

## COLECTOR DE AIRE CON ACUMULADOR DE AGUA PARA CALEFACCIÓN DE INVERNADEROS\*

S. Bistoni, A. Iriarte<sup>2</sup>, L. Saravia<sup>1,2</sup>  
INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa  
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca, Argentina. sbistoni@fcasuser.unca.edu.ar

**RESUMEN:** Los colectores solares de aire exteriores a los invernaderos son alternativas viables para la calefacción de los mismos. Debido a la baja capacidad calorífica del aire su empleo ha sido limitado. Por otro lado, dado que la entrega de la energía solar no es simultánea con la demanda es necesario contar con un almacenamiento de calor. En el presente trabajo se estudia, mediante simulación, la influencia que la colocación de rugosidades artificiales o el empleo de una matriz porosa tiene sobre el rendimiento de un colector de aire. Basado en este análisis se diseñó y construyó un colector con matriz porosa. Como sistema de acumulación se presenta un acumulador tipo lecho de agua y se describe su diseño y modelización. El ajuste de la simulación para el colector con matriz porosa como para el lecho de agua fue bueno.

**Palabras claves:** colector de aire, acumulación, calefacción de invernaderos

### INTRODUCCIÓN

En la calefacción del ambiente interior de invernaderos el fluido más conveniente para transferir calor es el aire, y los colectores solares de aire son por lo tanto los mejores candidatos para proveer aire caliente. En muchos diseños el aire está en contacto directo con la superficie calentada por el sol y se calienta cuando se lo hace circular sobre ella. Por razones prácticas, y debido a que no es simultánea la entrega de energía solar con la demanda de energía, es necesario almacenar el calor. Generalmente se hace circular el aire caliente a través de una cierta cantidad de algún material, colocado en el piso del invernadero, debajo de los bancos de cultivo en el exterior al mismo. Habitualmente se utiliza piedra para acumular el calor sensible (Lovseth J, 1980; Bistoni S. *et al.*, 2000).

En un trabajo anterior se construyó y modelizó un colector sencillo de aire con el objeto de calibrar y validar el software SCEPTRE (Becker D., 1998), basado en la analogía térmica – eléctrica, para que sirviera de herramienta confiable para la simulación (Bistoni S. *et al.*, 2003). Por otro lado, de los resultados obtenidos del estudio de este colector se vio la necesidad de mejorar la eficiencia del mismo. Una manera de hacerlo es utilizando el mismo colector pero aumentando el coeficiente de transferencia mediante el uso de aletas o de rugosidades artificiales. Otra forma es colocando una matriz porosa entre la cubierta y la placa colectora y haciendo circular el aire a través de ella.

El efecto de rugosidades artificiales ha sido estudiado extensivamente y se han desarrollado coeficientes y factores de fricción para las distintas situaciones. Cortes y Piacentini evaluaron el empleo de varilla cilíndricas transversales colocadas en la superficie del ducto (1990). Gupta *et al.* (1997) también estudiaron el empleo de varillas sobre la placa colectora y observaron que las varillas colocadas en la dirección del flujo resultaban más ventajosas que las varillas transversales al mismo. Lema *et al.* (2003) estudiaron el efecto de deflectores de flujo perpendiculares al mismo concluyendo que su uso no mejora el rendimiento del colector.

En el uso de matriz porosa existen estudios sobre el empleo de mallas de diferentes de materiales. Por ejemplo Varshney L. y Saini J. (1998) utilizaron una malla de alambres y estudiaron la influencia de distintos parámetros geométricos sobre la transferencia de calor.

En cuanto al almacenamiento de calor el principal problema relacionado con el empleo de un lecho de piedra es el gran volumen que se necesita debido al bajo valor del calor específico de este material. Este inconveniente se soluciona si se emplea otro material con mayor calor específico. Saravia *et al.* (2000) plantearon la utilización de botellas de plástico conteniendo agua como material acumulador y colocadas debajo de las piletas de cultivo hidropónico. Bistoni *et al.* (2002) construyeron un prototipo de laboratorio con el objeto de determinar las variables de diseño y de simulación de este tipo de lecho.

En el presente trabajo se estudia, mediante la simulación, el empleo de rugosidades artificiales y de matriz porosa y su influencia sobre la eficiencia del colector de aire. Se presenta el diseño, modelización y construcción de un colector con matriz porosa y de un lecho de agua como sistema de acumulación acoplado al mismo. Asimismo se presenta un modelo para el lecho y su resolución mediante el software SCEPTRE.

---

\* Parcialmente financiado ANPCyT, UNCa, INTA

<sup>1</sup> INENCO, U.N. Salta

<sup>2</sup> Investigador del CONICET

## CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Con la finalidad de diseñar un colector de aire más eficiente que el colector de simple paso con placa absorbidora de plástico negro y cubierta de plástico ya construido, se estudió, mediante simulación, el efecto que sobre el rendimiento del mismo tiene la colocación de rugosidades artificiales en la dirección de flujo y el empleo de una matriz porosa.

Se utilizó el mismo modelo empleado en la descripción teórica del colector de aire y la resolución de las ecuaciones de balance se realizó mediante la analogía térmica - eléctrica. El circuito eléctrico análogo fue resuelto mediante el software SCEPTRE. En la Fig. 1 se muestra el circuito eléctrico en versión del SCEPTRE.

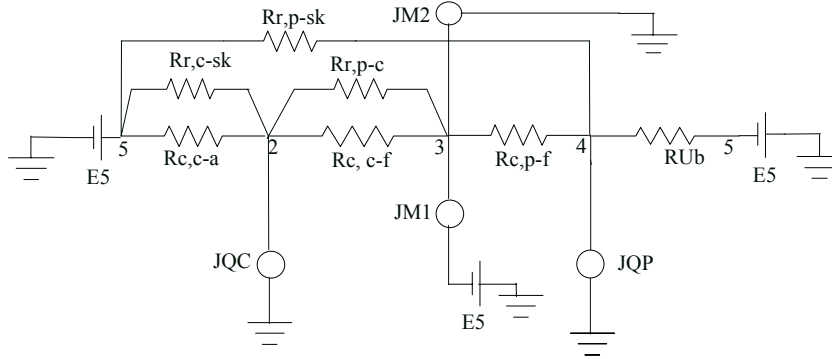


Fig.1. Esquema del circuito eléctrico para el colector de aire

El nodo 3 se refiere al aire dentro del colector, el 2 a la cubierta, el 4 a la placa y el 5 a temperatura ambiente. La fuente de tensión  $E_5$  es la temperatura ambiente representada en el programa mediante una tabla, las fuentes de corriente JQP y JQC tienen en cuenta la radiación solar que llega a la placa y a la cubierta respectivamente; las fuentes de corrientes JM1 y JM2 representan el flujo de aire dentro del colector, las resistencias  $R_r$  se refieren a las transferencias de calor por radiación, las  $R_c$  por convección y  $R_{U_b}$  las pérdidas por la base. Para obtener mayor precisión el colector se dividió en cuatro módulos

Para el cálculo del coeficiente de transferencia entre placa y fluido se adoptó las ecuaciones propuestas por Gupta para colectores de aire con placas absorbidoras con asperezas artificiales (1997):

Para  $e^+ < 35$

$$h_{p-f} = 0,0024(e/D_H)^{0,001}(W/H)^{-0,06}(Re)^{1,084} \exp\left[-0,475(1-\alpha/60)^2\right](k/D_H) \quad [1]$$

Para  $e^+ \geq 35$

$$h_{p-f} = 0,0071(e/D_H)^{-0,24}(W/H)^{-0,028}(Re)^{0,88} \exp\left[-0,475(1-\alpha/60)^2\right](k/D_H) \quad [2]$$

$e^+$  es el Número de Reynolds de las asperezas definido por:

$$e^+ = (e/D_H)\sqrt{f/2} Re \quad [3]$$

Se consideró  $\alpha = 60^\circ$  debido a que para este ángulo se tiene el máximo coeficiente de transferencia de calor. Para las superficies con rugosidades y para regímenes turbulentos el factor  $f$  es una función tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa  $e/D_H$ . La rugosidad relativa es el cociente entre la altura media de las salientes sobre la pared del conducto  $e$  y el diámetro hidráulico  $D_H$  del conducto y está dado por la ecuación:

$$f = 0,911(e/D_H)^{0,196}(W/H)^{-0,093}(Re)^{-0,165} \exp\left[-0,993(1-\alpha/70)^2\right] \quad [4]$$

En el caso del colector con matriz se tomó el mismo el coeficiente de transferencia de calor por convección entre placa y fluido pero multiplicado por un factor  $Z$  que es un factor de forma del absorbedor y se define como el cociente entre el área total del absorbedor y el área absorbedor normal a la radiación solar (Kabeel A. y Mecarik K., 1998).

## RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Se analizaron los valores de eficiencia térmica en función del flujo másico de aire para rugosidades relativas de 0,0125, 0,025 y 0,050 y valores de insolación de  $1000 \text{ W m}^{-2}$  y  $500 \text{ W m}^{-2}$ . Se observó que para caudales inferiores a  $0,40 \text{ kg s}^{-1}$  la eficiencia térmica es independiente de la rugosidad. Para caudales superiores se aprecia un aumento del 16 % entre la de un colector simple y uno con rugosidad relativa de 0,05.

Para el colector de matriz porosa se tomó  $Z=2$  y se consideró que su empleo aumenta el área de colección de la radiación solar en un factor 2.

Para la determinación de la eficiencia instantánea en cada situación se fijó, en el programa, la radiación solar en un valor fijo,  $900 \text{ W m}^{-2}$  y se hizo variar la temperatura inicial del fluido. El flujo másico de aire utilizado fue de  $0,90 \text{ kg s}^{-1}$ . En la Fig. 2 se muestra la eficiencia instantánea simulada en función de  $(T_f - T_a)/I$  para los tres tipos de colectores analizados: colector simple, con rugosidad relativa de 0,05 y con matriz porosa. Como se aprecia el aumento de la eficiencia cuando se utilizan rugosidades no es significativo, pero con el empleo de la matriz porosa ésta aumenta un 30 %. En virtud de estos resultados se decidió construir un colector de aire con matriz porosa.

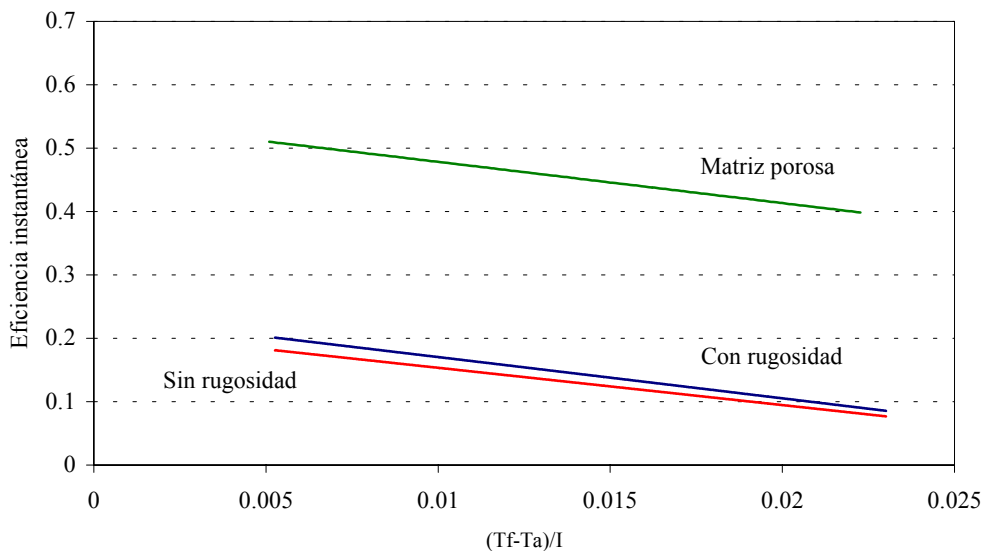


Fig.2. Valores simulados de la eficiencia instantánea para distintos colectores

### DESCRIPCIÓN DEL COLECTOR Y AJUSTE DEL MODELO

El colector está formado por una placa absorbidora de plástico negro de 9 m de largo por 1,80 m de ancho, con cubierta de plástico térmico con tratamiento UV transparente apoyada sobre una malla sima colocada en forma de arco y con una separación de 0,20 m en la parte más alta. El material utilizado como matriz porosa es una malla media sombra (80%) colocada formando dientes de sierra transversales al flujo de aire, siendo el paso de cada diente de sierra de 1m. El factor de forma del absorbedor resultó ser  $Z = 1,13$ .

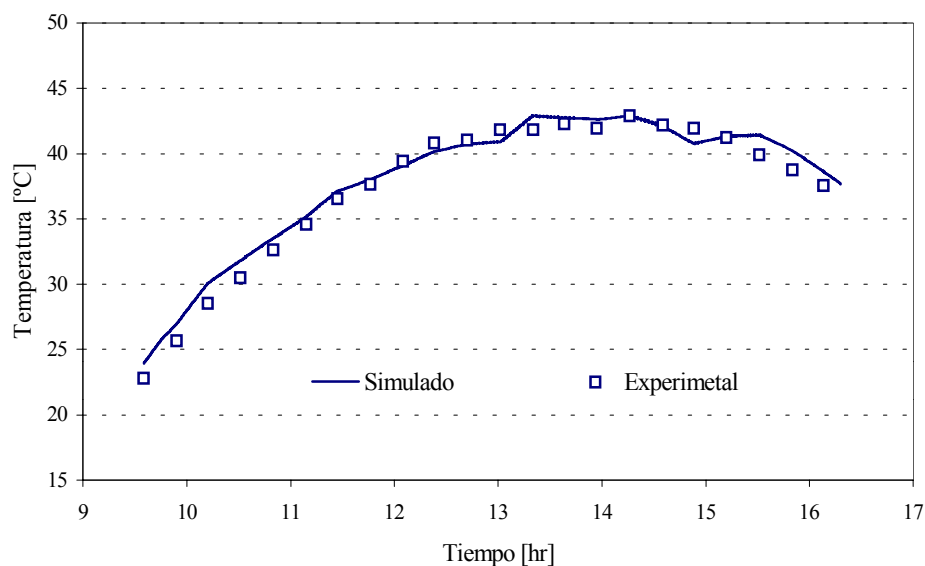


Fig. 3. Calibración del colector de matriz porosa con ajuste de la temperatura de salida del colector

Para calibrar el modelo planteado anteriormente se comparó la temperatura teórica y experimental del aire a la salida del colector. La variable de ajuste fue el área de colección de la radiación solar, resultando ser 2,5 veces el área del colector simple. En la Fig.3 se muestra el ajuste para un día de ensayo.

El monitoreo de las temperaturas se realizó mediante sensores LM35, distribuidos a lo largo del colector y a una distancia de 2 m entre ellos. Los sensores se conectaron a un sistema de adquisición de datos tipo NUDAM y los valores se registraron cada 10 minutos.

### DESCRIPCIÓN DEL LECHO DE AGUA Y AJUSTE DEL MODELO

Como sistema de acumulación de calor se diseñó un lecho de agua formado por botellas de plástico con agua en su interior. Para calcular el volumen de agua se consideró la cantidad de calor útil colectada por el colector con una eficiencia de 50 % para un día invernal. Considerando que llega al absorbedor  $10 \text{ MJ m}^{-2}$  de energía solar diariamente, la cantidad de calor útil diaria es  $5,0 \text{ MJ m}^{-2}$  por área de colección. Por otro lado como el balance de energía sobre el lecho de agua es  $Q_u = \rho_w c_p V_w \Delta T$ , para un salto térmico  $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  se obtiene un volumen necesario de agua de  $0,12 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$  por área de colección. De acuerdo al calor que puede ser suministrado por la placa absorbidora del colector, el volumen necesario de agua resultó ser de  $1,93 \text{ m}^3$ .



Fig. 4. Vista del colector de aire acoplado al lecho de agua e interior del mismo

Se construyó una estructura de madera de 1,80 m de ancho por 1,30 m de alto por 3,80 m de largo. La salida del colector se introdujo unos centímetros en la entrada del lecho. Entre esta pared y donde comienzan el bloque con botellas se dejó un pleno de 1 m para homogenizar el aire que sale del colector. Una longitud de 1,80 m está ocupada con las botellas y finalmente entre el último bloque y el ventilador hay otro pleno de 1m. Se colocaron cinco bloques de 17 botellas a lo ancho por 10 botellas a lo alto. Las botellas se ubicaron una encima de la otra, colocándose una placa de cartón entre fila y fila. Todo la estructura se cubrió con poliestireno expandido de 0,05 m de espesor y  $15 \text{ kg m}^{-3}$  de densidad y con dos capas de plástico negro y se apoyó sobre una base de suelo cemento de 0,15 m de espesor, Fig. 4.

El aire es succionado a través del colector y del lecho mediante un ventilador axial de 1.120 W, instalado a la salida del lecho, con un flujo másico de  $0,90 \text{ kg s}^{-1}$ .

Para la medición de temperatura se distribuyeron treinta termopares de Cu-Constantán dentro de las botellas y en el flujo de aire. El registro de las mismas se realizó cada 10 minutos con un sistema de adquisición de datos tipo NUDAM conectados a una computadora.

#### Modelo del lecho de agua

Para modelizar la transferencia de calor en el lecho de agua se utilizó el método del balance de calor. Se consideraron dos nodos: uno en el aire dentro del lecho y otro en el agua. Las ecuaciones que resultan son un sistema numérico implícito que deben resolverse simultáneamente.

La ecuación de balance para el nodo en el aire es:

$$m_{fi} c_{fi} \frac{dT_{fi}}{dx} = h_{c,fi-w} A_t (T_{fi} - T_w) \quad [5]$$

La ecuación de balance de calor para el agua es:

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = h_{c,fi-w} A_t (T_{fi} - T_w) - U_b A_b (T_w - T_s) \quad [6]$$

Se considera que el lecho solamente tiene pérdidas por conducción por la base.

La resolución del modelo se realizó empleando el software SCEPTRE. En la Fig.5 se muestra el circuito eléctrico equivalente para el lecho.

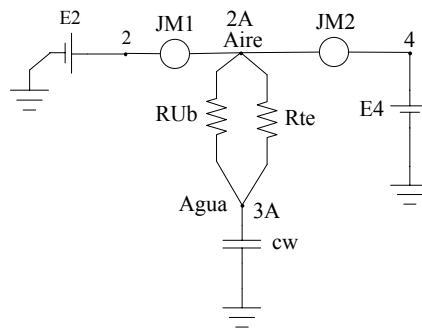


Fig.5. Esquema del circuito eléctrico para un módulo del lecho

Para mejorar la exactitud de los resultados, el lecho se dividió en 4 módulos (A,B,C y D), considerando que en cada uno de ellos la temperatura del agua y la del aire que circula entre las botellas son constantes. Los nodos 2A, 2B, 2C y 2D se refieren al aire entre las botellas estando conectados entre sí por fuentes de corriente, JM<sub>Q</sub>. Los nodos 3A, 3B, 3C y 3D se refieren al agua dentro de las botellas en los distintos sectores y se considera que el agua tiene concentrada su masa en esos nodos. En ellos se colocaron capacitores representando la acumulación de calor del agua. El valor de cada capacitor  $c_w$  se determinó multiplicando la masa promedio de agua (409,5 kg) que contiene cada módulo por el calor específico del agua. En los nodos correspondientes al aire no se conectaron capacitores ya que se consideró despreciable la acumulación de calor en el mismo. La fuente de tensión  $E_2$  representa la temperatura del aire a la entrada del lecho durante la carga, que corresponde a la temperatura del aire a la salida del colector y la fuente de tensión  $E_4$  representa la temperatura ambiente, exterior al lecho. Los valores de estas fuentes son los datos de entrada al programa. Las resistencias  $U_b$  y  $R_{te}$  representan las pérdidas de calor y la transferencia de calor entre el aire y el agua respectivamente. Para el coeficiente convectivo de transferencia entre el aire y el agua se tomó el valor  $30 \text{ W m}^{-2}$ , valor que se obtuvo de la simulación del prototipo de laboratorio. (Bistoni S. *et al.*, 2002). En la Fig.6 se muestra el ajuste del modelo para uno de los bloques de botellas.

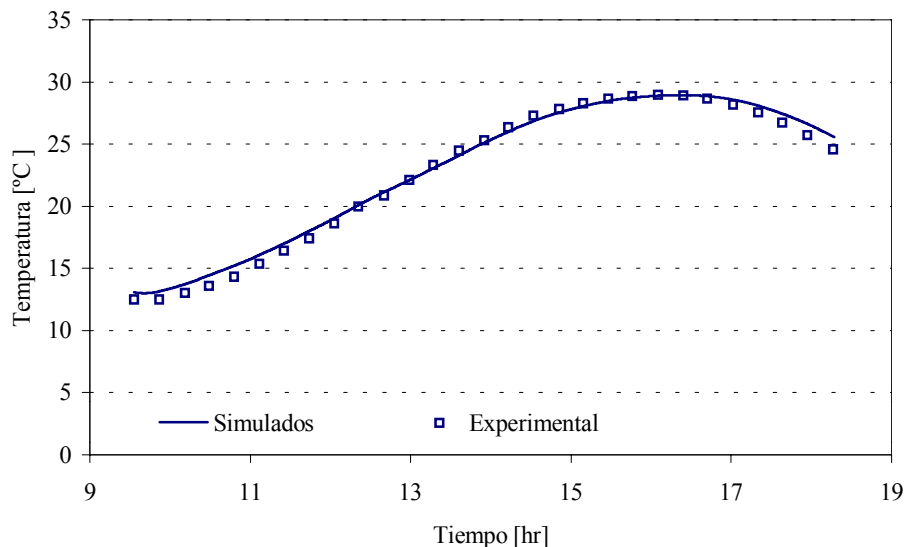


Fig. 6. Ajuste del modelo para un módulo del lecho respecto a temperatura del agua

## CONCLUSIONES

El software empleado para la resolución de las ecuaciones de balance resultó ser de fácil aplicación y una herramienta adecuada a lo hora del diseño.

El diseño adoptado para el colector mejoró le eficiencia del colector simple de aire construido y las ecuaciones utilizadas para el modelo resultaron ser las adecuadas ya que el ajuste según la temperatura de salida del aire fue bueno.

El uso de agua como material acumulador de calor permitió construir un acumulador de calor de dimensiones adecuadas, siendo económico y de fácil construcción. A pesar de ello es necesario mejorar la distribución del flujo de aire entre las botellas. Por otro lado el modelo adoptado para su simulación también fue correcto ya que el ajuste de la temperatura del agua resultó bueno.

Teniendo en cuenta las temperatura que se alcanzan y la factibilidad tanto económica como de mano de obra de este sistema colector – lecho de agua hacen que sea factible su empleo en la calefacción de invernaderos.

## NOMENCLATURA

e: altura de rugosidad [m]	$c_{fi}$ : Calor específico del aire dentro del lecho
$D_H$ : diámetro hidráulico [m]	$h_{c,fi-w}$ : coef. convectivo aire- agua
H: altura del ducto [m]	$A_t$ : área transversal del lecho
W: ancho del colector solar [m]	$U_b$ : coeficiente de pérdida por la base del lecho
Re: número de Reynold	$A_b$ : área de la base del lecho
$\alpha$ : ángulo de ataque de la rugosidad [°]	$Q_u$ : ganancia de calor [ $W m^{-2}$ ]
Z: factor de forma del absorbedor	$\rho_w$ : densidad del agua [ $kg m^{-3}$ ]
$T_f$ : temperatura media del fluido [°C]	$c_p$ : calor específico del agua [ $J kg^{-1}C^{-1}$ ]
$T_a$ : temperatura ambiente [°C]	p-f: placa- fluido
$T_{fi}$ : temperatura del aire dentro del lecho [°C]	c-f: cubierta- fluido
$T_w$ : temperatura del agua [°C]	c-sk: cubierta- cielo
$T_s$ : temperatura de la tierra a 0,50 m [°C]	p-sk: placa cielo
$m_w$ : masa de agua [kg]	p-c: placa- cubierta
$\dot{m}_{fi}$ : flujo másico de aire dentro del lecho [ $kg s^{-1}$ ]	c-a: cubierta-ambiente

## REFERENCIAS

- Becker D., Extended SCEPTRE, Vol. 1, User 's Manual, 1998.
- Bistoni S., Iriarte A. y Saravia L., Modelización de un acumulador de calor en lecho de agua, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 6, pp 08.67 – 08.72, 2002
- Bistoni S., Iriarte A., Luque V. y Saravia L., Caracterización de un acumulador de piedra con flujo de aire no reversible, Avances en Energías Renovables y medio Ambiente, Vol 4, N° 1, pp 02.63 - 02.68, 2000.
- Bistoni S., Iriarte A. y Saravia L., Análisis de un colector solar de aire, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 7, N°1 pp.02.01 – 02.06, 2003.
- Gupta D., Solanki S., Saini J., Thermohydraulic performance of solar air heaters with roughened absorber plates, Solar Energy, Vol 61, N° 1, pp 33-42, 1997.
- Kabeel A. y Mearik K., Shape optimization for absorber plates of solar air collectors, Renewable Energy, Vol 13, N° 1, pp 121- 131, 1998.
- Lema A, Miriani R., Sender G., Barral J. y Adaro J., Incidencia de la utilización de una cubierta transparente y de deflectores de flujo en el comportamiento de un colector solar calentador de aire de bajo costo, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 4, N°1, pp 03.01- 03.06, 2003.
- Lovseth J., A greenhouse system with energy storage and high level CO<sub>2</sub> atmosphere, Acta Horticulturae, Vol. II, N°115, pp 605-615, 1980.
- Saravia L., Echazú R., Quiroga M. Y Robredo P., Acumulador de agua para climatización de invernaderos armado con botellas de Pet, Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol 4, N° 1, pp 02.07 - 02.12, 2000.
- Varshney L. y Saini J., Heat transfer and friction factor correlations for rectangular solar air heater duct packed with wire mesh screen matrices. Solar Energy, Vol 62, N° 4, pp 255-262, 1998.

## ABSTRACT

Solar air heaters built out of greenhouses are possible ways to heating them. Because of low calorific capacity of air, its use has been limited. Furthermore, as the delivery of solar energy is not simultaneous to the energy demand, it is necessary to store heat. In the present work artificially roughened and porous matrix influences on the collector efficiency are studied by simulation. Based on this analysis, a matrix collector was designed and built. A water bed is presented as stored system and its mathematical model is described. Matrix collector and water bed calibration was good.