

COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL FLUJO DE AIRE EN UN ABSORBEDOR SOLAR

BEHAVIOR OF THE TEMPERATURE OF THE FLOW OF AIR IN A SOLAR ABSORBER

GERARDO C. CIFUENTES¹, CESAR A. MARÍN²,
DEYANIRA MUÑOZ MUÑOZ³

PALABRAS CLAVES:

Colector solar, energía solar, calentamiento de aire, Modelo Matemático

KEY WORDS:

Solar collector, solar energy, heating of air, Mathematical Model

RESUMEN

El presente trabajo evalúa el comportamiento de la temperatura del flujo de aire en un colector solar de lecho de rocas, mediante un modelo matemático que simula las temperaturas del flujo de aire a la entrada y salida del colector. El modelo relaciona la geometría, la radiación incidente en el colector y las constantes propias del colector determinadas experimentalmente. Para el análisis se realizaron tres pruebas en las que se midieron las temperaturas del ambiente, de entrada y salida en el colector y la radiación solar incidente.

ABSTRACT

The present work evaluates the behavior of the temperature of the flow of air in a solar collector of channel of rocks, by means of a mathematical model that simulates the temperatures from the flow of air to the entrance and exit of the collector. The pattern relates the geometry, the incident radiation in the collector and the constants own collector determined experimentally. For the analysis they were carried out three tests in those that the temperatures of the atmosphere were measured, of entrance and exit in the collector and the solar incident radiation.

Recibido para evaluación: 11 de mayo 2009 . Aprobado para publicación 18 de julio 2009

1 Msc., Universidad del Valle, gcabrera@univalle.edu.co

2 Ing., Universidad del Valle, ceauma@latinmail.com

3 Msc., Universidad del Cauca, demunoz@unicauca.edu.co. Facultad de Ciencias Agropecuarias Universidad del Cauca.

INTRODUCCIÓN

Los colectores solares de lecho de rocas emplean energía solar para el calentamiento de aire, se usan en actividades agrícolas por que ofrecen una opción económica y eficiente en el secado de sustancias y residuos orgánicos. Los inconvenientes en el diseño, son la geometría, eficiencia, materiales [1], parámetros térmicos y másicos de secado como el perfil de temperatura que debe alcanzar y acumular el colector para garantizar las temperaturas máximas de exposición del producto, las cuales dependen del flujo de aire que ingresa, circula y sale a la cámara de secado conectado al absorbedor. La energía térmica acumulada en el absorbedor hace que la temperatura a la salida varíe muy lentamente al cambiar la radiación incidente, afectando la eficiencia del sistema. Por lo tanto evaluar el comportamiento de la temperatura usando un modelo transitorio computacional sencillo, que tenga en cuenta tanto la acumulación de energía, como la variación de la radiación a lo largo del día, es de interés en el sector industrial, para operar procesos agroindustriales compuestos por una de las operaciones tan comunes como es el secado solar que utiliza esta fuente térmica económica.

En este trabajo se emplea un modelo matemático no estacionario [2] para describir el comportamiento de la temperatura del flujo de aire en un colector de lecho de rocas. El modelo se aplicó en las primeras horas de radiación solar y para su valor pico, se consideró la limitación: una vez se inicie el descenso de la temperatura, a la salida ésta tenderá a mantenerse estable o

a descender. Se mantuvo un flujo de aire controlado y una radiación solar conocida

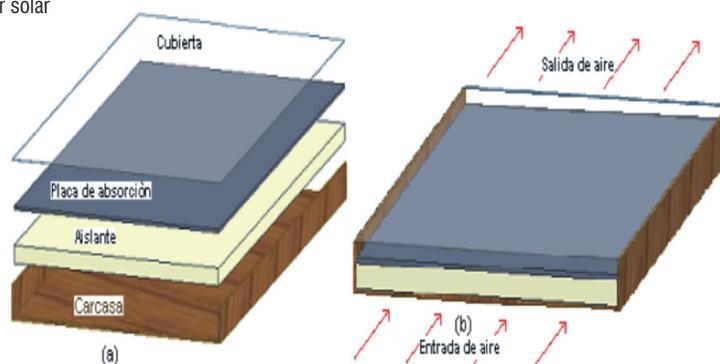
COLECTOR SOLAR

Un colector solar transforma la energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace de la radiación proveniente del sol hacia el aire que circula por el ducto del colector (figura1). La gama de longitudes de onda que se aprovecha está comprendida principalmente entre $0,3\mu\text{m}$ y $3,0\mu\text{m}$, franja de radiación considerablemente más pequeña que la de la radiación emitida por la mayoría de las superficies que absorben energía. [3],

En los colectores solares planos para calentamiento de aire, la energía solar incidente atraviesa una o varias capas de algún material transparente adecuado, antes de alcanzar el lecho de rocas. Este absorbe la energía radiante y la transforma en energía interna. Una parte es transferida como calor por convección hacia el aire que circula por el ducto del colector y desde allí al espacio o producto que va a ser calentado, según la aplicación que se le destine [3], [4].

Un material transparente usado como cubierta permite la entrada de la radiación solar y minimiza las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente por la parte superior. El aislante térmico colocado en la carcasa del colector, parte posterior y lateral, disminuye las pérdidas de calor en esos sitios. Estas partes sirven como parte estructural del colector.

Figura 1. Partes de un colector solar



La cual se fabrica de diversos materiales locales según sea la conveniencia.

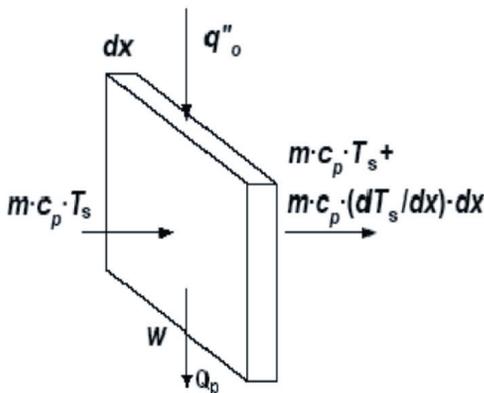
TEMPERATURA DEL FLUJO DEL AIRE EN UN COLECTOR SOLAR

El comportamiento de la temperatura del flujo de aire a través de un colector plano, se puede estimar planteando el balance de energía en un volumen de control, considerando que es un sistema abierto y las siguientes asunciones:

- Estado estacionario y no existe flujo de calor a través de la frontera del sistema, por estar térmicamente aislado.
- La caída de temperatura entre la parte superior e inferior de la placa es despreciable.
- El flujo térmico es unidimensional a través de las cubiertas y aislamientos laterales.
- El flujo de aire es uniforme a lo largo del colector.
- El sol se considera como un cuerpo negro.
- Se supondrá que la radiación sobre las rocas en el colector es uniforme.

El balance de energía en el colector a través del elemento diferencial estático de aire en el interior del canal rectangular mostrado en la figura 2, involucra el flujo de energía solar que viene hacia las rocas q''_o , el flujo de energía que estas pierden Q_p y la variación de entalpía del aire al atravesar ese elemento diferencial. [5]

Figura 2. Balance de energía en el colector.



La expresión es:

$$mC_p \frac{dT_s}{dx} dx + (m * C_p * T_s) = w * (q'' - Q_p) dx + (m * C_p * T_s) \tag{1}$$

Donde, m representa el flujo másico de aire, C_p el calor específico del aire, w el ancho del ducto y T_s la temperatura media del fluido a una distancia x. Reordenando los términos de la ecuación anterior se obtiene la variación de la temperatura a través del colector

$$\frac{dT_s}{dx} mC_p = w * (q'' - Q_p) \tag{2}$$

Donde:

$$q'' - Q_p = Qu,$$

Qu = energía útil, se puede representar por la formulación propuesta por Bliss (1959) [5]:

$$q_u = FF_e [I \zeta_e k - U_L (T_s - T_a)] \tag{3}$$

Reemplazando en la ecuación anterior:

$$\frac{dT_s}{dx} mC_p = wFF_e [I \zeta_e k - U_L (T_s - T_a)] \tag{4}$$

Solucionando esta ecuación diferencial para x entre 0 y L:

$$T_s = T_a + \frac{I_a}{U_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{wU_L F'}{mC_p}\right) * x} \right] \tag{5}$$

El Factor de remoción de calor (F') está dado por:

$$F' = \frac{1 - e^{-U_o / GC_p}}{U_o / GC_p} \tag{6}$$

El coeficiente global de pérdidas entre el fluido dentro del colector y el aire fuera de este (U_o), se obtiene mediante:

$$\frac{T_s - T_a}{T_e - T_a} = e^{-U_o / GC_p} \tag{7}$$

Midiendo experimentalmente las temperaturas de entrada y salida en el colector, la temperatura ambiente y el flujo de aire (G):

El término $I_a = I \zeta_e k$ es la radiación absorbida por el colector solar donde $K = 0.85$ y es conocido como

un factor de conversión de la radiación difusa y directa, sirve para evaluar la energía solar incidente en el plano del colector [3]. Mientras $\zeta_e = \tau\alpha$ es el producto transmitancia-absorbancia.

El coeficiente global (U_L) de perdidas entre las rocas y el aire fuera del colector se obtiene también experimentalmente con las temperaturas de entrada y salida en el colector, la temperatura ambiente, el flujo de aire y la relación para colectores a un ángulo de elevación conocido [6] [7]:

$$U_L = U_c + U_b + U_e \quad \text{Ec. (8)}$$

$$\frac{U_c}{U_{c(45^\circ)}} = 1 - (\psi - 45)(0.00259 - 0.00144\epsilon_p) \quad \text{Ec. (9)}$$

$$U_b = \frac{K_a}{L} \quad \text{Ec. (10)}$$

$$U_e = \frac{K_a MP}{L' A_c} \quad \text{Ec. (11)}$$

U_b y U_e son los coeficientes globales de perdidas debido a la conducción por los lados y el fondo respectivamente.

Para un ángulo de elevación dado del colector solar, el coeficiente global de perdidas por convección y radiación por la cubierta [8]:

$$\epsilon_{c(45^\circ)} = \left[\frac{1}{(344/T_p)(T_p - T_a)(1+f) + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \left[\frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{\left[\epsilon_p + 0.0425(1 - \epsilon_p)^{-1} \right] + \frac{(1+f)}{\epsilon_c}} - 1 \right] \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

- K_a = Conductividad térmica del aislante
- M = Altura del colector
- P = Perímetro del colector
- L' = Espesor del colector por los lados
- L = Espesor del colector por el fondo
- A_c = Área de la placa colectora
- $\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2\text{K}^4$, constante de Stefan-Boltzmann.

T_p = Temperatura media de la placa absorbadora (lecho de rocas).

T_a = Temperatura ambiente

ϵ_p = Emisividad de la placa

ϵ_c = Emisividad de la cubierta

Ψ = Ángulo de inclinación del colector

$$f = \left(1 - 0.04h_w + 0.0005h_w^2 \right) (1.058) \quad \text{Ec. (13)}$$

h_w = Es el coeficiente de transferencia de calor por convección debido al aire que pasa por la cubierta colectora.

v = Es la velocidad media del viento que pasa sobre el colector.

La medición de la temperatura del lecho de rocas se estima con la relación empleada para aire con velocidad constante que atraviesa un lecho de rocas, [8]

$$T_p = \frac{T_s - T_e * cte}{1 - cte} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

$$cte = e^{-\left(\frac{h_c * A_s}{v_e * A_L * \rho_a * Cp_a} \right)} \quad \text{Ec. (15)}$$

Cp_a = Calor específico del aire

A_L = Área transversal del lecho

ρ_a = Densidad del aire

v_e = Velocidad del aire

A_s = Área superficial de las rocas

h_c = Coeficiente de convección entre las rocas y el aire.

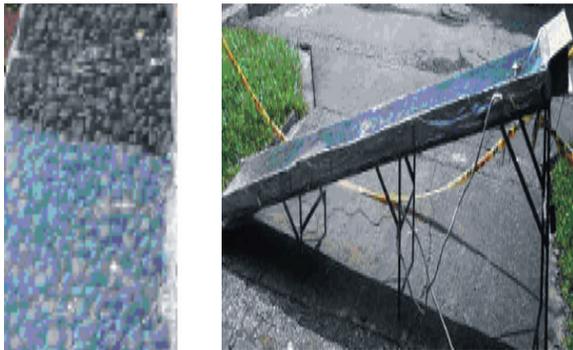
MÉTODO

Se utilizó el colector de prueba (figura3) construido por Cabrera y Marín en el año 2008. Esta formado por una placa absorbente de rocas de forma semejante a esferas, pintadas de negro y de diámetro menor a 3.5 cm.

El aislante de la parte de abajo es madera y fique, el lecho de rocas es de negro mate, para mejorar la emisividad. La parte de abajo y los lados son de recubrimiento de plástico y la cubierta es de vinilo calibre 100[9].

Se utilizó un sistema de adquisición de datos, DAS-8000 Desing instruments y el software Proasis, DCS win, con este se tomaron las temperaturas de entrada, salida

Figura 3. Colector solar de Prueba



Fuente: Cabrera y Marín en el año 2008

y ambiente, un piranómetro para medir la radiación incidente, ventiladores para mantener el flujo de aire constante y un anemómetro para medir la velocidad del aire en el colector. Se utilizó la prueba ASHRAE STANDARD 93-77, para la evaluación de colectores solares [10]. Los parámetros del colector de prueba se muestran en el cuadro 1.

Cuadro1. Parámetros del colector solar de prueba

Característica	Medida
Largo del colector	3,8 m
Ancho del colector	0,55 m
Altura del colector	0,01 m
Emitancia placa absorción (pintura negra mate)	0,9
Emitancia del vinilo calibre 100 en el infrarrojo	0,85
Espaciamiento promedio entre lecho de rocas y el vinilo	0,025 m
Angulo de inclinación del colector	14 ° (3.2.1)
Espesor del aislante por lados	0,02 m
Espesor del aislante por el fondo	0,025 m
Conductividad térmica del aislante por el fondo [1]	0.04 W/mK
Conductividad térmica del aislante por los lados [2]	0.04 W/mK
Velocidad del viento	1 m/s
Temperatura del aire ambiente = T del firmamento	

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Comportamiento de la temperatura a través del tiempo.

Con los datos obtenidos experimentalmente de tres pruebas en el colector, se construyeron las curvas del comportamiento de la temperatura a través del tiempo (figuras 4, 5, y 6).

Estas se compararon con las realizadas mediante las ecuaciones del balance de energía (figuras 7, 8 y 9), que simula las temperaturas de salida del colector de prueba.

De las curvas experimentales se observa que la tendencia es aumentar en las primeras horas desde las 11 a

Figura 4. Comportamiento de Temperatura a través del tiempo prueba 1

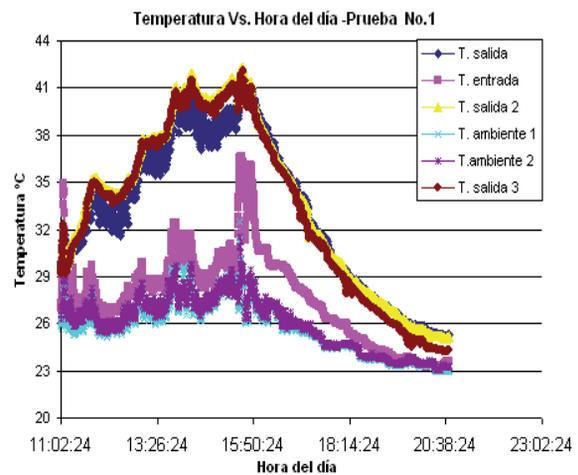


Figura 5. Comportamiento de Temperatura a través del tiempo prueba 2

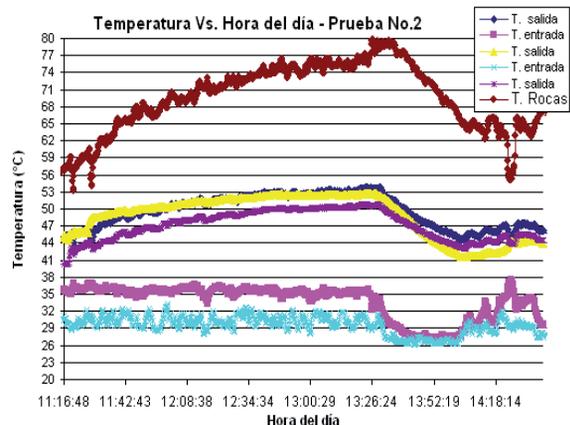


Figura 6. Comportamiento de Temperatura a través del tiempo prueba 3

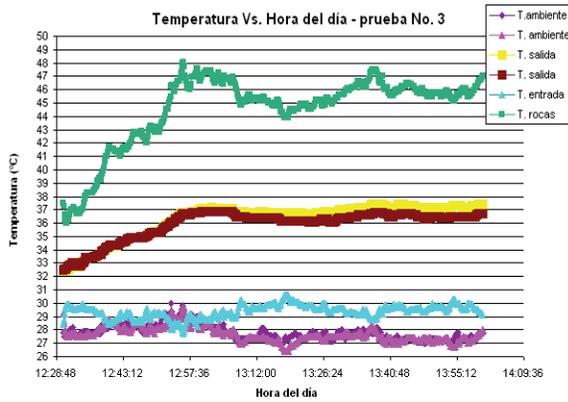


Figura 7. Temperatura simulada a la salida del colector, prueba 1

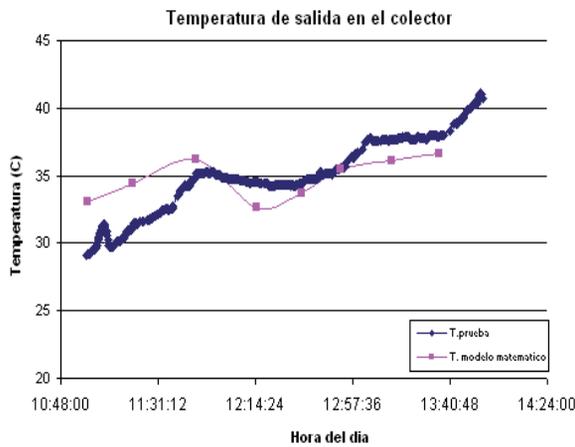


Figura 8. Temperatura simulada a la salida del colector, prueba 2

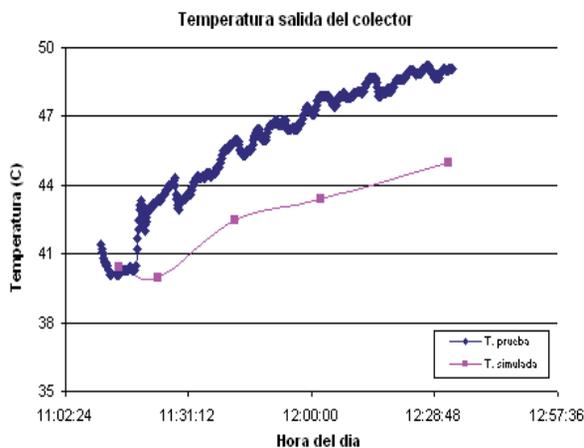
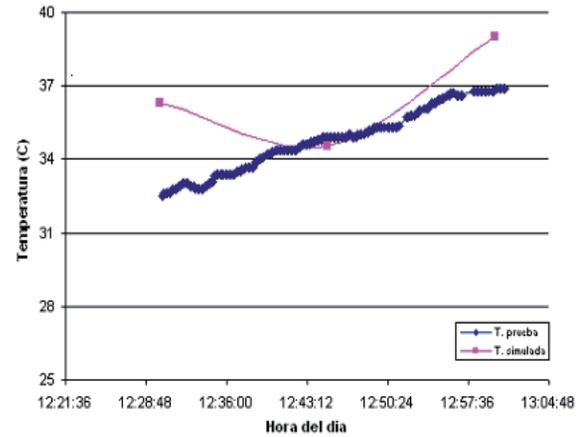


Figura 9. Temperatura simulada a la salida del colector prueba 2



las 15 horas y luego a decaer con el tiempo a medida que la irradiación solar decae.

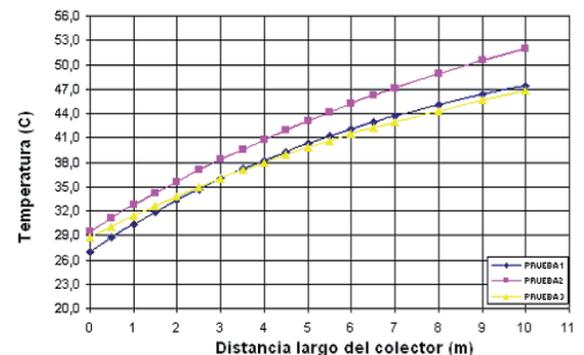
Con las curvas simuladas por ecuación del balance de energía, se observa una tendencia similar, presentándose un incremento de 10 °C en la temperatura.

Comportamiento de la temperatura a lo largo del colector.

Para determinar el comportamiento de la temperatura a lo largo del colector solar se evaluaron distintos valores de la temperatura de salida con respecto al largo de este. (figura10) Se utilizó el primer valor de radiación de la prueba 2.

El perfil de temperatura muestra la forma en que el fluido gana energía a medida que se mueve dentro del ducto

Figura 10. Temperatura simulada a la salida del colector



del colector solar, tendiendo a igualar la temperatura de las rocas. Por lo tanto se presenta un efecto significativo entre la temperatura y la longitud del colector.

El aumento de la temperatura a la salida del colector, indica la importancia de calcular el largo óptimo para evitar construirlos de un largo excesivo.

Comportamiento del flujo de aire en el colector.

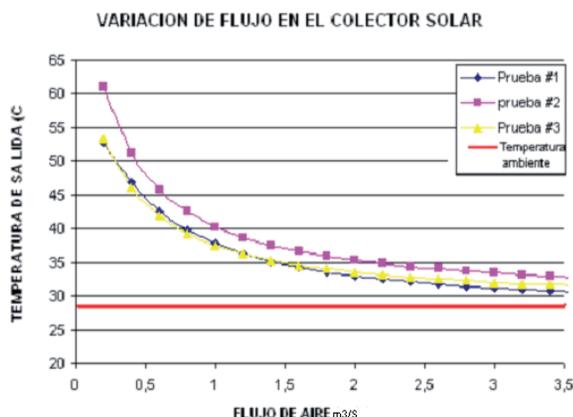
Entre mayor sea el flujo de aire la temperatura del aire de salida del colector tiende a mantenerse estable con una pequeña variación de temperatura. Cuando el flujo alcanza valores iguales o superiores a $2 \text{ m}^3/\text{s}$ se obtiene una variación de $5 \text{ }^\circ\text{C}$ y los flujos de aire se pueden manejar para una temperatura determinada deseada (figura 11).

El aire fluye en un área aproximada de 0.033 m^2 . Los obtenidos son flujos bajos de aire, si se requiere aumentar el flujo de aire sin llevar a pérdidas en la temperatura de salida del colector, entonces en el balance de energía, las dimensiones del colector se pueden manipular, es decir aumentar el ancho o bien el largo sin que sean excesivos [11] [12].

CONCLUSIONES

Se realizó un análisis de la variación de la temperatura en un colector solar con lecho de rocas, donde el balance

Figura 11. Comportamiento del flujo de aire



de energía y los datos experimentales muestran gran cohesión para describir la relación de la temperatura a lo largo del colector.

Los colectores solares no deben ser construidos de longitud mayor a 7m. Después de esta longitud el aumento de temperatura por cada metro de colector tiende a tener un 70% menos de incremento de temperatura que en los primeros metros,

El caudal de aire se debe reducir, cuando se presenten reducciones de temperatura a lo largo del colector para compensar el sistema, cuando se presente irradiación estable entre las 11 y 15 horas solares.

El dimensionamiento de secadores de productos agrícolas, debe considerar el comportamiento de la temperatura con el tiempo y a lo largo del colector, el flujo de aire a través de él y deben ser confrontadas tridimensionalmente, para aprovechar sistemas económicos de calor

BIBLIOGRAFIA

- [1] Cabrera Gerardo, Muñoz Deyanira, El fique como aislante térmico, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Vol 5, No. 1, Marzo 2007.
- [2] Cabrera G. y Marín C. Modelo estable de un absorbedor solar con lecho de rocas para secado por calentamiento de aire, El hombre y la Máquina, No 32, febrero de 2009.
- [3] Márquez A.H., Colectores solares de placa plana, Universidad Autónoma de Colombia, 1994. 101 p.
- [4] Servicio Nacional de Aprendizaje (-SENA) Colombia, Colector solar de placa plana, 1988. 41pag.
- [5] B. M. Santos, M. R. Queiroz y T. P. F. Borges, A solar collector design procedure for crop drying, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 22, No. 02, April - June, 2005
- [6] Rodríguez Luis Solís Rodríguez, Miguel A. Cerón Cardeña, Israel González Ahumada, Diseño y operación de una estufa solar para secar madera, Solís y otros. Ingeniería (2003) 35-48.

- [7] Rodríguez Humberto, González Fa-bio, Manual de radiación solar en Co-lombia, Departamento de física Uni-versidad Nacional de Colombia, 1992.
- [8] Incropera F. y De Witt D., Funda-mentos de Trans-ferencia de Calor, Pe-arson, 4ta Ed.1996.
- [9] The American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engi-neers, Inc, Methods of testing to deter-mine the thermal performance of solar collectors,1986
- [10] Villalobos Juan J. Notas sobre el curso de energía solar, Departamento de procesos tecnológicos e industriales, Tlaquepaque, Jalisco, 1995.
- [11] Cabrera Cifuentes Gerardo. Notas de Energía Solar. Universidad del Valle. Cali (2006).
- [12] Cabrera Cifuentes Gerardo. Introdu-cción a las Plantas de generación de Exergía. Universidad del Valle. Cali- 2006