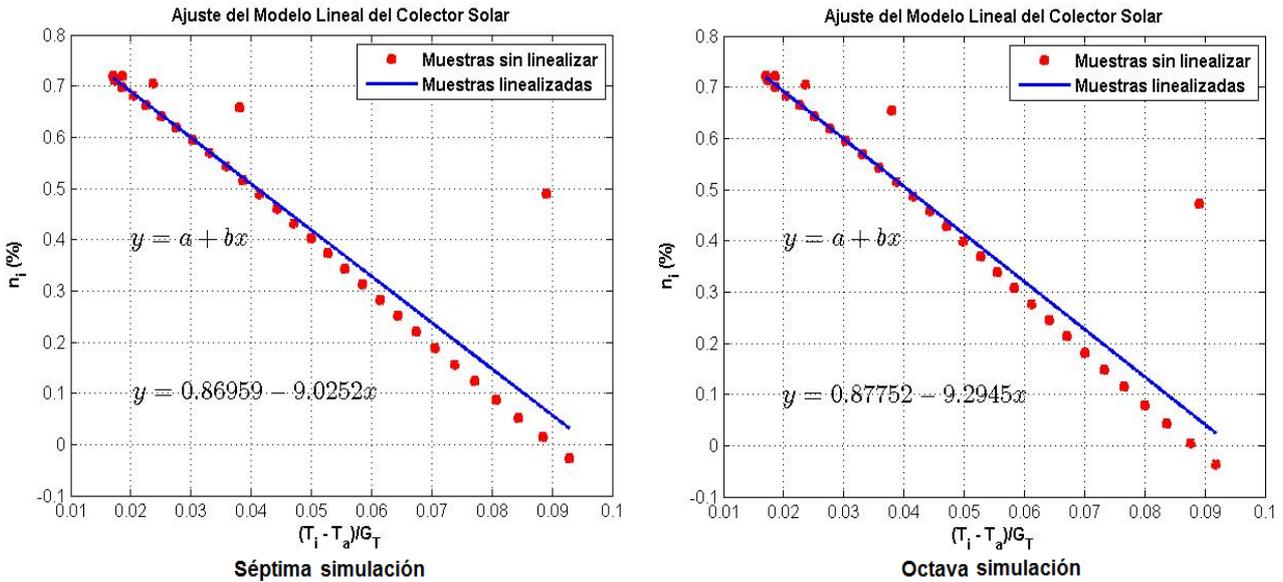


Fig.7. Ajuste lineal del sistema correspondiente a la séptima y octava simulación

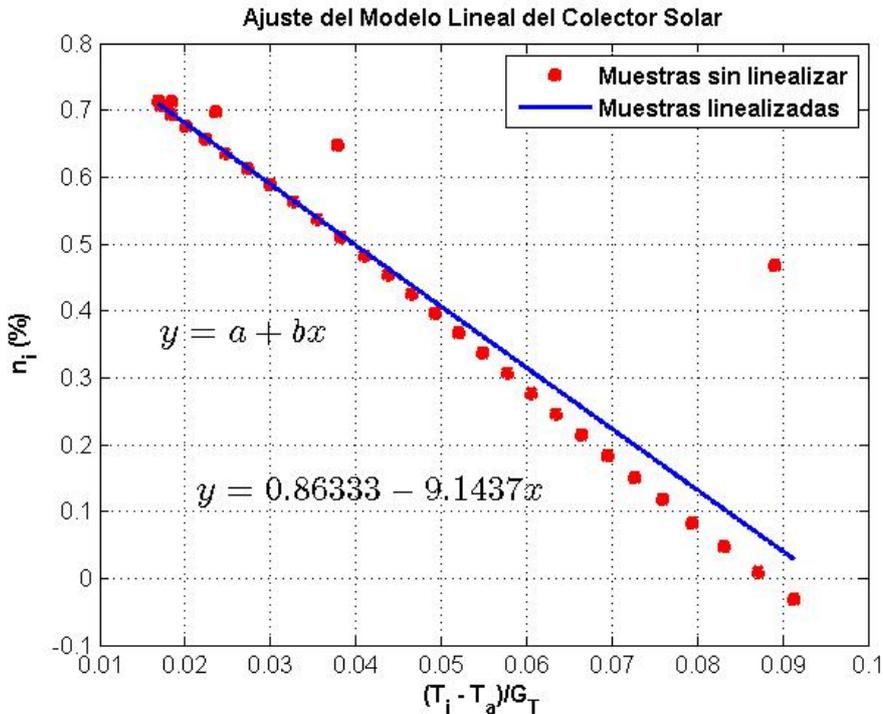


Fig.8. Ajuste lineal del sistema correspondiente a la novena simulación

En la tabla 2, se muestran los parámetros de mayor importancia para el diseño, considerando las combinaciones realizadas en cada simulación.

A partir de las simulaciones realizadas se puede observar que los materiales que mejor desempeño tienen en el colector solar son el cobre tanto para la placa absorbidora como para la tubería y para el aislante térmico el poliuretano, con estos materiales se alcanzan las temperaturas de salida del fluido más altas alrededor de 100°C, esto se debe a sus propiedades termodinámicas y las especificaciones de diseño. A partir de los datos obtenidos en la simulación de la operación del colector solar para las especificaciones de diseño seleccionadas se diseñó e instaló el colector solar que se muestra en la figura 9.

La selección del material dependerá del precio entre los dos materiales y el proceso de unión térmica entre la placa absorbidora y la tubería por donde el fluido de trabajo efectúa el mecanismo de transferencia de calor y el aislante térmico a seleccionar dependerá del costo entre cada uno de ellos y la facilidad de su colocación.

Tabla 2. Rendimientos del colector solar

Simulación	Eficiencia Térmica η (%)	Calor máximo q (%)	Pérdidas de energía U (W/m ² °C)	Temperatura de salida T_s (°C)
Placa de Cobre, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 3/4, Poliuretano	45,44	89,16	9,0039	103,23
Placa de Cobre, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 1/2, Poliuretano	45,44	89,16	9,0039	103,23
Placa de Aluminio, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 3/4, Poliuretano	45,13	87,82	8,86	02,83
Placa de Cobre, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 3/4, Polietileno	44,27	88,05	9,21	100,8
Placa de Aluminio, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 3/4, Poliestireno	43,95	86,67	9,07	100,39
Placa de Cobre, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 3/4, Fibra de Vidrio	44,55	88,3	9,17	101,36
Placa de Aluminio, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 3/4, Fibra de Vidrio	44,55	86,95	9,02	100,99
Placa de Cobre, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 3/4, Celulosa	43,9	87,75	9,29	100,02
Placa de Aluminio, Tubo de cobre 1/2, Cabezal cobre 3/4, Celulosa	43,6	86,33	9,14	99,64



Fig. 9. Colector solar

CONCLUSIONES

En el artículo se integra el uso de un software de diseño mecánico y un algoritmo de simulación de la operación de un colector solar de placa plana, con el objetivo de simplificar el proceso de diseño y manufactura.

El algoritmo de cálculo desarrollado para simular la operación del colector solar a diferentes consideraciones de materiales, satisface las expectativas ya que a partir de los valores obtenidos se logra seleccionar los materiales más adecuados, sus características y dimensiones siendo de gran utilidad al momento de realizar el diseño mecánico del colector, además se logra optimizar el proceso de diseño y facilitar la selección de los materiales.

Con el programa desarrollado se logra simular las condiciones ambientales típicas, además sirve apoyo para el diseño de colectores solares, agilizándose el análisis de costos en el proceso de manufactura del colector.

REFERENCIAS

- [1] de Winter F. Optimum Designs for Solar Water Heating Equipment for the Single Family Home. En: IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVIIISPES). Cusco, Perú. p. 7.
- [2] Hamidi ST, Mohamaad AF. Prediction of Thermal Characteristics For Solar Water Heater. Anbar Journal for Engineering Sciences. 2011 Nov. 2002.4(2):18-32. ISSN 1997-9428.
- [3] Patel K, et al. Review of solar water heating systems. International Journal of Advanced Engineering Technology. 2012 Oct.-Dec., 2012.III(IV):146-9. ISSN 0976-3945.
- [4] Park YC, Nhut LM. Performance prediction of a solar hot water system with change of circulating pump efficiency in solar collectors. Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ). 2013 March 2013.X(11):1-5. ISSN 2172-038.
- [5] Abu-Mulaweh HI. Design and development of solar water heating system experimental apparatus. Global Journal of Engineering Education. 2012 Jan. 2012.14(1):99-107.
- [6] Ávila Gómez AE, et al. Energy assessment of a double cover flat-plate solar collector. Ingeniería y Desarrollo. 2010 Jan./June 2010.(27):1-15. ISSN 2145-9371.
- [7] Cisneros Ramírez CA. Feasibility of the use of solar cooling of small capacity. Ingeniería Energética. 2014 may,-ago. 2014.35(2):92-100. ISSN 1815-5901.
- [8] del Moral Pelier CA, Sarmiento Sera A. Solar Collectors Orientation Influence on Solar Energy Capture. Ecosolar. 2006 Mar. 2006.16:21-30.
- [9] Duffie JA, Beckman WA. Solar Engineering of Thermal Processes. 4 ed 2013. p. 936. 936 p. ISBN 978-0-470-87366-3. [Citado Sept. 30, 2015] Disponible en: <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-0470873663.html>.
- [10] Menéndez Castellanos M. Posibilidades para el desarrollo de las fuentes renovables de energía. Cubasolar. 2009 Mar. 2009.47:31-40.
- [11] Sivakumar P, et al. Performance improvement study of solar water heating system. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2012 Jan. 2012.7(1):45-9. ISSN 1819-6608.
- [12] Seveda MS. Performance analysis of solar water heater in NEH region of India. International Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2013 May 30, 2013.2(3):93-8. DOI 10.11648/j.ijrse.20130203.13.

AUTORES

Jeovany Rafael Rodríguez Mejía

Graduado de Ingeniero Mecánico en 2012, de la Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco México. Actualmente estudiante de Maestría en la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

e-mail: ingrafaelrodriguez.rr@gmail.com

Francisco Eneldo López Monteagudo

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas,. Profesor titular de la Universidad Central de las Villas Actualmente es profesor-investigador Titular de la escuela de ingeniería eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

e-mail: eneldolm@yahoo.com

María Auxiliadora Araiza Esquivel

Dra., Graduada en Óptica de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Profesor investigador de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

e-mail: araizama@cantera.reduaz.mx

Carlos A. Olvera Olvera

Graduado en automatización en la Universidad Autónoma de Querétaro, México,Dr.. Profesor investigador de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.

e-mail: olveraca@gmail.com

Santiago A. Dorrbercker

Ingeniero Electricista Doctor en Ciencias Técnicas,. Investigador Auxiliar ,Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas, CIPEL, Facultad de Eectrica, Cujae.La Habana, Cuba.

e-mail: dorr@electrica.cujae.edu.cu