



---

# MÓDULO DE APROVECHAMIENTO SOLAR PARA GENERACIÓN DE AIRE CALIENTE

*Solar-powered hot air generation module*

*Módulo de aproveitamento solar para geração do ar quente*

---

Miguel Angel Caraballo<sup>1</sup>, Darwin Tapia<sup>1</sup>, Byron Solorzano<sup>1</sup> & José Cuenca<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Energía, Industrias y Recursos Naturales no Renovables. Universidad Nacional de Loja. Loja-Ecuador. Correo: [miguel.caraballo@unl.edu.ec](mailto:miguel.caraballo@unl.edu.ec), [darwin.tapia@unl.edu.ec](mailto:darwin.tapia@unl.edu.ec), [byron.solorzano@unl.edu.ec](mailto:byron.solorzano@unl.edu.ec), [jose.cuenca@unl.edu.ec](mailto:jose.cuenca@unl.edu.ec)

Fecha de recepción: 22 de abril de 2021.  
Fecha de aceptación: 27 de julio de 2021.

## RESUMEN

**INTRODUCCIÓN:** Se aborda la problemática de confirmar resultados experimentales a través de un modelo matemático que permita predecir el comportamiento de variables térmicas, en un módulo de aprovechamiento solar para la generación de aire caliente. **OBJETIVO:** Desarrollar un modelo matemático que describa los procesos internos de intercambio de calor en un colector solar de placas planas. **MÉTODO:** La investigación se realiza bajo el doble enfoque: teórico y experimental. Se procede a la medición de los principales parámetros de funcionamiento del colector solar de placas planas, la elaboración del modelo matemático y la realización del balance térmico. **RESULTADOS:** Utilizando el recurso Guide de MATLAB, se programó una aplicación para la ejecución del modelo matemático, estableciéndose las constantes que corresponde a datos geométricos del módulo solar y del ducto, características del aislante y condiciones térmicas de radiación de los materiales utilizados. Finalmente, definidos los datos de entrada, se realizan las iteraciones correspondientes y se obtienen los resultados de cálculo, los ajustes de temperaturas se realizaron con una divergencia inferior al 1%. **DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES:** El error promedio que representaría el desfase entre el modelo propuesto respecto a los parámetros reales de funcionamiento, fue de un 2,55%, aceptables desde el punto de vista estadístico. Se confirman resultados de investigaciones precedentes en cuanto a buenos rendimientos para un caudal másico de 0,0204 kg/s. Se logró la evaluación de un módulo del aprovechamiento solar para la generación de aire caliente que posee enormes potencialidades para la calefacción de viviendas de la región sierra ecuatoriana.

**Palabras claves:** colector solar, modelo matemático, balance térmico, intercambio de calor, calefacción de viviendas.





## ABSTRACT

**INTRODUCTION:** The paper discusses the verification of the experimental results of a solar-powered hot air generation module using a mathematical model that predicts the behavior of thermal variables. **OBJECTIVE:** To develop a mathematical model that describes the internal heat exchange processes in a flat plate solar collector. **METHOD:** The research employs a two-pronged approach: theoretical and experimental. The main operating parameters of the flat plate solar collector are measured, and a mathematical model and a heat balance are performed. **RESULTS:** MATLAB GUIDE is used to program an application for the implementation of the mathematical model. The constants corresponding to the geometrical data of the solar module and the duct, the insulator characteristics, and the thermal radiation conditions of the materials used are determined. Finally, after defining the input data, the corresponding iterations are carried out, and the calculation results are obtained. Temperature adjustments are made with a deviation of less than 1%. **DISCUSSION AND CONCLUSIONS:** The average error representing the difference between the proposed model response and the actual operating parameters is 2.55 percent, which is statistically acceptable. Previous research findings confirm a good performance for a mass flow rate of 0.0204 kg/s. The evaluation of a solar-powered hot air generation module, which has enormous potential for heating houses in the Ecuadorian Sierra, is performed.

**Keywords:** solar collector, flat-plate collector, mathematical model, heat balance, heat exchange, heating.

## RESUMO

**INTRODUÇÃO:** O problema de confirmação de resultados experimentais é abordado por meio de um modelo matemático que permite prever o comportamento de variáveis térmicas, em um módulo de aproveitamento solar para geração de ar quente. **OBJETIVO:** Desenvolver um modelo matemático que descreva os processos internos de troca de calor em um coletor solar de placa plana. **MÉTODO:** A pesquisa é desenvolvida sob uma dupla abordagem: teórica e experimental. Os principais parâmetros de funcionamento do coletor solar de placa plana são medidos, o modelo matemático é elaborado e o balanço térmico é realizado. **RESULTADOS:** Utilizando o recurso Guia MATLAB, foi programado um aplicativo para executar o modelo matemático, estabelecendo as constantes que correspondem aos dados geométricos do módulo solar e do duto, características do isolamento e condições de radiação térmica dos materiais utilizados. Por fim, definidos os dados de entrada, efetuam-se as iterações correspondentes e obtêm-se os resultados dos cálculos, efetuando-se os ajustes de temperatura com uma divergência inferior a 1%. **DISCUSSÃO E CONCLUSÕES:** O erro médio que representaria o descasamento entre o modelo proposto em relação aos parâmetros operacionais reais foi de 2,55%, aceitável do ponto de vista estatístico. Resultados de pesquisas anteriores são confirmados como bons desempenhos para uma taxa de fluxo de massa de 0,0204 kg / s. Logrose a avaliação de um módulo de aproveitamento solar para geração do ar quente, com enorme potencial para aquecimento de residências no planalto equatoriano.

**Palavras-chave:** coletor solar, modelo matemático, balanço térmico, troca de calor, aquecimento doméstico.

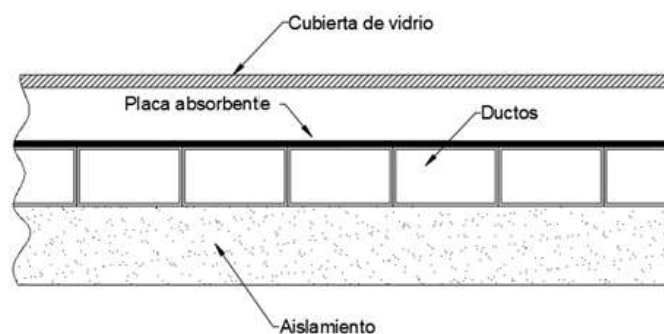
## INTRODUCCIÓN

La investigación que se presenta forma parte de un Proyecto de Investigación en desarrollo en la Universidad Nacional de Loja, una de sus líneas de trabajo es el aprovechamiento de la energía solar térmica.



Entre las fuentes de energía renovable, la energía solar térmica se destaca por ser una tecnología viable y factible en diversos usos domésticos, industriales y en aplicaciones tecnológicas [1]. Por otra parte, el creciente desarrollo humano en todos los ámbitos, y la necesidad cada vez mayor de satisfacer necesidades cotidianas básicas que proporcionen confort y bienestar, exigen mayores requerimientos energéticos, los cuales son cada vez más atendidos con el empleo de energías renovables. En este contexto, se ha considerado conveniente el empleo de la energía solar térmica en los procesos de calefacción, ya que puede ser utilizada directamente, no contamina el medio ambiente, es continua y libre [2].

Para el calentamiento del aire pueden ser utilizados los denominados módulos térmicos de aprovechamiento solar, o colectores solares, siendo muy común el empleo del colector solar de placa plana. Los colectores solares son un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía de la radiación solar en energía interna del medio de transporte [3]. Según este autor, para el caso de los colectores solares de placa plana, cuando la radiación solar atraviesa una cubierta de vidrio transparente e incide en la placa absorbente o superficie ennegrecida para aumentar la capacidad de absorción, una gran parte de esta energía es absorbida por la placa y luego se transfiere al fluido que circula por los ductos. La parte inferior de la placa absorbente y los laterales de la carcasa deben estar bien aislados para reducir las pérdidas de calor. En la figura 1 se muestra una representación esquemática de una sección de este tipo de colector.



**Figura 1.** Representación esquemática de una sección de un colector solar de placas planas para calentamiento de aire (Fuente: Autores)

Numerosos trabajos de investigación han caracterizado los colectores solares de placas planas para calentamiento de aire, atendiendo a diversos enfoques. Quiñonez [2], realiza una investigación experimental de un calentador solar de aire de doble flujo en paralelo con placa absorbente corrugada en forma de V, que funciona por convección natural ubicado verticalmente para calefacción de viviendas. Logró alcanzar una temperatura máxima de salida del aire de 95,7°C para una intensidad solar de 758 W/m<sup>2</sup>, con una eficiencia promedio del colector es de 51,1%. Sin embargo, el flujo másico promedio para días soleados fue de 0,0094 kg/s, el cual es relativamente bajo si se tiene en cuenta que el tiempo unitario requerido para calentar 1 m<sup>3</sup> es de casi dos minutos; además, se encontró que el flujo másico es muy sensible a la velocidad y densidad del aire.



Por su parte (Chabane et al.) [4], realiza un estudio experimental de eficiencia térmica con varios caudales máscicos, encontrando que la mayor eficiencia se logra con un caudal máscico de 0,0202 kg/s. Los parámetros medidos fueron las temperaturas de entrada y salida del aire, la temperatura de la placa absorbente, y la radiación solar.

Una investigación muy interesante fue la realizada por (Alves et al.) [5], al desarrollar un modelo matemático basado en la teoría de conjuntos difusos para predecir rendimiento en un sistema de calentamiento solar de aire, comparando la eficiencia del colector con un calentador comercial. De similar manera, otro modelo matemático permite la optimización exergética del colector solar considerando como variables de entrada las condiciones de operación y parámetros geométricos; en este caso, la eficiencia exergética del colector se obtiene a partir de correlaciones, y a diferencia de otros métodos de optimización, este disminuye la irreversibilidad interna [6]. Ambos resultados muestran las potencialidades de uso de modelos matemáticos para caracterizar el rendimiento y predecir el comportamiento de diversos variables del colector.

En el trabajo de (Wu et al.) [7], se había realizado un análisis de las irreversibilidades asociadas a pérdidas por fricción y por transferencia de calor, al examinar las características de transferencia de exergía por convección forzada a través de un conducto con calor constante. (Bracamonte & Baritto) [8], encuentran que existen combinaciones de valores de relaciones de aspecto y flujos de masa, para los cuales la operación del colector es termodinámicamente óptima para números de flujo de masa elevados.

Se debe reconocer que, en el caso de colectores solares para calentamiento de aire por convección forzada, generalmente un incremento del flujo volumétrico se traduce en un incremento de las pérdidas por fricción, por lo que los procesos de diseño de colectores solares para calentamiento de aire deben atender la necesidad de incrementar las tasas de flujo de calor sin que esto signifique un incremento desproporcionado de las pérdidas por fricción [8].

(Ghaderian et al.) [9], realizan un análisis de exergía de un colector solar de aire, teniendo en cuenta sus parámetros geométricos y de operación, así como las condiciones climáticas. Encontró que las pérdidas de exergía podrían ser reducidas alterando las variables hasta alcanzar la máxima eficiencia, resultando significativo la apreciación de que el área del colector tiene el efecto mínimo tanto en la eficiencia térmica como en la eficiencia exergética, mientras que la energía solar incidente, la radiación, tiene el máximo efecto.

(Ávila et al.) [10], abordaron el estudio de la influencia de la relación de aspecto, razón entre la longitud y ancho de un colector de área constante, sobre la eficiencia térmica de un colector solar de placa plana que utiliza doble cubierta transparente para el calentamiento de aire. En general se encontró que, para un área constante del colector, la eficiencia térmica aumenta cuando la relación de aspecto aumenta.

Resumiendo, la literatura consultada hace énfasis en las potencialidades de los colectores solares de placas planas para el calentamiento del aire. En algunos casos se





logra, mediante modelos matemáticos, predecir la eficiencia y otros comportamientos teniendo en cuenta diversas variables de entradas. En otros casos, trabajos experimentales permiten evaluar criterios de funcionamiento práctico como temperatura, flujo másico, rendimiento, etc.; según sean las condiciones climáticas y de operación, y las características constructivas de los colectores.

Sin embargo, son escasos los estudios realizados bajo el doble enfoque teórico y experimental, en particular el desarrollo de modelos matemáticos que teóricamente describan los procesos internos de intercambio de calor en colectores solares de placas planas, y su posterior validación experimental.

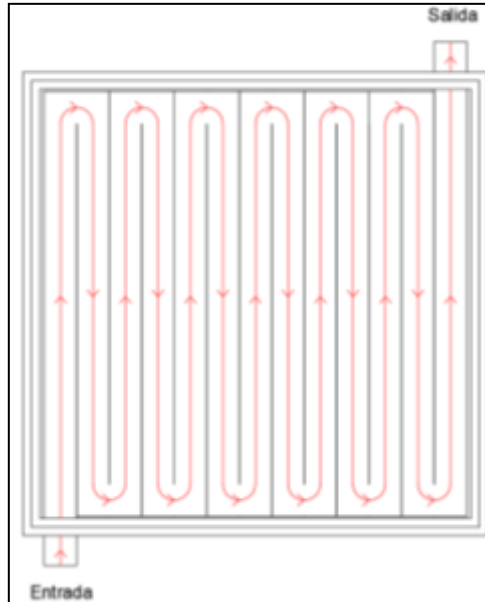
En la investigación que se presenta en este artículo, se afronta la problemática de evaluar el comportamiento de un módulo de aprovechamiento solar, teórica y experimentalmente, a fin de considerar su utilización para proporcionar bienestar y confort al interior de edificaciones y viviendas en procesos de calefacción. Para ello, se ha considerado como hipótesis que a la salida del colector se haya duplicado, como mínimo, la temperatura ambiente. Sin embargo, cabe la siguiente pregunta de investigación:

¿Será posible comprobar experimentalmente un modelo matemático que describa los procesos internos de intercambio de calor en un módulo de aprovechamiento solar de placas planas, de modo que se pueda predecir la temperatura de salida del aire en función de condiciones climáticas locales?

En tal sentido el objetivo que se pretende alcanzar es el siguiente: Desarrollar un modelo matemático que describa los procesos internos de intercambio de calor en un colector solar de placas planas.

La investigación se realiza utilizando un módulo de aprovechamiento solar que tiene las siguientes características: cubierta de vidrio, superficie absorbente con un área total de  $1 \text{ m}^2$ , compuesta por un conjunto de 13 ductos rectangulares de  $76,2 \text{ mm} \times 38,1 \text{ mm}$ , convenientemente dispuestos de modo que se asegure un flujo continuo de aire forzado que circula a una velocidad de  $7,2 \text{ m/s}$ , siguiendo una trayectoria en forma de serpentin como se muestra en la figura 2.



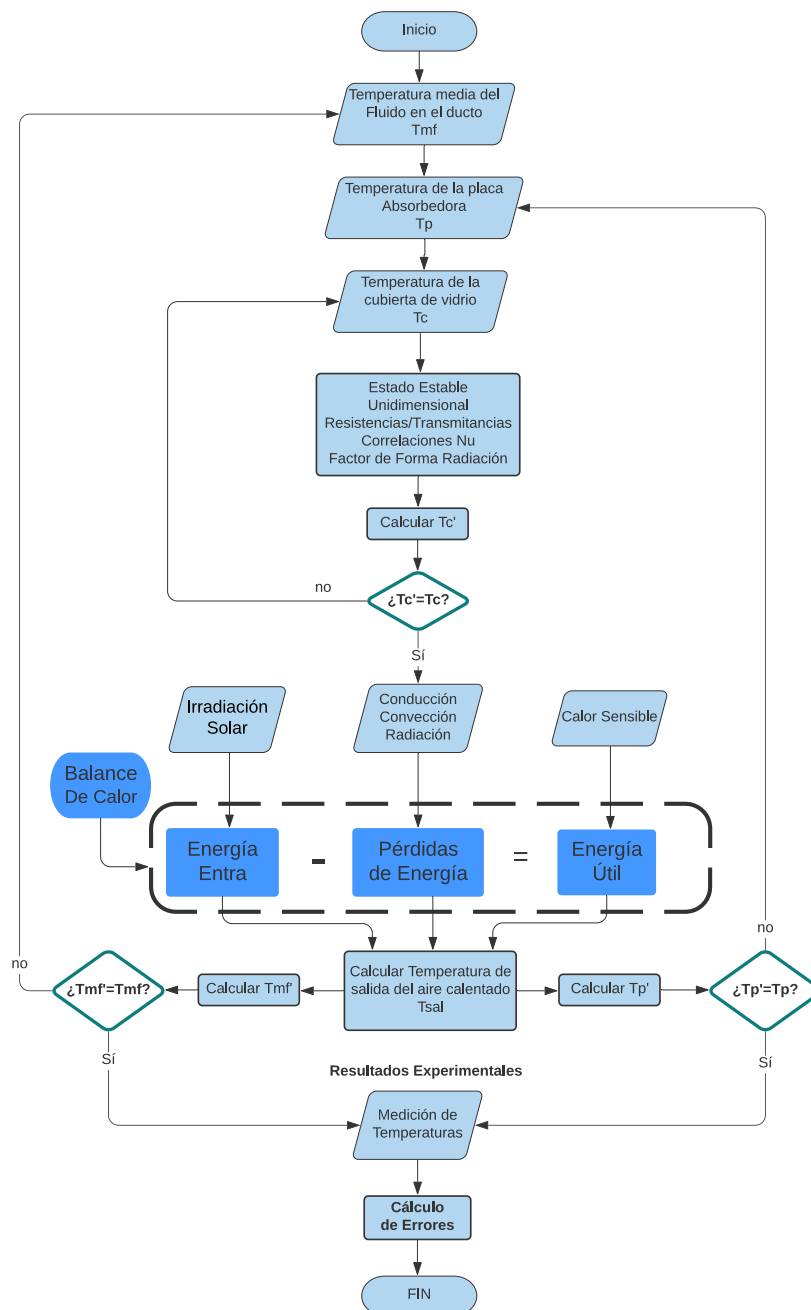


**Figura 2.** Trayectoria del flujo de aire a través de los ductos del colector (Fuente: Autores)

## MÉTODO

### Unidades de Medición/Muestras

Utilizando el módulo de aprovechamiento solar construido para la investigación, se procede a la medición de temperaturas en los puntos seleccionados, las cuales serán comparadas con las que se obtengan en el modelo matemático que ha sido desarrollado, a efectos de cálculo de errores. El resumen metodológico se muestra en la figura 3.



**Figura 3.** Resumen metodológico (Fuente: Autores)

### Normas éticas de investigación

La investigación no incluye animales ni seres humanos. Se refiere a un estudio teórico-experimental que permite caracterizar las potencialidades energéticas de un módulo de aprovechamiento solar para la generación de aire caliente, por lo cual la investigación no aplica en este punto.

### Instrumentos/Técnicas de recolección de datos

Los instrumentos utilizados en la investigación fueron: Contador de radiación solar marca PCE, modelo SPM1, con rango de medición de 0 a 2000 W/m<sup>2</sup>, resolución de 1 W/m<sup>2</sup> y precisión de  $\pm 10$  W/m<sup>2</sup> o  $\pm 5$  %; y, un termómetro YCT, modelo YC-737QD de 4 canales, con termocupla tipo K, rango de medición de -100 a 1300°C y resolución de 0,1°C.

Para la recolección de datos experimentales se procedió a medir cada 10 minutos: la temperatura ambiente, temperatura de la placa colectora, temperatura en la superficie del vidrio y temperatura a la salida del ducto del módulo de aprovechamiento solar; tal y como se muestra en la figura 4.



**Figura 4.** Recolección de datos de temperaturas en diferentes puntos del módulo (Fuente: Autores)

### Técnicas de análisis de datos

Se emplearon técnicas de análisis estadístico para determinar los valores promedios de temperatura en diferentes puntos del módulo de aprovechamiento solar, y la radiación solar promedio durante el procedimiento experimental. Para el modelo matemático se adoptan temperaturas iniciales de trabajo que luego se corrigen mediante iteraciones. Los resultados experimentales de medición de temperatura se contrastan con los resultados del modelo matemático, estableciéndose el error absoluto y relativo.

### Procedimiento

El proceso de la investigación inicia con el registro de la radiación solar como variable de entrada en la zona del experimento, y la determinación de las pérdidas de energía en el módulo de aprovechamiento solar considerando diversos factores, para finalmente establecer el valor de energía útil que se aprovecha en el módulo o colector solar. También se considera la temperatura ambiente de la locación escogida, y experimentalmente se determinan las temperaturas en diferentes puntos del colector. Las variables climáticas de la locación, en particular, irradiación solar y temperatura ambiente, son consideradas en el desarrollo del modelo matemático de predicción de la temperatura de salida del fluido.

### Modelo Matemático

El modelo matemático tiene su principio en el balance energético del módulo solar, la energía de entrada corresponde a la irradiación solar ( $S$ ), las pérdidas están

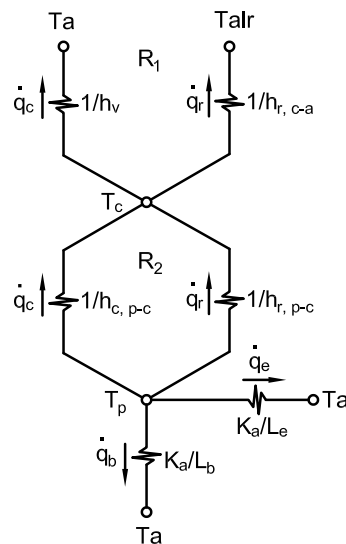


dadas por la transferencia de calor total ( $Q_p$ ) originada en la cubierta ( $Q_t$ ), paredes laterales ( $Q_e$ ) y superficie inferior ( $Q_b$ ); y, finalmente la energía de salida se considera en el calor sensible útil ( $Q_u$ ) ganado en el fluido por aumento de su temperatura desde que entra en el módulo hasta su salida (ecuación 1)

$$Q_u = S - (Q_t + Q_e + Q_b) \quad (1)$$

Las pérdidas de calor se representan mediante el circuito térmico equivalente (C.T.E) de la figura 5. Se adopta un circuito idealizado bajo las siguientes consideraciones:

1. Transferencia de calor unidimensional en estado estacionario.
2. No se considera generación de calor Interna.
3. Se desprecia el calor almacenado por la estructura del módulo solar.
4. Fluido y estructuras homogéneas.



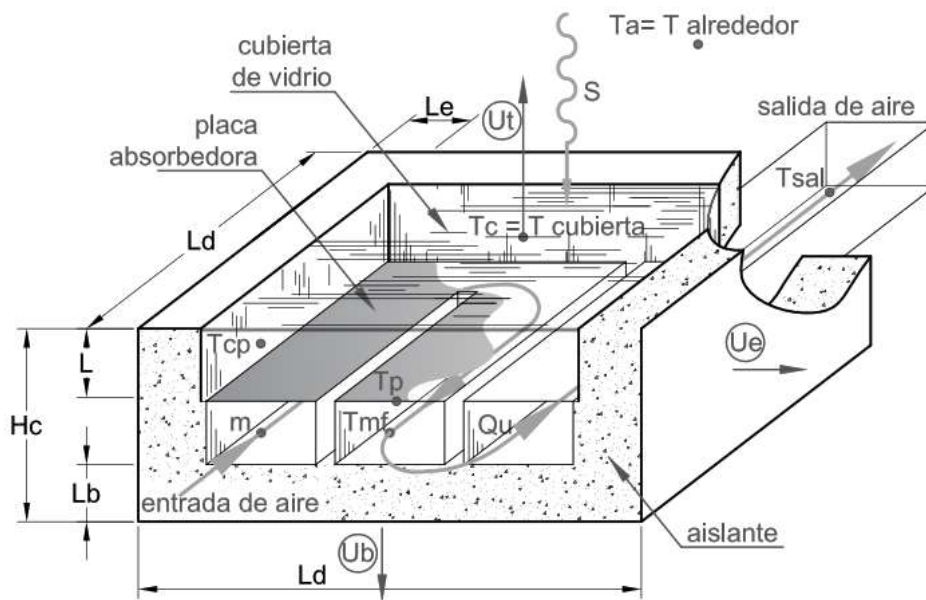
**Figura 5.** C.T.E. del módulo Solar (Fuente: Autores)

Las resistencias térmicas pueden ser representadas en función de los coeficientes globales de transferencia de calor, en las mismas direcciones que las pérdidas de calor evaluadas entre las temperaturas de la placa absorbidora ( $T_p$ ) y la temperatura ambiente ( $T_a$ ); por tanto, en correspondencia con la figura 6 que indica el esquema general geométrico del módulo solar, el balance energético del módulo solar queda definido en la ecuación (2).

$$Q_u = S A_c - (T_p - T_a)(A_c \times U_t + A_c \times U_b + P_c \times H_c \times U_e) \quad (2)$$

Donde:

- $A_c$ : Área de la cubierta del módulo, [ $m^2$ ]
- $U_t$ : Pérdidas Globales por la cubierta, [ $W/(m^2 K)$ ]
- $U_b$ : Pérdidas Globales por la superficie inferior  $W/(m^2 K)$
- $U_e$ : Pérdidas Globales por las paredes laterales  $W/(m^2 K)$



**Figura 6.** Esquema geométrico del módulo solar (Fuente: Autores)

Mediante el C.T.E. se deduce la expresión para el cálculo de la temperatura de cubierta ( $T_c$ ), indicado en la ecuación (3)

$$T_c = T_p - \frac{U_t (T_p - T_a)}{h_{c,p-c} - h_{r,p-c}} \quad (3)$$

Donde:

$h_{c,p-c}$ : Coeficiente de convección entre la placa y la cubierta, [W/(m<sup>2</sup> K)]

$h_{r,p-c}$ : Coeficiente de radiación entre la placa y la cubierta, [W/(m<sup>2</sup> K)]

En la figura 2 se indica el sentido de flujo del aire por el ducto, en total circula una longitud ( $L_{td}$ ) de 13 metros. Se considera convección forzada interna, ya que la entrada de aire se realiza por medio de un ventilador; en este contexto, (Incropera & DeWitt) [11], proponen la ecuación (4) para el cálculo de la temperatura de placa.

$$T_p = \frac{T_{sal} - T_a \times \exp\left(-\frac{P_c \times L_{td} \times h_i}{\dot{m} \times C_p}\right)}{h_{c,p-c} - h_{r,p-c}} \quad (4)$$

Donde:

$T_{sal}$ : Temperatura de salida del aire, [°C]

$h_i$ : Coeficiente de convección interna del flujo de aire, [W/(m<sup>2</sup> K)]

$\dot{m}$ : Caudal másico de aire, [kg/s]

$C_p$ : Calor específico del aire, [J/(kg K)]

El calor útil ( $Q_u$ ), permite proyectar la temperatura de salida ( $T_{sal}$ ) que alcanzará el aire a su paso por el módulo solar (ecuación 5)

$$T_{sal} = T_a + \frac{Q_u}{\dot{m} \times C_p} \quad (5)$$

La semisuma de la temperatura de entrada del aire que corresponde a la ambiental  $T_a$ , con la temperatura de salida  $T_{sal}$ , permite definir la temperatura media del fluido  $T_{mf}$  y seleccionar las propiedades termofísicas del fluido interno (ecuación 6).

$$T_{mf} = \frac{T_a + T_{sal}}{2} \quad (6)$$

El rendimiento del módulo solar ( $\eta_c$ ) se evalúa entre la energía útil y la energía de entrada, Ecuación 7.

$$\eta_c = \frac{Q_u}{S \times A_c} \times 100 \quad (7)$$

Se define también la variable  $t_v$  que indica el tiempo unitario que necesita el módulo solar para calentar un volumen de  $1 \text{ m}^3$  (ecuación 8).

$$t_v = \frac{1}{v \times B_d \times H_d} \quad (8)$$

Donde:

- $t_v$ : Tiempo unitario, [s/m<sup>3</sup>]
- $v$ : Velocidad de circulación del aire por el ducto, [m/s]
- $B_d$ : Ancho del ducto, [m]
- $H_d$ : Altura del ducto, [m]

La contrastación del modelo matemático del módulo solar, se realizó mediante el método de iteraciones siguiendo el diagrama de flujo indicado en la figura 3.

Para resolver el diagrama de flujo y el modelo matemático, se debe adoptar variables iniciales para  $T_{mf}$ ,  $T_p$  y  $T_c$ , que luego se comprueban con sus valores recalculados ( $T_{mf}'$ ,  $T_p'$  y  $T_c'$ ) hasta obtener un error porcentual menor al 1%.

## RESULTADOS

### Resultados experimentales

Las mediciones experimentales se realizaron entre las 11h30 y 13h00 en la ciudad de Catamayo, en el noreste de la provincia de Loja. La radiación solar promedio fue de  $923,4 \text{ W/m}^2$  y la temperatura ambiente promedio  $30,63^\circ\text{C}$ . Se aseguró una velocidad constante del aire de  $7,2 \text{ m/s}$  a la salida de los ductos del colector, utilizando un ventilador centrífugo. En la tabla 1, se muestran los resultados de las mediciones.

**Tabla 1.** Resultado de las mediciones experimentales

Velocidad del aire a la salida de los ductos (m/s)	Hora de la medición (H:m)	Radiación Solar (W/m <sup>2</sup> )	Temp. Ambiente T1 (°C)	Temp. de la Placa Colectora T2 (°C)	Temp. a la Salida del Ducto T3 (°C)	Temp. en la Superficie del Vidrio T4 (°C)
7.2	11:30	1042	29.7	57.6	58.8	49
	11:40	700	28.3	58	58.6	49
	11:50	950	30.6	56.8	58.5	51
	12:00	980	30.6	61.8	63.3	51
	12:10	900	30.7	61.9	63.4	51
	12:20	1000	30.1	65.3	66.4	50
	12:30	750	31.8	65.7	68.7	54
	12:40	970	31.8	69.8	72.6	57
	12:50	932	31.1	70.4	74.4	60
	13:00	1010	31.6	70.2	74.4	51
Valores Promedios		923.4	30.63	63.75	65.91	52.3

### Evaluación del Modelo Matemático

Mediante el recurso Guide de MATLAB se programó una aplicación para la ejecución del modelo matemático. Para la evaluación del modelo se definen las constantes que corresponde a datos geométricos del módulo solar y del ducto, características del aislante y condiciones térmicas de radiación de los materiales utilizados. Los valores se resumen en la tabla 2.

**Tabla 2.** Constantes para el Modelo

Variable	Símbolo	Magnitud	Unidad
Emisividad de la Cubierta de Vidrio	$\epsilon_c$	0.9	adimensional
Emisividad de la placa Absorbedora	$\epsilon_p$	0.97	adimensional
Constante de Boltzmann	$\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
Área de cubierta del módulo solar	$A_c$	(1 x 1)	m <sup>2</sup>
Altura del módulo solar	$H_c$	0.12	m
Longitud Total del ducto	$L_{td}$	13	m
Ancho efectivo del ducto (lado base)	$B_d$	0.0734	m
Altura efectiva del ducto	$H_d$	0.0353	m
Espesor de Aislante Fibra de vidrio (pared lateral y pared inferior)	$L_e, L_b$	0.05	m

A continuación, se define los datos de entrada que corresponde, por un lado, a las variables climáticas de la zona como: irradiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento; y, por otro lado, las condiciones de trabajo como la inclinación del módulo, el espaciado que existe entre cubierta y placa absorbadora y la velocidad de circulación del fluido en el ducto, en este caso con la potencia del ventilador se logró una velocidad de 7.2 m/s. Para las iteraciones del modelo matemático se adoptan temperaturas iniciales de trabajo como la temperatura de la placa  $T_p$ , la temperatura de

la cubierta  $T_c$  y la temperatura media del fluido dentro del ducto  $T_{mf}$ , a su vez, permitirá determinar las propiedades termofísicas entre la placa y la cubierta y también en el interior del ducto. En la tabla 3 se indica los valores que ingresan al modelo:

**Tabla 3.** Velocidad de flujo y temperaturas de trabajo

Variable	Símbolo	Magnitud	Unidad
Irradiación Solar	$S$	923.4	$W/(m^2)$
Velocidad del Viento	$v$	1	$m/s$
Velocidad de circulación del fluido	$v_{dp}$	7.2	$m/s$
Inclinación del módulo solar	$B$	166	$^\circ$
Espaciamento entre cubierta y placa absorbadora	$L$	0.03	$m$
Temperatura ambiente	$T_a$	30.63	$^\circ C$
Temperatura de alrededores	$T_{alr}$	30.63	$^\circ C$
Temperatura de Cubierta	$T_c$	42.41	$^\circ C$
Temperatura Placa absorbadora	$T_p$	65.06	$^\circ C$
Temperatura media del fluido	$T_{mf}$	47.06	$^\circ C$
Temperatura experimental de la placa absorbadora	$T_{pex}$	63.75	$^\circ C$
Temperatura experimental de salida del fluido	$T_{salex}$	65.91	$^\circ C$

En la figura 7, se muestra los resultados del modelo en el entorno de la aplicación CaModSol



**Figura 7.** Cálculos del Módulo Solar para una velocidad del fluido en el ducto de 7.2 m/s (Fuente: Autores)

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados indican que el ajuste de temperaturas se realizó con una convergencia menor al 1% de las temperaturas de cubierta, de la placa absorbadora y de la temperatura media del fluido, siendo sus valores calculados de: 42,41°C; 65,06°C; y, 47,6°C respectivamente. El valor de cálculo del rendimiento fue de 75,7%



considerando una irradiación solar de  $923,4 \text{ W/m}^2$ ; este resultado contrasta con el obtenido por (Verdeza et al.) [12], quienes en su investigación lograron 36,5% y 51,7% para irradiación solar de  $400 \text{ W/m}^2$  y  $500 \text{ W/m}^2$  respectivamente.

Comparando los valores calculados con relación a los datos experimentales, se obtuvo un error del 2,13% en la temperatura de la placa, en la temperatura media del fluido de 1,34%, en el calor útil de 3,66%, en la temperatura de salida del fluido de 1,96%, y en el rendimiento del 3,66%, obteniéndose en promedio un error del 2,55% que representaría el desfase entre el modelo propuesto respecto a los parámetros reales de funcionamiento. Estos valores se consideran aceptables desde el punto de vista estadístico [13].

El rendimiento del módulo solar real fue de 78.61%, en cuanto al tiempo unitario se obtiene un valor de 53.6 s, tiempo que necesita el módulo solar para cubrir un volumen de aire de  $1 \text{ m}^3$  de una cámara circulando con una velocidad de 7.2 m/s. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Quiñonez [2] teniendo en cuenta que se logró un rendimiento superior en más de un 20%, y la mitad del tiempo unitario requerido para calentar  $1 \text{ m}^3$ .

El caudal másico que posibilita el rendimiento de 78,61% es de 0,0204 kg/s, resultado similar al obtenido por (Chabane et al.) [4], que logra la mayor eficiencia con un caudal másico de 0,0202 kg/s.

Finalmente, se presentan las siguientes conclusiones:

1. Se ha logrado confirmar la correspondencia del modelo matemático desarrollado con los resultados experimentales, ratificando la pertinencia del uso de modelos matemáticos para predecir el comportamiento de parámetros reales de funcionamiento del colector solar de placas planas.
2. Los resultados obtenidos ofrecen alentadoras perspectivas de utilización del módulo de aprovechamiento solar para la generación de aire caliente con propósitos de calefacción, a fin de proporcionar confort en viviendas de la región sierra ecuatoriana, donde las condiciones climáticas y de radiación solar son similares a las consideradas en la investigación.

## FUENTES DE FINANCIAMIENTO

La presente investigación es parte del Proyecto No. 10-3-DI-FEIRNNR-2019, con financiamiento interno de la Universidad Nacional de Loja, correspondiente a la Convocatoria de Proyecto de Investigación Científica 2019-2020.

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores de la presente investigación declaramos la no existencia de conflicto de interés alguno.





## APORTE DEL ARTÍCULO EN LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Este artículo aporta al análisis de flujos de aire caliente en un módulo de aprovechamiento solar de placas planas, para la caracterización de procesos de intercambio de calor.

## DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE CADA AUTOR

Miguel Angel Caraballo, Darwin Tapia, Byron Solórzano y José Cuenca, han contribuido de forma sustancial desde la idea de investigación, la realización del proceso investigativo, el diseño del manuscrito, búsqueda bibliográfica, análisis e interpretación de datos, redacción del manuscrito y revisión crítica de contenido. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Loja por su apoyo en la realización de la investigación y la publicación de los resultados.

## REFERENCIAS


- [1] J. Iglesias and J. Morales, "Sizing of a solar thermal system by means of simulation and their energy validation," *Apl. Industrialesdrustriales*, pp. 55–65, 2013.
- [2] J. Quiñonez, "Investigación experimental de un calentador solar de aire de doble flujo de convección natural de alta eficiencia," *Rev. Investig. Altoandinas - J. High Andean Res.*, vol. 21, no. 4, pp. 274–282, Oct. 2019, doi: 10.18271/ria.2019.504.
- [3] S. A. Kalogirou, "Solar thermal collectors and applications," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30, no. 3. pp. 231–295, 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2004.02.001.
- [4] F. Chabane, N. Moumami, A. Brima, and S. Benramache, "Thermal efficiency analysis of a single-flow solar air heater with different mass flow rates in a smooth plate," *Front. Heat Mass Transf.*, vol. 4, no. 1, 2013, doi: 10.5098/hmt.v4.1.3006.
- [5] F. Alves, C. Alves, L. Pedrozo, J. Osorio, and P. Ferreira, "Fuzzy system to evaluate performance and the physiological responses of piglets raised in the farrowing house with different solar heating systems," *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellin*, vol. 72, no. 1, pp. 8729–8742, Jan. 2019, doi: 10.15446/rfnam.v72n1.67736.
- [6] F. Sarhaddi, H. Ajam, and S. Farahat, "Exergetic Optimization of Solar Air Heaters and Comparison with Energy Analysis," *Int. J. Thermodyn.*, vol. 8, no. 4, pp. 183–190, 2005, doi: 10.5541/ijot.160.
- [7] S. Y. Wu, Y. Chen, Y. R. Li, and D. L. Zeng, "Exergy transfer characteristics of forced convective heat transfer through a duct with constant wall heat flux," *Energy*, vol. 32, no. 5, pp. 686–696, 2007, doi: 10.1016/j.energy.2006.04.013.
- [8] H. Bracamonte and M. Baritto, "Irreversibility Analysis of Non Isothermal Flat Plate Solar Collectors for Air Heating with a Dimensionless Model," *Ing. Investig. y Tecnol.*, pp. 237–247, 2013.
- [9] J. Ghaderian, C. Nor, and H. Mohammed, "Modelling of Energy and Exergy



- Analysis for a Double-Pass Solar Air Heater System,” *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci. ISSN*, vol. 16, no. 1, pp. 15–32, 2015.
- [10] A. Ávila, J. Mendoza, and J. Beltrán, “Universidad del Norte,” *Ing. y Desarro.*, vol. 27, pp. 93–112, 2010, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85215207006>.
- [11] F. Incropera and D. DeWitt, *Fundamentos de Transferencia de calor*, Cuarta. México: Pearson Education, 1999.
- [12] A. Verdeza, J. Mendoza, G. Rafael, and A. Ávila, “Colector solar de placa plana de paso doble con lecho poroso,” *Visión*, vol. 2, no. 2, pp. 57–66, 2013.
- [13] M. Santo, G. Lecumberry, F. Ortiz, E. Moschetti, and S. Peparelli, “El proceso de medición: Análisis y comunicación de datos experimentales,” 2005. [Online]. Available: <http://www.unrc.edu.ar>.

## NOTA BIOGRÁFICA



Miguel Angel Caraballo Núñez. **ORCID ID**  <http://orcid.org/0000-0002-4350-209X>  
Ingeniero y Magister en Electromecánica, Doctor en Ciencias Técnicas (PhD en Ingeniería de materiales). Docente Titular e Investigador de la Universidad Nacional de Loja, Ecuador.



Darwin Giovanni Tapia Peralta. **ORCID ID**  <https://orcid.org/0000-0002-1663-7976>  
Ingeniero en Electromecánica, Magíster en Planificación y Gestión Energética. Docente Titular e Investigador de la Universidad Nacional de Loja, Ecuador.







Byron Agustín Solórzano Castillo **ORCID iD**  <https://orcid.org/0000-0002-0071-2249>  
Ingeniero en Electromecánica, Master en Ingeniería Mecánica. Docente Titular e Investigador de la Universidad Nacional de Loja, Ecuador.



José Fabricio Cuenca Granda **ORCID iD**  <https://orcid.org/0000-0003-1049-0958>  
Ingeniero en Electromecánica, Máster en Ingeniería del Mantenimiento. Docente Titular e Investigador de la Universidad Nacional de Loja, Ecuador.



This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

