Análisis de un colector solar utilizando policarbonato alveolar para sistemas de calentamiento de agua de baja temperatura

Analysis of a solar collector using cellular alveolar polycarbonate for ecological and low temperature water heating systems

Jacqueline Almache-Almeida[1], Sebastián Andrade-Becerra[1], Alexander Ibarra-Jácome[2], Lenin Abatta-Jácome[3], Diego Arcos-Aviles[2]

[1] Carrera de Ingeniería Mecatrónica, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 1715-231B, Sangolquí, (Ecuador)

[2] Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 1715-231B, Sangolquí, Ecuador. Tfno: +593 2 3989400 ext. 1867. oaibarra@espe.edu.ec

[3] Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 1715-231B, Sangolquí, Ecuador

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/8767 | Recibido: 12/03/2018 • Inicio Evaluación: 16/03/2018 • Aceptado: 09/04/2018 • Publicado Online: 23/04/2018

ABSTRACT

- This article presents the analysis of a new alternative for ecological heaters based on alveolar polycarbonate with eight millimeters of thickness as a flat solar collector without cover. The analysis is developed in a simple system which comprises two solar collectors and an automatic data acquisition stage that periodically provides the meteorological and system data of one month. For determining the utility and applicability of this type of solar collector, a comparison with a black body polycarbonate is performed. The resulting experimental data allows carrying out an energetic comparative analysis with respect to a commercial solar collector without a cover.
- **Keywords:** Cellular polycarbonate; sola collector; ecological heater; energy efficiency, domestic hot water.

RESUMEN

En este artículo se describe el análisis de una nueva alternativa para calentadores ecológicos, mediante el uso de policarbonato alveolar con ocho milímetros de espesor como colector solar plano sin cubierta. El análisis se realizó a través de un sistema que consiste en dos colectores solares montados en una estructura con veinte grados de inclinación, y monitoreado por un sistema de adquisición automático de datos, que proporciona periódicamente información meteorológica y del sistema durante un mes. Dada la necesidad de comparar los resultados del policarbonato con un cuerpo negro, uno de los colectores fue pintado de color negro mate. Para demostrar la eficiencia del colector diseñado, se efectuó un análisis del rendimiento energético de los colectores y se realizó la comparación con un colector solar sin cubierta comercial.

Palabras clave: Policarbonato alveolar, colector solar, calentador ecológico, calentador de baja temperatura, rendimiento energético, agua caliente sanitaria.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía juega uno de los roles más importantes en la vida cotidiana de las personas en todo el mundo y en Ecuador no es la excepción, la mayoría de los hogares en todo el país utilizan duchas eléctricas o soluciones basadas en recursos no renovables (gas licuado de petróleo) para cubrir sus necesidades de consumo de agua caliente sanitaria (ACS). Esto ha aumentado el uso de combustibles fósiles y, por consiguiente, ha incrementado las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultantes de esta combustión (dióxido de carbono CO2) [1]. Al tener en cuenta el uso desproporcionado de energías no renovables específicamente para la producción mundial y local de ACS, se puede observar que el uso de fuentes de energía renovables (RES), específicamente relacionadas con la energía solar térmica, constituyen una solución adecuada para los requisitos de esta necesidad energética. Como consecuencia, el uso de RES ha incrementado en las últimas décadas, siendo la energía solar térmica una de las cinco fuentes de energía más prometedoras que ha logrado el mayor crecimiento con tasas anuales promedio del 12,3% desde 1990 [2].

La energía solar, especialmente energía fotovoltaica [3] y energía solar térmica [4], se puede utilizar de varias maneras. Ambos tipos de generación tienen diferentes aplicaciones en las actividades comunes de la sociedad. Por un lado, la energía fotovoltaica se utiliza para generar electricidad empleada en dispositivos cotidianos, por ejemplo, electrodomésticos. Por otro lado, la energía térmica, que concentra la luz solar y la convierte en calor que se transfiere a un fluido activo (aire, agua o aceite), se utiliza para proporcionar calefacción y ACS a la vivienda [5,6].

Una aplicación específica de la energía solar térmica es el colector solar térmico [7], que es un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la irradiancia solar en calor. Los colectores solares se clasifican generalmente en dos categorías de acuerdo con las relaciones de concentración [4]: colectores sin concentración y colectores con concentración. Un colector sin concentración tiene la misma área para captar y absorber la radiación solar, mientras que un colector solar con concentración y seguimiento solar generalmente tiene superficies reflectantes cóncavas para captar y enfocar la irradiación del rayo solar a un área de recepción más pequeña.

El colector plano es el tipo de colector sin concentración más común y se pueden diseñar para aplicaciones que requieren la entrega de energía a temperaturas moderadas [8]. Los principales usos de estas unidades son el calentamiento solar de agua para consumo de ACS, la construcción de sistemas de ventilación y aire acondicionado y procesos de calentamiento a nivel industrial [9]. Por lo tanto, este trabajo presenta una solución innovadora de un diseño de colector solar plano basado en policarbonato alveolar

de 8mm para ser utilizado para consumo de ACS. El policarbonato es un tipo de termoplástico ampliamente utilizado para la fabricación de cubiertas y techos de plástico en Ecuador debido a sus excelentes cualidades relacionadas con la durabilidad, resistencia y economía [10]. Tiene claras ventajas en comparación con otros materiales tradicionales y costosos, como el vidrio y el acero inoxidable. El policarbonato es un material que tiene una resistencia al impacto de aproximadamente 300 veces mayor que el vidrio y 30 veces mayor que el acrílico [11], es muy flexible y liviano ya que pesa un tercio menos que el acrílico y 16 veces menos que el vidrio [12] . Además, el policarbonato tiene una gran durabilidad y es capaz de manejar diferentes cambios climáticos, como el sol, el viento, la lluvia, el granizo y los rayos ultravioleta (UV). Tiene gran resistencia a altas temperaturas y deformación térmica y, puede preservar sus propiedades físicas y químicas en un rango de temperatura entre -40°C y 120°C [13].

La eficiencia del colector solar propuesto se estudia mediante el análisis térmico del material. La comparación con un colector solar comercial sin cubierta demostrará la efectividad del diseño propuesto. El diseño propuesto proporcionará una doble funcionalidad al policarbonato alveolar, por lo que, podría ser utilizado como techo o cubierta y como colector solar plano al mismo tiempo, lo que optimiza su instalación en entornos residenciales en Ecuador. Es necesario recalcar que en el área de construcción del Ecuador, las cubiertas de policarbonato se utilizan generalmente como techos para la protección de los rayos UV emitidos por el sol, sin embargo, la energía disipada por este material se desperdicia en su totalidad. Por lo tanto, este estudio busca emplear la energía solar absorbida por el policarbonato, que se convierte en energía térmica, para ser utilizada para el calentamiento de ACS requerida para el consumo de una vivienda, de esta manera, se aprovecha la instalación de este tipo de cubiertas y se da una alternativa al uso de energías convencionales.

La novedad de este estudio es aprovechar los techos o cubiertas de policarbonato que se encuentran ya instalados para calentar agua necesaria para consumo de ACS de una vivienda. Por un lado, dado que el sistema de ACS tiene la ventaja de ser construido en una instalación ya realizada, los costos de instalación se reducen. Por otro lado, dada la alta radiación solar que tiene Ecuador, el sistema de ACS reducirá los costos de operación con respecto a los sistemas de electricidad que se usan comúnmente en entornos residenciales para el calentamiento de agua. Finalmente, este diseño contribuirá a la reducción de las emisiones de GEI derivadas de la combustión de los sistemas de calentamiento basados en combustibles fósiles.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para determinar el comportamiento adecuado del sistema propuesto, es necesario encontrar su eficiencia, de modo que se pueda comparar con diferentes tipos de colectores y determinar su funcionalidad y utilidad. El diseño completo del colector propuesto se presenta a continuación.

2.1. DISEÑO DEL COLECTOR

El colector solar de policarbonato se ha diseñado sobre la base de una estructura de techo para darle un uso doble, es decir, para aprovechar la energía recibida por el techo para proteger a las personas del sol y para usarlo como colector térmico para el proceso de calentamiento de agua. Se construyeron dos diseños para comparar su rendimiento. El primer diseño es un colector solar basado en policarbonato en su estado original (color bronce) y el segundo diseño se consideró un policarbonato color negro mate. Ambos colectores se colocaron en la misma posición para realizar el análisis bajo las mismas condiciones climáticas y de control. Se incorporó al diseño un *Sistema de Adquisición de Datos* (DAQ) que proporciona datos de irradiancia, velocidad de flujo de agua, velocidad del viento, temperatura ambiente y temperatura de los colectores de entrada y salida.

Los colectores solares fueron diseñados de tal manera que se pueden comparar con otros tipos de calentadores solares. Por lo tanto, se diseñaron con un área de recepción estándar de 2m^2. Se debe tener en cuenta que dada la condición del sistema de estar prácticamente en el ecuador, la inclinación óptima es mínima. Sin embargo, los colectores solares están inclinados 20° de acuerdo con las condiciones típicas de una instalación de techo de policarbonato en el país.

El sistema consta de cuatro componentes principales: la estructura de soporte, colectores solares de policarbonato, dos acumuladores de agua caliente y un sistema de recirculación de agua que se encarga de suministrar y recircular el agua a través del colector.

2.1.1 Balance de Energía

Para encontrar la eficiencia de un colector solar, que determina la energía útil transmitida al fluido, se requiere el balance de energía. El cálculo del balance de energía [14] establece la energía útil del colector, Q_U, como la diferencia entre la energía solar absorbida (W), Q_{Abs}, y las pérdidas térmicas totales del colector (W), Q_P, de la siguiente manera:

$$Q_U = Q_{Abs} - Q_P \tag{1}$$

La eficiencia térmica del colector es un parámetro importante a considerar en su diseño, ya que crea la base para la comparación de diferentes diseños y materiales. La eficiencia térmica, η, se define como [15] [16]:

$$\eta = \frac{Q_U}{A_c \cdot G} \tag{2}$$

donde G es la radiación solar incidente a 0° de inclinación (W/m^2) y A_c es el área del colector solar (m^2). Se debe tener en cuenta que el denominador de (2) constituye la energía total recibida por el colector solar. Además, se debe considerar que la irradiancia solar en un plano inclinado se estima mediante el procedimiento descrito en [17] al considerar la irradiancia solar medida a 0°.

El balance de energía también puede expresarse mediante la ecuación de Bliss-Hotel-Whillier [18,19], de la siguiente manera:

$$Q_U = A_c \cdot F_R \left[G_T \cdot (\tau \cdot \alpha) \cdot K_T - U_L \cdot (T_m - T_a) \right] \tag{3}$$

donde G_T es la irradiancia solar para el cielo isotrópico (W/m^2) a 20° de inclinación; τ es la transmitancia térmica de la cubierta del colector (τ=1 para el colector solar sin cubierta); α es el coeficiente de absorción de policarbonato; K_T es el factor de sombreado [20]; U_L es el coeficiente de transferencia de calor [W/(m^2·K)]; T_m es la temperatura promedio del fluido (K); T_a es la temperatura ambiente (K); y, F_R es un factor (F_R=0.9375 para policarbonato color negro mate y F_R=1.459 para policarbonato color bronce), que relaciona la ganancia de energía útil real del colector con la ganancia útil

si toda la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido (factor de eliminación de calor del colector) [20]. Las pérdidas de energía térmica del colector pueden representarse como $U_L \cdot (T_m - T_a)$.

2.1.2 Cálculo del coeficiente global de pérdidas de calor

El coeficiente global de pérdidas de calor se define como [21]:

$$U_L = U_T + U_B \tag{4}$$

donde U_T y U_B son coeficientes de pérdida globales [W/(m²·K)] en la parte superior e inferior del colector, respectivamente.

El diagrama térmico del colector solar de policarbonato se muestra en la Figura 1(a). Debido a que se trata de un colector sin cubierta, las pérdidas de energía a través de la parte superior resultan por convección y radiación entre: la superficie superior y el ambiente, la superficie superior y su base, mientras que la pérdida de energía a través de la parte inferior resulta por convección y radiación entre la base y el medio ambiente. Además, el esquema de resistencias térmicas, del colector propuesto se muestra en la Figura 1(b). Por medio de ambas figuras se puede apreciar las pérdidas térmicas, ya sea por convección o radiación, que existen en el sistema.

donde $h_{r,c-a}$ y $h_{c,c-a}$ son coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección, respectivamente, entre la parte superior y el medio ambiente (W/m²·K); $h_{r,c-b}$ y $h_{c,c-b}$ son coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección, respectivamente, entre la parte superior e inferior (W/m²·K); $h_{r,b-a}$ y $h_{c,b-a}$ son coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección, respectivamente, entre el fondo y el medio ambiente (W/m²·K), V_w es la velocidad del viento (m/s); β es el ángulo de inclinación del policarbonato; T_1 es la temperatura de entrada del agua (°C); T_2 es la temperatura de salida del agua (°C); y, T_a es la temperatura ambiente (°C).

Así, el coeficiente de pérdidas global en la superficie superior del colector se define como [22]:

$$U_T = \frac{1}{R_1 + R_2} \tag{5}$$

donde las resistencias térmicas R_1 y R_2 (m²·K/W) se expresan en términos de los coeficientes de transferencia de calor entre la parte superior y el medio ambiente, mediante convección entre la parte superior y el medio ambiente, mediante radiación entre la parte superior e inferior, y por convección entre la parte superior e inferior, de la siguiente manera:

$$R_1 = \frac{1}{h_{r,c-a} + h_{c,c-a}} \tag{6}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{r,c-b} + h_{c,c-b}} \tag{7}$$

Por otro lado, el calor transferido a través de la convección y la radiación entre el fondo y el medio ambiente se define como:

$$U_B = \frac{1}{R_3} \tag{8}$$

donde R_3 es la resistencia térmica (m²·K/W) definida en términos de los coeficientes de transferencia de calor por radiación y convección entre el fondo y el medio ambiente, de la siguiente manera:

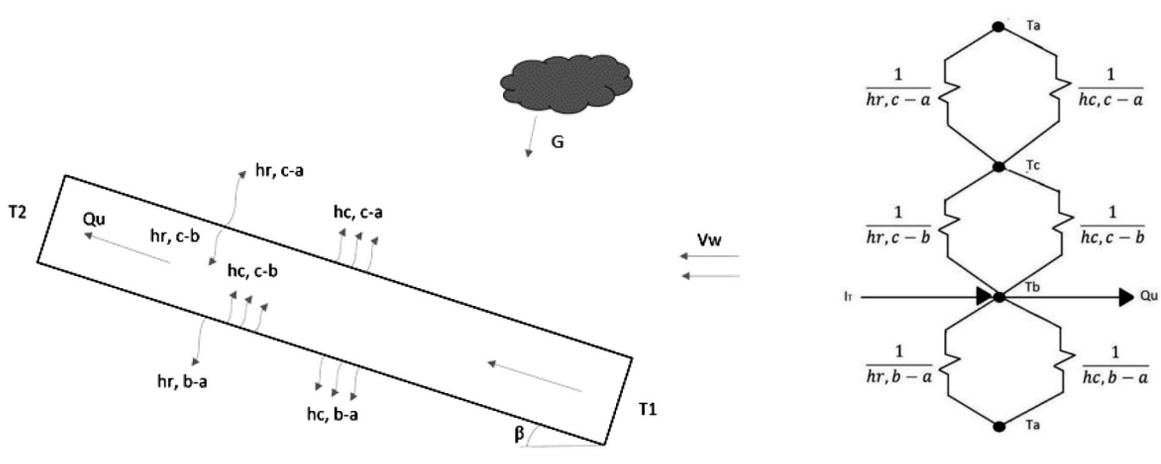
$$R_3 = \frac{1}{h_{r,b-a} + h_{c,b-a}} \tag{9}$$

Así, el coeficiente de transferencia de calor entre las superficies y el medio ambiente se calcula al considerar la constante de Boltzmann [W/(m²·K⁴)], k, la temperatura promedio entre las superficies y el entorno (K), $T_{m,x-a}$ y la emisividad de una superficie, ε_s, como sigue [23]:

$$h_{r,(s/b-a)} = 4 \cdot k \cdot \left[T_{m(c/b-a)} \right]^3 \cdot \varepsilon_s \tag{10}$$

Además, al considerar la emisividad del fondo, ε_b, el coeficiente de transferencia de calor entre la superficie y el fondo se define mediante [24]:

$$h_{r,s-b} = \frac{4 \cdot k \cdot \left[T_{m(c/b-a)} \right]^3}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \tag{11}$$



(a) *(b)*

Fig. 1. (a) Diagrama térmico del colector solar. (b) Resistencias térmicas del colector solar

Adicionalmente, según la ecuación de Watmuff [25], los coeficientes de transferencia de calor por convección entre la superficie/fondo y el medio ambiente (W/m^2·K) se calculan al tener en cuenta la velocidad del viento (m/s), V_w, de la siguiente manera:

$$h_{c,c-a} = 2.8 + 3 \cdot V_w \quad (12)$$

Tenga en cuenta que este estudio considera un valor medio de la velocidad del viento V_w=1.59 (m/s) para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor (superficie y fondo).

Finalmente, el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie y el fondo está dado por [26,27]:

$$h_{c,c-b} = \frac{Nu \cdot k_T}{DH} \quad (13)$$

donde N_u es el número de Nusselt, k_T es la conductividad térmica del fluido (W/m·K) [28], y DH es el diámetro hidráulico (m), definido por [29]:

$$DH = \frac{4 \cdot A_R}{P_R} \quad (14)$$

donde A_R y P_R son el área y el perímetro de la sección de alveolo rectangular, respectivamente, al considerar un alveolo rectangular de 10.8×8.0 (mm) y un espesor de pared de policarbonato de 0.4mm.

2.2. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

La estructura del colector solar desarrollado basado en policarbonato alveolar se instaló en el techo del Laboratorio de

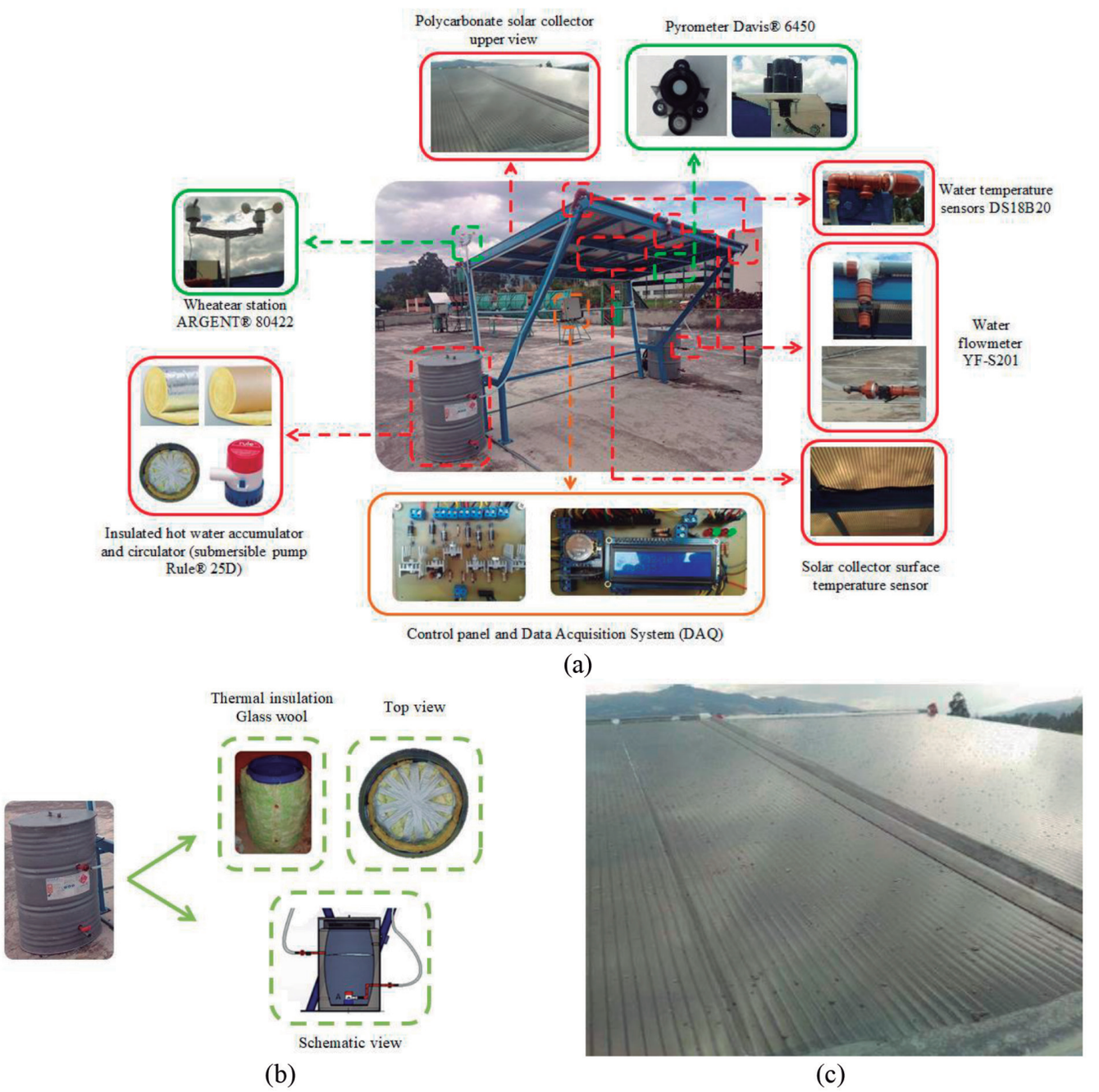


Fig. 2. (a) Sistema de colector solar de policarbonato propuesto. (b) Acumulador de agua caliente aislado. (c) Colector solar de policarbonato

Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Sangolquí, Ecuador: 0º18'48.56"S). El sistema del colector solar se presenta en la Figura 2(a).

Acumulador aislado de agua caliente y re-circulador de agua: El sistema de almacenamiento térmico consiste en un tanque de almacenamiento, que se encarga de almacenar, en forma de agua caliente, la energía térmica producida por el colector solar. El tanque de almacenamiento tiene varias conexiones para entrada y salida del fluido, así como tomas de corriente para dispositivos de medición de temperatura. Su volumen es de 50 l/m^2 y, debido a que el colector solar tiene un área de 2m^2, su capacidad total es de 100 litros. Estos tanques de almacenamiento están aislados térmicamente con lana de vidrio de 50mm de espesor, lo que ayuda a reducir las pérdidas de calor del fluido almacenado por su exposición a la intemperie. Para proteger el acumulador de las condiciones climáticas, se lo colocó dentro de un tanque de metal, como se observa en la Figura 2(b). Las bombas sumergibles RULE 25D se usaron como dispositivo recirculador para cada colector. Estas bombas están ubicadas dentro de los tanques de almacenamiento. La altura máxima de bombeo de estos dispositivos es de 3.7m y el caudal máximo es de 1817 l/h.

Colector solar de policarbonato: El colector solar fue diseñado con policarbonato alveolar de 8mm. Es un colector solar plano sin cubierta, es decir, no está aislado o cubierto por ninguna caja y/o vidrio, como se muestra en la Figura 2(c). El colector es responsable de captar el calor proveniente del sol y transferirlo al fluido de trabajo que circula dentro del colector. El colector ha sido diseñado con un área de captación estándar de 2m^2 posibilitando su comparación con otros tipos de colectores solares.

Pirómetro: El sistema utiliza un pirómetro Davis 6450 con las siguientes características: señal de salida de 0 a +3VDC y 1.67mA por W/m^2, rango de salida del sensor de 0 a 1800W/m^2, resolución de 1W/m^2 y precisión de ±5% a escala completa [30]. Se colocó a un lado de la estructura donde no recibió sombra y se ajustó en posición horizontal para medir la irradiación solar incidente a 0°.

Sensores de temperatura del agua: Los sensores de temperatura DS18B20 se instalaron en las entradas/salidas de agua del acumulador y en la superficie inferior del colector solar, como se muestra en la Figura 2(a). Este sensor tiene un rango de temperatura de -55°C a 125°C y una precisión de ±5°C.

Medidor de caudal de agua: Estos medidores permiten conocer el caudal del fluido caloportador. Este trabajo utiliza el medidor de flujo YF-S201, cuya instalación se realizó en línea con la tubería que transporta el agua desde el colector hasta el tanque de almacenamiento. Estos medidores tienen un flujo de operación de 1 a 30 l/m y una precisión de ±10%.

Estación meteorológica: La estación meteorológica ARGENT 80422 permite conocer las condiciones meteorológicas alrededor del colector solar. El anemómetro incluido en la estación mide la velocidad del viento en un rango de 0.5 a 60m/s con una precisión de ±5%.

Panel de control y sistema DAQ: El sistema DAQ se implementó en un microcontrolador Arduino Mega, ya que el experimento no requiere un tiempo de muestreo extremadamente rápido. Este microcontrolador es responsable de leer y almacenar los datos de los diversos sensores instalados en el sistema. Recopila los datos de diferentes variables: 13 variables de temperatura, 2 de flujo, 1 de humedad (sensor HTU21D), 1 de velocidad del viento y 1 de irradiancia. El DAQ recopila la información cada 5 segundos (periodo de muestreo) y luego obtiene su valor promedio cada 30 minutos. Estos valores promedio se almacenan en una memoria externa (micro SD, 2 GB), por medio de la creación de un archivo de texto que luego es transferido a una hoja de cálculo para su procesamiento. En este sentido, para almacenar los datos en tiempo real se utilizó el módulo RTC, que permite al sistema registrar los datos con la fecha y hora actual. Además, este módulo funciona como un temporizador, que proporciona al sistema la capacidad de trabajar durante períodos de tiempo específicos. Este módulo funciona independientemente del microcontrolador gracias a la batería que integra, es decir, en caso de que el sistema se apague, el módulo RTC mantiene los datos de fecha y hora constantemente. Este módulo utiliza una comunicación I2C.

Un video que describe la configuración del sistema, el procedimiento de implementación, equipamiento y su funcionamiento se puede encontrar en [31].

El experimento se llevó a cabo durante 15 días consecutivos en el momento de máxima radiación solar (de 9a.m. a 2p.m. en Ecuador), se recolectaron 3600 muestras/día para cada variable, con un total de 54.000 muestras/día para cada variable durante el experimento. Para el cálculo de los coeficientes de calor, las resistencias térmicas y el coeficiente de pérdidas global, se eligieron las propiedades ópticas del policarbonato que se encuentran en el material suplementario publicado en el enlace web del artículo.

3. RESULTADOS

Las eficiencias térmicas de ambos colectores analizados se calculan mediante (1) a (14) y al considerar las propiedades ópticas del policarbonato y los valores promedio de las diferentes variables obtenidos en un día (material suplementario publicado en el enlace web del artículo), se obtiene la eficiencia térmica resultante (η) de cada colector (Tabla I).

El análisis de ambos colectores se realizó durante 15 días en el mes de noviembre de 2015. La recirculación del fluido a través del sistema se realizó mediante un sistema de control de una bomba capaz de regular automáticamente el caudal del fluido de acuerdo

Descripción	Policarbonato color bronce	Policarbonato color negro mate
Eficiencia térmica	58 %	62 %
Reflectancia	4.72	4.0
Absortancia	58.24	96
Emisividad	73	96

Tabla I: Eficiencia térmica para cada colector

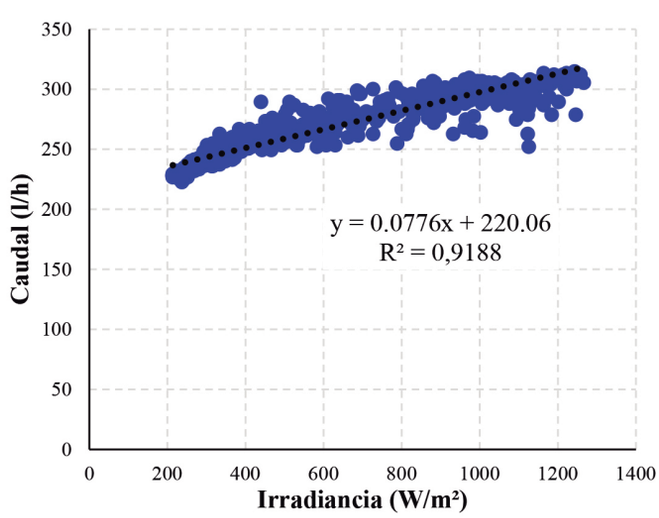


Fig. 3. Gráfico de Caudal vs Irradiancia

Día	Colector solar			
	Policarbonato color negro mate		Policarbonato color bronce	
	$(T_{mf}-T_a)/G$	η	$(T_{mf}-T_a)/G$	η
1	0.0106	60 %	0.0081	55 %
2	0.0145	51 %	0.0108	46 %
3	0.0126	52 %	0.0091	48 %
4	0.0095	61 %	0.0081	53 %
5	0.0123	53 %	0.0091	49 %
6	0.0146	53 %	0.0112	48 %
7	0.0113	56 %	0.0095	48 %
8	0.0086	62 %	0.0076	54 %
9	0.0111	56 %	0.0079	52 %
10	0.0077	67 %	0.0042	65 %
11	0.0082	61 %	0.0062	56 %
12	0.0121	53 %	0.0098	45 %
13	0.0131	54 %	0.0105	48 %
14	0.0121	55 %	0.0111	44 %
15	0.0113	59 %	0.0088	54 %

Tabla II: Comparación de eficiencia térmica durante un período de tiempo de 15 días para cada colector térmico

con el nivel de irradiación. La Figura 3 muestra la relación entre la irradiancia y el caudal obtenido a partir de los datos adquiridos.

La Tabla II presenta una comparación, durante 15 días, de la eficiencia térmica para los dos colectores diseñados. Esta eficiencia se obtiene a través del gráfico η vs $(T_{mf} - T_a)/G$, donde T_{mf} es la temperatura promedio del fluido y G es la irradiancia solar promedio. Estos valores se utilizaron para obtener, mediante regresión lineal, la expresión de la eficiencia térmica de cada colector.

Las líneas de tendencia y las expresiones que ajustan todos los puntos de eficiencia térmica de cada colector descrito en la Tabla II se muestran en la Figura 4(a) y la Figura 4(b), donde la pendiente de las líneas es $F_R \cdot U_L$ representa el coeficiente de pérdidas térmicas de cada colector. Se debe considerar que un valor más alto de la pendiente implica mayores pérdidas de calor del colector y, mientras la temperatura aumenta, la eficiencia térmica del colector disminuye. Además, otro valor importante en ambas figuras es la intersección de la línea con el eje de ordenadas (Y) que corresponde con $K \cdot F_R \cdot \tau \cdot \alpha$, donde $F_R \cdot \tau \cdot \alpha$ representa la eficacia óptica del colector o su eficiencia máxima al tener en cuenta que cuanto más cerca esté este valor de 1 el colector podría tener una mayor capacidad para absorber el calor del sol. En este estudio se considera una constante K=0,9 (coeficiente de sombreado), ya que es el valor aproximado indicado por las hojas técnicas de los fabricantes del policarbonato [32].

La ecuación de ajuste de los colectores de policarbonato color negro mate y color bronce se define por (15) y (16) respectivamente, de la siguiente manera:

$$\eta = -21.209\left(\frac{T_{mf}-T_a}{G}\right)+0.81, \quad (15)$$

$$\eta = -28.88\left(\frac{T_{mf}-T_a}{G}\right)+0.765, \quad (16)$$

Donde el valor de 0.8401 corresponde al coeficiente de correlación para el colector color negro mate y el valor 0.8631

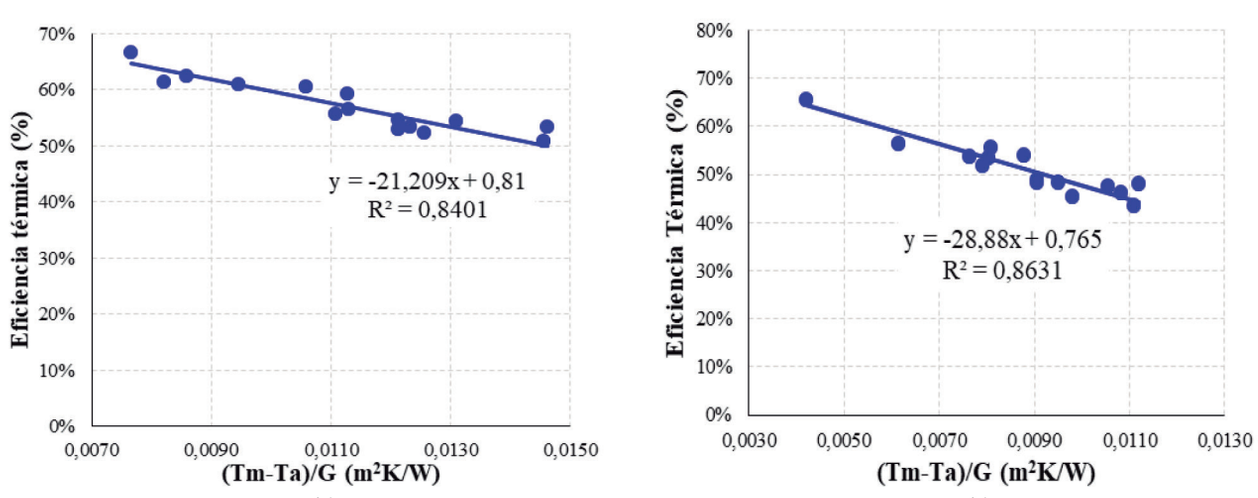


Fig. 4. Diagrama de dispersión de: (a) colector de policarbonato color negro mate y (b) colector de policarbonato color bronce

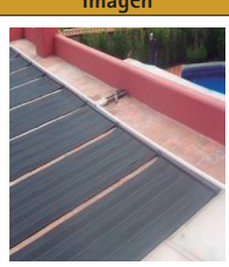
Descripción	Valor	Imagen
Tipo de construcción	Sin cubierta	
Área de captación	3,25 m²	
Temperatura máxima	34 °C	
Caudal	300-400 l/h/m²	
Ecuación de eficiencia	$\eta = -39.04\left(\frac{T_{mf}-T_a}{G}\right)+0.82$	
Material	Polipropileno	

Tabla III: Características técnicas del colector solar ECOSUN

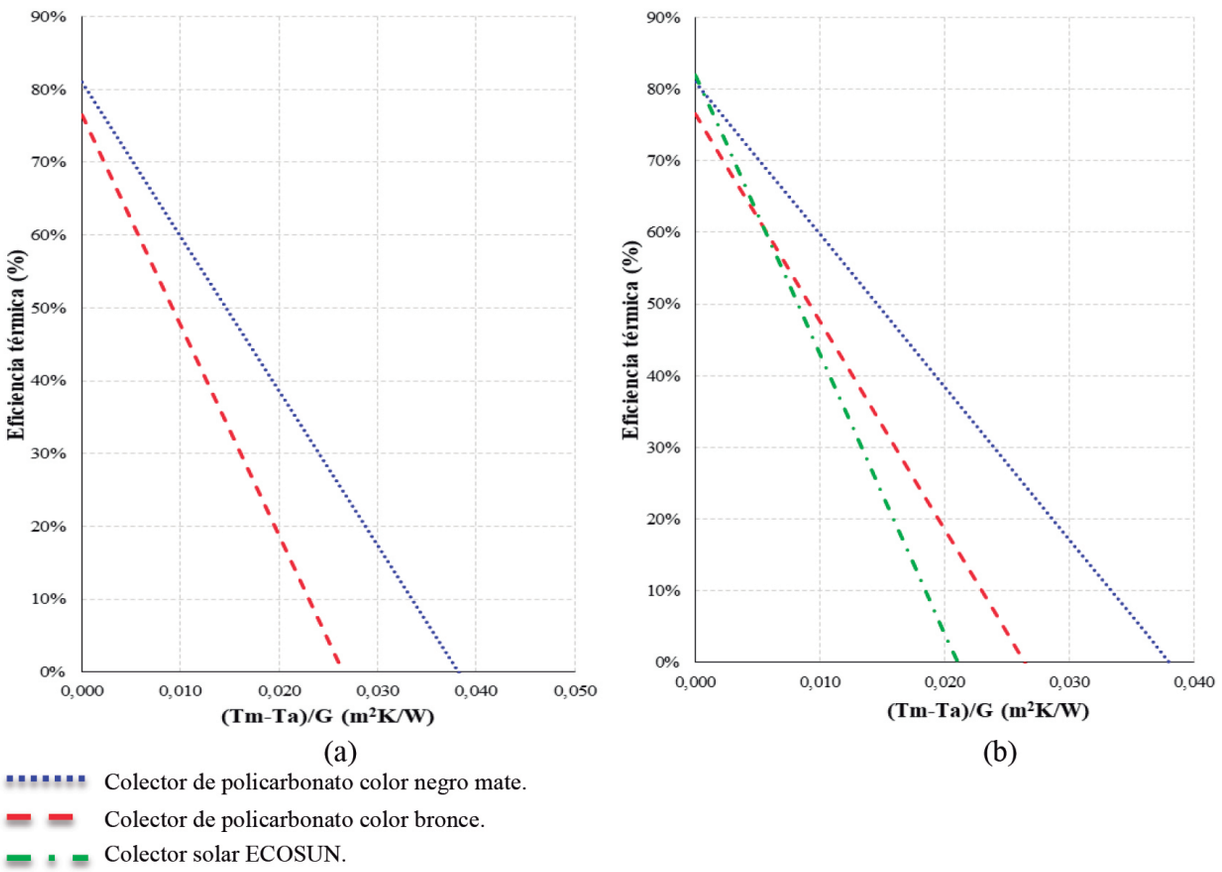


Fig. 5. (a) Diagrama de eficiencia térmica para los colectores solares de policarbonato diseñados. (b) Gráfico comparativo de eficiencia térmica con un colector comercial

corresponde al coeficiente de correlación para el colector color bronce.

4. DISCUSIÓN

La mayor eficiencia del colector solar de policarbonato color negro mate se evidencia en la Figura 5(a), donde el decaimiento de la línea (línea punteada) es menor en comparación con el colector solar de policarbonato color bronce (línea discontinua). En este sentido, la máxima eficiencia térmica alcanzada por el colector negro mate es del 81% (76,5% para el colector color bronce). Este aumento está relacionado con las propiedades ópticas del material y la mayor capacidad de absorber calor del cuerpo negro. Los valores máximos de temperatura del fluido durante el mes de noviembre de 2015 para diferentes valores diarios de irradiancia solar se los puede encontrar en el material suplementario publicado en el enlace web del artículo.

Además, para destacar el comportamiento adecuado de los colectores solares diseñados se realizó la comparación con un colector comercial con las similares características que los diseñados, es decir, se comparó con un colector sin cubierta. Se escogió el colector solar térmico sin cubierta ECOSUN, ya que posee características similares a las de los colectores diseñados. La Tabla III presenta las principales características de este colector son [33].

La Figura 5(b) muestra un gráfico comparativo de la eficiencia térmica para el colector solar ECOSUN y los colectores solares de policarbonato analizados.

Como se muestra en la Figura 5(b), el colector ECOSUN presenta la eficiencia térmica más baja con un coeficiente de pérdida de 39.04. Además, se puede observar que el colector más eficiente es el colector de policarbonato color negro mate con un coeficiente de pérdida de 21.209. Se puede apreciar adicionalmente que el colector de polipropileno ECOSUN tiene una eficiencia menor que los colectores solares de policarbonato alveolar diseñados. Por lo tanto, ambos colectores diseñados podrían considerarse una solución adecuada para esta aplicación, dada su superioridad en términos de coeficiente de pérdida y eficiencia óptica.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo ha proporcionado un diseño alternativo de un colector solar térmico a ser utilizado para consumo de ACS. El sistema térmico fue diseñado para usarse simultáneamente como techo o cubierta y como colector solar plano, optimizando de esta manera su instalación en entornos residenciales en Ecuador. El colector solar propuesto ha sido diseñado para realizar el calentamiento adecuado de 100 litros de agua por día a través de un sistema de circulación forzada con una bomba sumergible. El análisis experimental se desarrolló durante 15 días consecutivos, con un tiempo de adquisición de 5 segundos de 9a.m. a 2p.m. hora de Ecuador, se recolectaron 3600 muestras/día para cada una de las variables, con un total de 54,000 muestras/día para cada variable durante el experimento. El análisis comparativo entre colectores solares de policarbonato color negro mate y color bronce ha puesto de relieve la mayor eficiencia térmica del colector solar color negro mate que alcanza una temperatura máxima del agua de 46.72°C y una eficiencia térmica máxima del 81% mientras que el colector de policarbonato color bronce alcanzó un máximo temperatura de 44.40°C y una eficiencia térmica máxima de 76.5%. Una comparación con un colector solar comercial ha demostrado la efectividad del diseño propuesto logrando un menor

coeficiente de pérdida de 21.209 para el colector de color negro mate (28.88 para el policarbonato color bronce) con respecto al 39.04 presentado por el colector solar comercial.

BIBLIOGRAFÍA

[1] International Energy Agency. CO2 Emissions from Fuel Combustion Highlights. IEA Stat 2015:1–15. doi: https://doi.org/10.1787/co2-table-2011-1-en.
[2] International Energy Agency. Excerpt from Renewables Information (2015 Edition) 2015:1–8.
[3] Aman MM, Solangi KH, Hossain MS, Badarudin A, Jasmon GB, Mokhlis H, et al. A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. Renew Sustain Energy Rev 2015;41:1190–204. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.086.
[4] Tian Y, Zhao CY. A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. Appl Energy 2013;104:538–53. doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051.
[5] Arcos-Aviles D, Sotomayor D, Proano JL, Guinjoan F, Marietta MP, Pascual J, et al. Fuzzy energy management strategy based on microgrid energy rate-of-change applied to an electro-thermal residential microgrid. 2017 IEEE 26th Int. Symp. Ind. Electron., Edinburg, Scotland, UK: IEEE; 2017, p. 99–105. doi: https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001230.
[6] Pascual J, Sanchis P, Marroyo L. Implementation and Control of a Residential Electrothermal Microgrid Based on Renewable Energies, a Hybrid Storage System and Demand Side Management. Energies 2014;7:210–37. doi: https://doi.org/10.3390/en7010210.
[7] Atia DM, Fahmy FH, Ahmed NM, Dorrah HT. Optimal sizing of a solar water heating system based on a genetic algorithm for an aquaculture system. Math Comput Model 2012;55:1436–49. doi: https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.022.
[8] Schütz T, Streblow R, Müller D. A comparison of thermal energy storage models for building energy system optimization. Energy Build 2015;93:23–31. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.031.
[9] Duffie JA, Beckman WA. Flat-Plate Collectors. Sol. Eng. Therm. Process. 4th ed., Hoboken, NJ, EEUU: John Wiley & Sons, Inc.; 2014, p. 236–65.
[10] Pérez JM, Vilas JL, Laza JM, Arnáiz S, Mijangos F, Bilbao E, et al. Effect of reprocessing and accelerated ageing on thermal and mechanical polycarbonate properties. J Mater Process Technol 2010;210:727–33. doi: https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.12.009.
[11] Hwang DK, Moon JH, Shul YG, Jung KT, Kim DH, Lee DW. Scratch Resistant and Transparent UV-Protective Coating on Polycarbonate. J Sol-Gel Sci Technol 2003;26:783–7. doi: https://doi.org/10.1023/A:1020774927773.
[12] Slaman M, Griessen R. Solar collector overheating protection. Sol Energy 2009;83:982–7. doi: https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.01.001.
[13] Balakrishnan S, Neelakantan NR. Mechanical properties of blends of polycarbonate with unmodified and maleic anhydride grafted ABS. Polym Int 1998;45:347–52. doi: https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0126(199804)45:43.0.CO;2-R.
[14] Rodríguez-Hidalgo MC, Rodríguez-Aumente PA, Lecuona A, Gutiérrez-Urueta GL, Ventas R. Flat plate thermal solar collector efficiency: Transient behavior under working conditions. Part I: Model description and experimental validation. Appl Therm Eng 2011;31:2394–404. doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.04.003.
[15] Ceylan I. Energy and exergy analyses of a temperature controlled solar water heater. Energy Build 2012;47:630–5. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.040.
[16] Cozzini M, Pipiciello M, Fedrizzi R, Hassine I Ben, Pietruschka D, Söll R. Performance Analysis of a Flat Plate Solar Field for Process Heat. Energy Procedia 2016;91:11–9. doi: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.164.
[17] Lorenzo E. Energy Collected and Delivered by PV Modules. In: Luque A, Hegedus S, editors. Handb. Photovolt. Sci. Eng., Chichester, UK, UK: John Wiley & Sons, Ltd; 2011, p. 984–1042. doi: https://doi.org/10.1002/9780470974704.ch22.
[18] Ko M. Analysis and Optimization Design of a Solar Water Heating System Based on Life Cycle Cost Using a Genetic Algorithm. Energies 2015;8:11380–403. doi: https://doi.org/10.3390/en81011380.
[19] O'Hegarty R, Kinnane O, McCormack S. Efficiency Analysis of Flat Plate Collectors for Building Façade Integration. CISBAT 2015 Int. Conf. "Future Build. Dist. - Sustain. from Nano to Urban Scale, Lausanne, Switzerland: 2015, p. 735–40.
[20] Duffie JA, Beckman WA. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. New Jersey, NJ, USA: 2013.
[21] Klein SA. Calculation of flat-plate collector loss coefficients. Sol Energy 1975;17:79–80. doi: https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90020-1.
[22] Agarwal VK. Convective heat losses in flat-plate collectors. Int J Energy Res 1984;8:297–301. doi: https://doi.org/10.1002/er.4440080312.
[23] Raja Sekhar Y, Sharma K V., Basaveswara Rao M. Evaluation of Heat Loss Coefficients in Solar. ARPN J Eng Appl Sci 2009;4:15–9.
[24] Agbo SN, Chijioke Okoroigwe E. Analysis of Thermal Losses in the Flat-Plate Collector of a Thermosyphon Solar Water Heater. Res J Phys 2007;1:35–41. doi: https://doi.org/10.3923/rjp.2007.35.41.
[25] Watmuff, J. H., Charters, W. W. S., Proctor D. Solar and wind induced external coefficients - Solar collectors. Coop Mediterr Pour l'Energie Solaire, Rev Int d'Heliotechnique 1977:56.
[26] Ziapour BM, Aghamiri A. Simulation of an enhanced integrated collector–storage solar water heater. Energy Convers Manag 2014;78:193–203. doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.068.
[27] Akhtar N, Mullick S. Computation of glass-cover temperatures and top heat loss coefficient of flat-plate solar collectors with double glazing. Energy 2007;32:1067–74. doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.007.
[28] Dagdougui H, Ouammi A, Robba M, Sacile R. Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector: Application to Tétouan (Morocco). Renew Sustain Energy Rev 2011;15:630–8. doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.010.
[29] Helio Confort. Silvasol 2007. http://www.helioconfort.com/catalogos/CATALOGO TERMICO.pdf (accessed March 4, 2018).
[30] Davis. Solar Radiation Sensor (6450) 2010:1–2. https://www.davisnet.com/support/solar-radiation-sensor-6450/ (accessed March 4, 2018).
[31] Almache J, Andrade S. Cellular polycarbonate solar collector 2016. https://www.youtube.com/watch?time_continue=137&v=-kbIrBssgaw (accessed April 4, 2018).
[32] Aislux. Ficha técnica Policarb-Policomp-Arcoplus 2011:8–15. http://www.aisluxgalicia.com/cms/wp-content/uploads/2014/09/Ficha-t%E9cnica-Policarb-Policomp-Arcoplus.pdf (accessed March 4, 2018).
[33] ECOSUN. Calentadores solares para albercas n.d. http://www.modulosolar.com.mx/ECOSUN/ (accessed January 5, 2018).

AGRADECIMENTOS

Este trabajo es parte del proyecto 2016-PIC-044 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Un agradecimiento especial al Laboratorio de Energías Renovables del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, especialmente al Profesor José Guasumba.

MATERIAL SUPLEMENTARIO

https://www.revistadyna.com/documentos/pdfs/_adic/8767-1.pdf