

EVALUACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN UN COLECTOR DE AIRE QUE UTILIZA UN LECHO DE LADRILLO ASFÁLTICO

ÁREA DE APLICACIÓN: SOLAR TÉRMICA

AUTORES: Francisco Risco Franco (fjrisco@uns.edu.pe)*
Chumpitaz Ayala Germán Raúl (germanraul2cha@msn.com)
Mendiburu Zevallos Andrés (andresmendi@hotmail.com)
Sotelo Ledezma Junior Pedro (peters_83_23@hotmail.com)

INSTITUCIÓN : UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA – Laboratorio de Energía solar

DIRECCIÓN: Perú, Nuevo Chimbote, Campus Universitario Urb. Bellamar s/n
* e-mail: fjrisco@uns.edu.pe - Teléf.: (51)-43-310445 anexo 1035

RESUMEN:

El presente trabajo trata sobre el análisis de un nuevo tipo de colector solar de aire con lecho de ladrillo asfáltico, como placa colectora. Para su análisis se tomaron datos continuos por varios días, mostrando ciertas peculiaridades: La cantidad de energía almacenada en el colector fue alrededor del 75 % de la energía incidente; mediante el uso de correlaciones empíricas se obtuvieron los indicadores necesarios en la investigación. Al final del trabajo pudimos encontrar que cantidad de energía era almacenada en la placa colectora, el calor entregado al aire, y que porcentaje representaban los mismos respecto de la radiación incidente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante el estudio de los colectores solares de aire, un problema principal de los mismos es su capacidad de entregar calor durante las horas sin sol, motivo por el cual existen diferentes trabajos que han realizado investigadores en sistemas de captación y almacenamiento de la energía solar. Nos planteamos la posibilidad de construir un colector solar cuya placa tenga la propiedad no solo de captar si no también de almacenar la energía solar. Es así que surge la idea de utilizar un lecho de ladrillo asfáltico como placa colectora.

Consideramos que el proyecto es importante pues nos proveerá de la información necesaria para determinar si es factible, desde el punto de vista de la eficiencia, la utilización de este sistema.

¿Cual es el comportamiento de un colector solar de aire, que utiliza un lecho de ladrillo asfáltico como placa colectora?

MÉTODOS

Diseño de la Investigación

La investigación se realizó siguiendo un diseño experimental para ello se realizaron las siguientes acciones:

- a) Se construyó el colector solar de aire con lecho de ladrillo asfáltico.
- b) Se midieron los parámetros: La radiación, temperatura ambiente, velocidad del viento y la temperatura del aire a la entrada y salida del colector durante las horas de radiación.

Revisión Bibliográfica

Coefficientes de transferencia de calor desde una superficie superior hacia el cielo

El coeficiente de transferencia de calor desde la superficie superior hacia el cielo referido a la temperatura ambiental puede ser escrita como:

$$h_{rs} = \frac{\sigma \epsilon_1 (T_1 + T_s)(T_1^2 + T_s^2)(T_1 - T_s)}{(T_1 - T_a)} \quad \text{Ec.1}$$

La temperatura del cielo obtenida según Swinbank (1963) está dada por:

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5} \quad \text{Ec.2}$$

Coefficiente de transferencia de calor desde la cubierta debido al viento

El coeficiente convectivo de transferencia de calor debido al viento, Mc Adams (1954):

$$h_w = 5.7 + 3.8V \quad \text{Ec 3}$$

Coefficiente de transferencia de calor para convección forzada entre planos paralelos

Para flujos en la región laminar ($Re < 2300$)

Heaton y otros (1964) propuso la siguiente empírica correlación para el número de Nusselt local para un flujo laminar entre dos planos paralelos con un lado aislado y el otro sujeto a un flujo de calor constante.

$$Nu = Nu_{\infty} + \frac{a[\text{Re Pr}(D_h / L)]^m}{1 + b[\text{Re Pr}(D_h / L)]^n} \quad \text{Ec.4}$$

Donde las constantes son $a=0.00190$, $b=0.00563$, $m=1.71$, $n=1.17$, y $Nu_{\infty}=5.4$ para $\text{Pr}=0.7$.

Para flujos en la región de transición ($2300 < \text{Re} < 6000$).

Hausen (1943) presentó la siguiente correlación empírica para el Nusselt promedio entre el comienzo de la sección caliente y la posición L para el flujo en un tubo:

$$Nu = 0.116(\text{Re}^{2/3} - 125) \text{Pr}^{1/2} \left[1 + (D_h / L)^{2/3} \right] (\mu / \mu_w)^{0.14} \quad \text{Ec.5}$$

Análisis térmico del colector solar de placa plana con lecho de ladrillos

Analizaremos los fenómenos de transferencia de calor en los elementos más importantes del colector así:

Lecho de Ladrillo

- Recibe la radiación solar que transmite el vidrio y absorbe parte de ella
- Convección forzada con el aire interior
- Conducción hacia la parte inferior del colector
- Transferencia de calor por radiación con la cubierta

Cubierta de Vidrio

- Recibe radiación solar de la cual transmite la mayor parte.
- Convección forzada con el aire exterior
- Convección forzada con el aire al interior del colector
- Radiación con el lecho de ladrillos.

Flujo de aire

- Convección forzada tanto con el lecho de ladrillos como con la cubierta.

Luego las ecuaciones serán:

$$q_{\text{almacenado}} = \tau_g \alpha_L G_S - h_{CLf} (T_L - T_f) - h_{rLg} (T_L - T_g) - U_b (T_L - T_a) \quad \text{Ec.6}$$

$$q_{\text{Vidrio}} = \alpha_g G_S + h_{rLg} (T_L - T_g) - h_{Cf} (T_L - T_f) - h_w (T_g - T_a) - h_{rs} (T_g - T_a) \quad \text{Ec.7}$$

$$q_{\text{Aire}} = h_{cLgf} (T_{mp} - T_{mf}) \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

L : ladrillo

g : Vidrio

f : Flujo de aire en el interior del colector

h_{rs} : Coef. de radiación del vidrio al ambiente

h_{cji} : Coef. de Convección entre elementos “j” e “i”

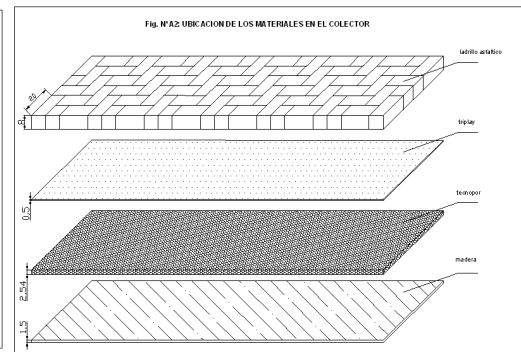
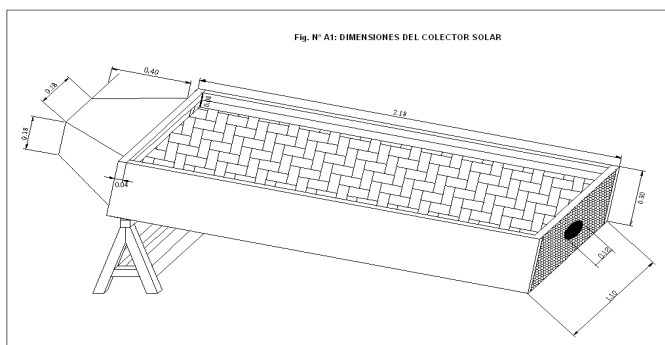
h_{rji} : Coef. de Radiación entre elementos “j” e “i”

h_w : Coef. de Convección del vidrio al exterior

U_b : Coef. global de transferencia de calor hacia abajo

Equipos

Colector Solar de Placa Plana Para Calentar Aire:



Largo: 2,18 m

Ancho: 1,10 m

Alto: 30 cm

Gap: 8 cm

Orificios de Entrada y Salida: 4,5 cm diámetro

Espesor madera debajo del lecho: 1,5 cm

Espesor Tecnopor: 2,54 cm

Espesor Triplay: 0,5 cm

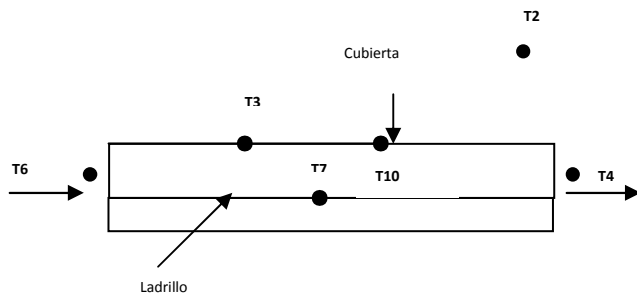
Dos Mini-Termo Anemómetro

Marca: EXTECH, Modelo: 45118

Thermal solar equipment computer controller

Equipo utilizado para recoger los datos proporcionados por los sensores de temperatura colocados en el colector.

Distribución de sensores de temperatura en el colector



T2: Temperatura Ambiente

T3: Temperatura Cubierta - Exterior

T10: Temperatura Cubierta – Interior

T7: Temperatura Ladrillo

T6: Temperatura de Entrada de Aire

T4: Temperatura de Salida de Aire

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con los datos obtenidos cada 10 segundos de temperatura se halló valores promedio para cada 5 minutos, haciéndolos así corresponder con los datos tomados para flujo de aire. Lo mismo se hizo con los datos de radiación que fueron tomados cada minuto.

Para el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada, del flujo de aire dentro del colector, las propiedades de este flujo se determinaron tomándolas a la temperatura promedio de cubierta y placa, para cada intervalo de 5 minutos. Con estas propiedades se calculó el número de Reynolds para dichos intervalos.

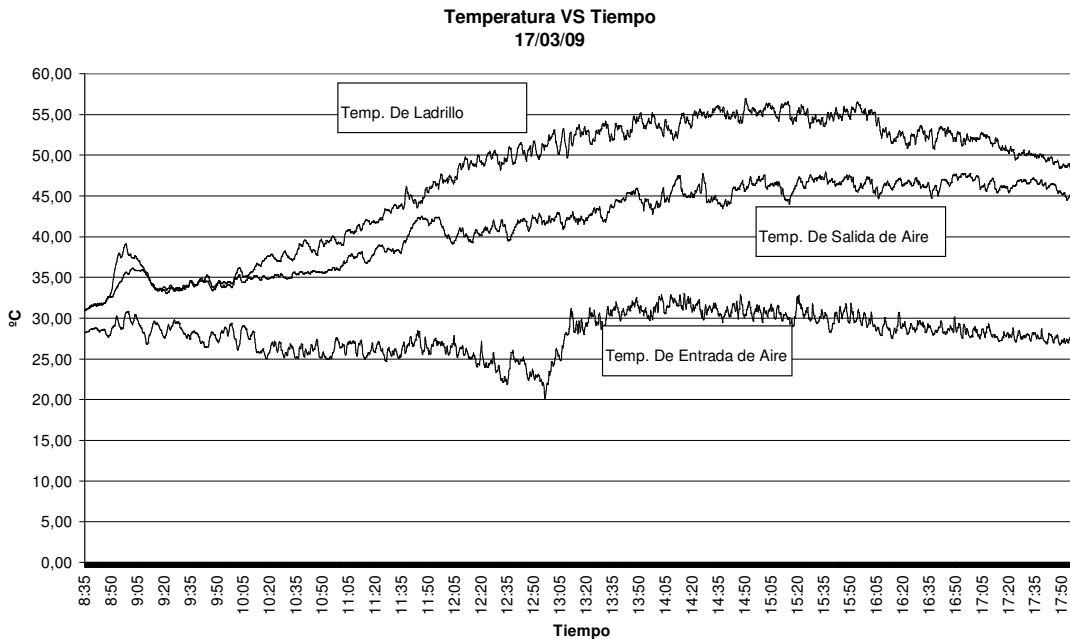
El número de Prandtl para el aire en un intervalo de temperaturas de 150 - 600 K es 0,69. Todos los números de Reynolds fueron menores a 10000; el número de Nusselt se determinó por tanto con las Ec 4 y Ec 5 del capítulo 2.

Para la determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta hacia el ambiente se utilizó la Ec 3 del capítulo 2. Y para el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el ambiente se utilizó la Ec. 1

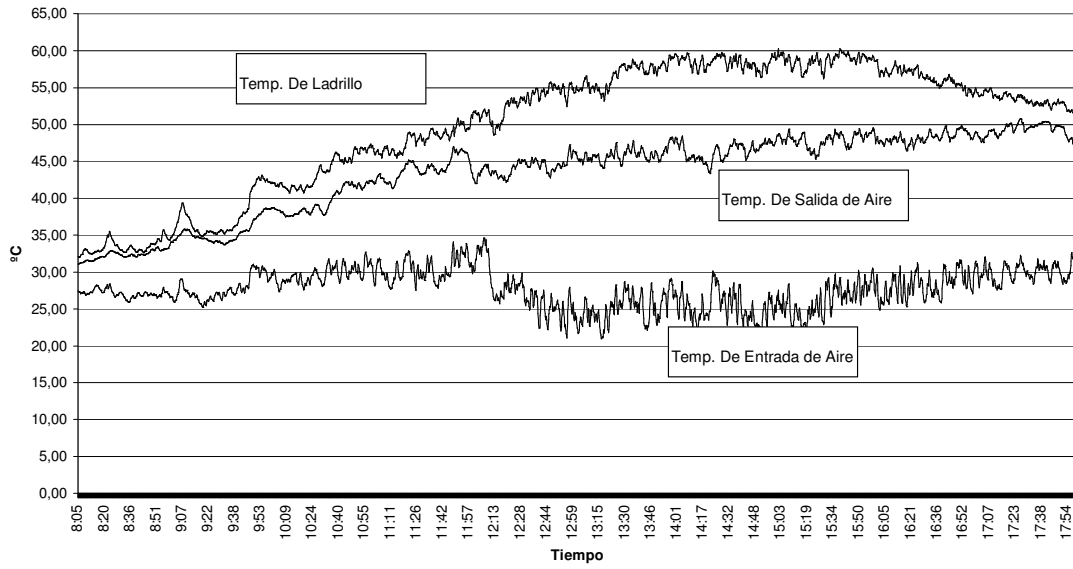
Utilizando las ecuaciones Ec 6, Ec 7 y Ec 8 se determinó el calor almacenado y el calor entregado al aire para cada intervalo de 5 minutos, obteniendo así una correspondencia entre el tiempo, calor almacenado, tiempo y calor entregado al aire.

Luego se utilizó el método del trapecio para calcular el calor almacenado por el lecho de ladrillo y de la misma forma se calculó el calor entregado al aire a lo largo de la hora de sol.

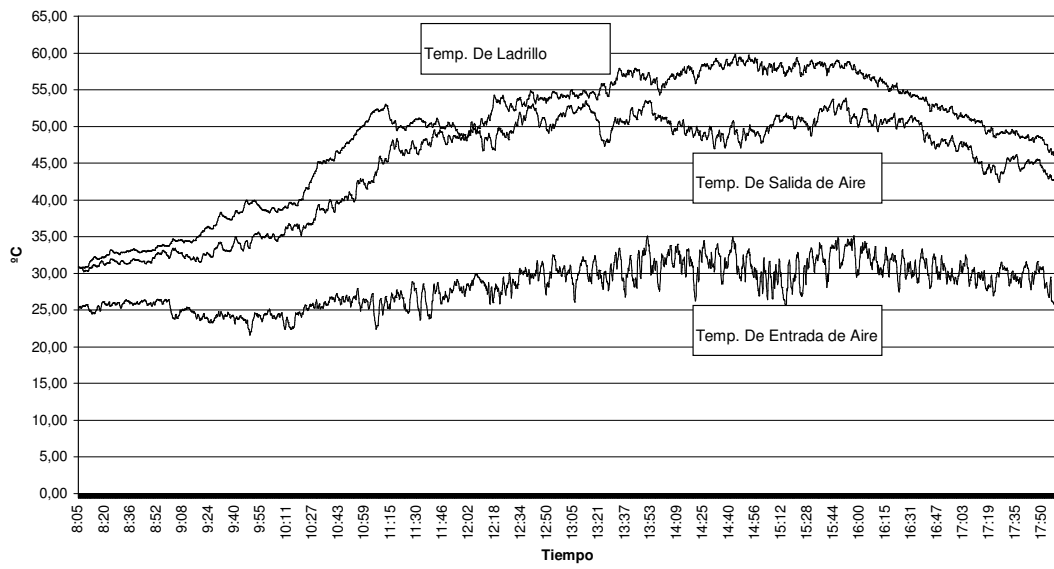
Los valores horarios de temperatura, tomados para cada uno de los días, se muestran a continuación en las siguientes tablas para tres días representativos de la toma de datos:



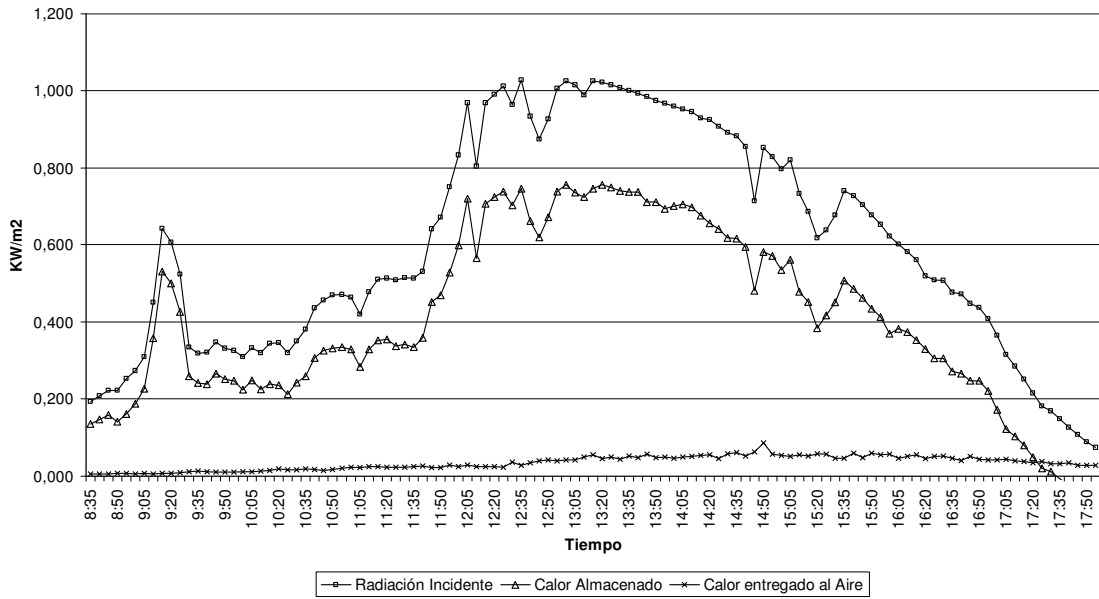
Temperatura VS Tiempo
18/03/09



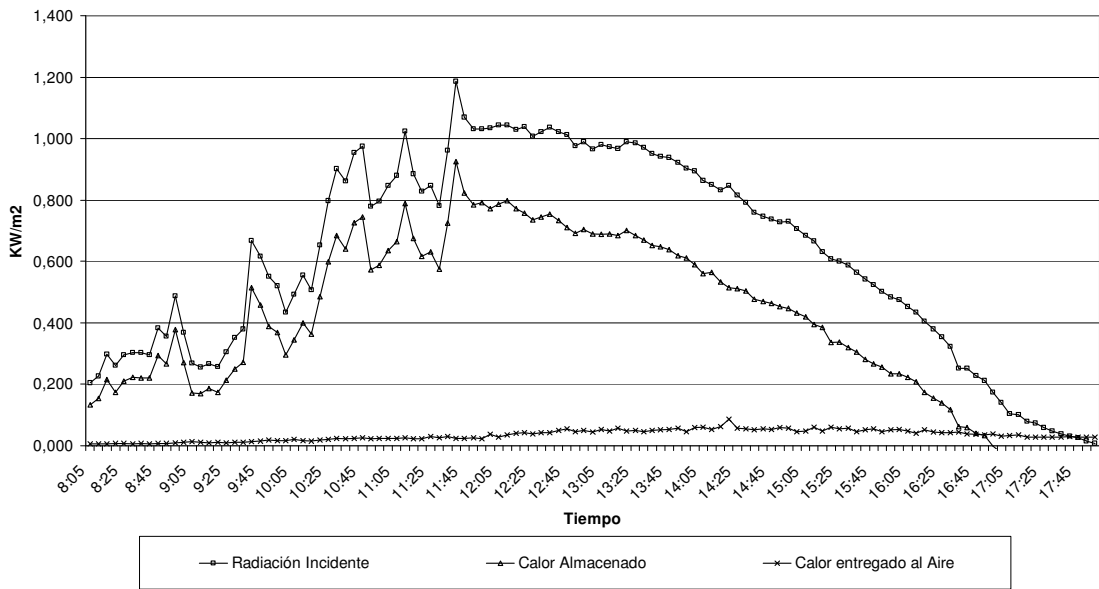
Temperatura VS Tiempo
19/03/09



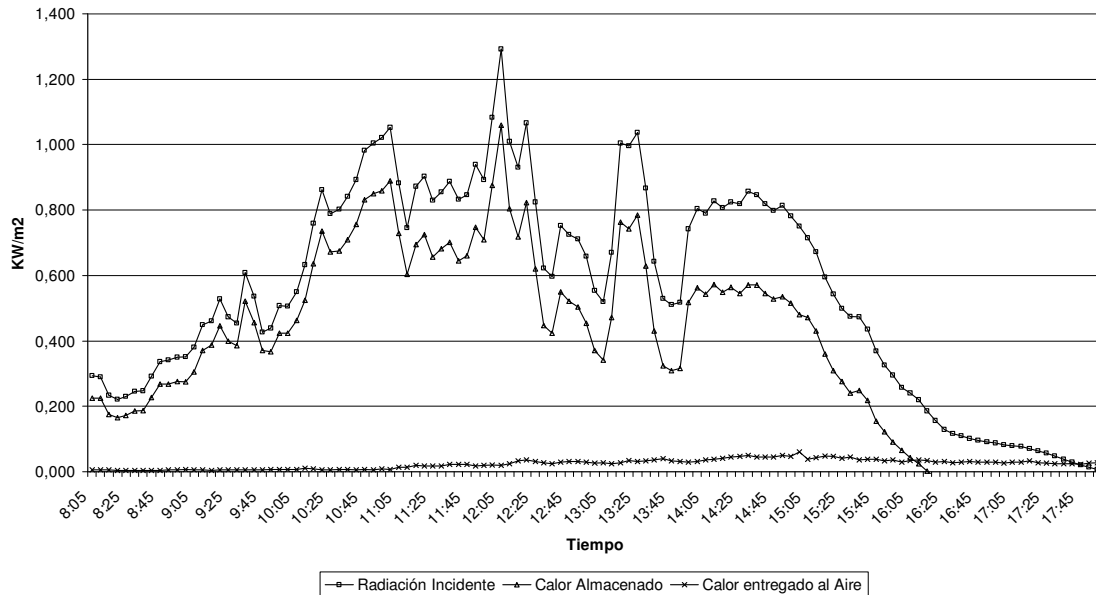
Calor Almacenado VS Tiempo
17/03/09



Calor Almacenado VS Tiempo
18/03/09



Calor almacenado VS Tiempo
19/03/09



- La cantidad calor almacenado es en realidad mayor al valor presentado en la tabla 4 pues hay intervalos de tiempo durante las horas de sol en los que el flujo neto de calor hacia el lecho de ladrillos es negativo, es decir no almacena si no que entrega calor al aire en éstos intervalos. Estos flujos netos negativos al aplicar el método del trapecio disminuyen el valor del calor almacenado a lo largo del día.
- Hemos observado un alto porcentaje de almacenamiento de la energía solar térmica incidente, alrededor de 65%, mientras que el porcentaje de ésta energía entregada al aire es alrededor de 4% a 5%. Esto se debe al pequeño flujo de aire que atraviesa el colector lo cual hace que llegue a su temperatura de salida con poca energía.
- Observamos que el colector continua suministrando aire a más de 40°C hasta poco menos de las 22:00 horas. Y continúa calentando aire a mas de 30°C hasta las 5:30 am del día siguiente.
- La diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de salida del aire, durante la noche, se mantiene como mínimo en 10°C. Esto significa que el colector aun contiene energía térmica al terminar la noche.
- En la bibliografía consultada encontramos una variedad de correlaciones para la convección forzada, pero la mayoría de ellas no se adapta perfectamente a las características del colector y del flujo dentro del mismo, por esto nos basamos en las correlaciones utilizadas por K.S. ONG (1995) en su evaluación de los colectores solares de placa plana para calentar aire.
- El máximo valor de temperatura alcanzado en el lecho es de 60,2°C para el 18 de marzo, 59,8°C para el 19 de marzo y de 56,9°C para el 17 de marzo.
- El máximo valor de salida de aire para el 18 de marzo es de 50,8°C, para el 19 de marzo de 53,8°C y para el 17 de marzo de 47,9°C.
- El flujo máximo de aire por hora en el colector fue entre 62 Kg/hora y 66 kg/hora. La baja eficiencia del colector se podría mejorar aumentando el flujo de aire, pero debemos tener en

cuenta que esto disminuirá la cantidad de calor almacenado por el lecho de ladrillos. La única razón por la que se utilizaron flujos pequeños de aire fue por la limitación de los anemómetros.

Presentación de contrastación de la hipótesis

Con los datos obtenidos y luego del procesamiento de la información descrito en el capítulo tres, se encontraron los siguientes parámetros para cada día.

TABLA: valores representativos calculados cada día.

Parámetros	17/03/2009	18/03/2009	19/03/2009
Calor Almacenado Total KJ/m ²	13871,12	14488,77	13778,26
Radiación Incidente KJ/m ²	20332,59	21990,31	19765,06
Calor Entregado al aire KJ/m ²	971,29	1213,16	836,01
% Radiación Incidente Almacenada	68,2	65,88	69,71
Eficiencia Como Calentador de Aire %	4,77	5,51	4,23

Fuente: Elaboración propia

En la tabla se observa claramente que el colector almacena energía térmica en el lecho de ladrillo mientras que a su vez calienta el flujo de aire que recorre en su interior.

A su vez podemos ver que porcentaje de la radiación incidente es almacenada por el lecho de ladrillos y que porcentaje se utiliza en calentar el aire, este último se denominó eficiencia como calentador de aire.

CONCLUSIONES

- Es interesante notar que en el colector estudiado el lecho de ladrillos entrega parte de su energía almacenada para mantener una temperatura promedio de salida del aire constante cuando la radiación solar no sería suficiente para elevar la temperatura del aire a este valor en un colector convencional.
- Para calcular el valor del calor almacenado a lo largo del día, se podrían tomar solamente los valores positivos de flujo neto de calor hacia el lecho de ladrillos.
- Los anemómetros utilizados limitan la capacidad de toma de datos y por tanto disminuye la rigurosidad del experimento así como restringe el análisis del comportamiento del colector.
- La evaluación del colector podría realizarse de manera más rigurosa si se utilizan anemómetro digitales de mayor sensibilidad con los cuales se registraría el flujo de aire con mayor precisión y mayor frecuencia.
- Para hallar que cantidad de energía entrega el colector durante la noche se tendría que tomar datos durante toda la noche, cosa que se hizo con las temperaturas pero fue imposible con el flujo de aire por las limitaciones antes expuestas.
- Se pueden realizar una variedad de experimentos con el colector, como son:
 - Cambiar el ordenamiento del lecho de ladrillos.
 - Utilizar doble cubierta.
 - Variar la separación entre cubierta y lecho.
 - Aumentar el flujo de aire
 - Acoplarlo a un equipo de secado de alimentos
 - Cambiar el material del lecho.

- Utilizar el aire caliente para calefacción
- Alimentar con aire caliente un Biodigestor.
- En cuanto a la distribución de temperaturas a lo largo del lecho de ladrillos sería interesante plantear el modelo matemático para nuestro colector y contrastar las predicciones que se lograrían con el mismo con datos reales colocando medidores de temperatura a lo largo del recorrido del aire y sobre la placa y cubierta del colector.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Thermal Performance of Solar Air Heaters: Mathematical Model and Solution Procedure**
K.S. Ong en Solar Energy Vol 55, 1995
2. **“Simulation of Solar Air Heating at Constant Temperature “**Abbud J. en Solar Energy, Vol 54, 1995
3. **“Transient Test Methods for Flat-Plate Collectors: Review and Experimental Evaluation”**
Amer E. en Solar Energy, Vol 60, 1997
4. **“Economics Design of a Rock Bed Storage Device for Storing Solar Thermal Energy”**
Choudhury C. en Solar Energy Vol 55, 1995
5. **“Solar Energy Termal Proceses”** Duffie J. Segunda edición Edit. Wiley & Sons Inc. U S,1974
6. **“Radiative Heat Transfer in a Solar Air Heater Covered with a Plastic Film”** Jannot Y. en Solar Energy, Vol 60, 1997
7. **“High Efficiency Solar Air Heater”** Mohamod A. en Solar Energy, Vol 60 1997
8. **“Thermal Performance of Solar Air Heaters Mathematical Model and Solution Procedure”**
Ong K. en Solar Energy, Vol 54, 1995
9. **“Comparative Analysis of Active and passive Solar Systems with Transparent Insulation”**
Peuportier B. en Solar Energy; Vol 54, 1995