

## MODELIZACIÓN DE COLECTORES SOLARES DE BAJO COSTO \*

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

**RESUMEN:** Actualmente los sistemas de calefacción por agua caliente que son empleados tanto para el cultivo de plantas ornamentales en macetas, en fruticultura y horticultura comestibles, dentro de invernaderos, son de tuberías radiantes dispuestas a nivel de la cubierta vegetal o enterradas. Una de las formas posibles para calentar el agua es el uso de calentadores solares, con superficie colectora formada por bolsas plásticas. Éstos producen un aumento de la temperatura del agua apropiada para su empleo en aplicaciones agrícolas. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de simulación basado en las analogías eléctricas para los problemas térmicos. Se realizó la simulación de los colectores y se investigó la influencia de los parámetros que afectan su rendimiento. Los resultados de la simulación del modelo resultaron compatibles con los datos experimentales.

**Palabras clave:** simulación, colectores, analogía eléctrica

### INTRODUCCIÓN

La acción de la temperatura del suelo sobre el crecimiento de las plantas varía según la especie existiendo un umbral de temperatura, debajo del cual es posible producir efectos negativos en el ciclo vital de las mismas. (Matallana *et al.*, 1993).

Actualmente, los sistemas de calefacción por agua caliente que están siendo empleados tanto para el cultivo de plantas ornamentales en macetas, como en fruticultura y horticultura comestibles son de tuberías radiantes dispuestas a nivel de la cubierta vegetal o enterradas. Esta distribución de las tuberías de calefacción puede ser única en el invernadero o bien estar complementada con otros sistemas, como pueden ser el aerotermo o las tuberías metálicas en disposición aérea o perimetral.

En el INTA – Catamarca se está desarrollando un programa de producción de plantas de olivo en donde los esquejes (estacas) son colocados en un cámara con condiciones de temperatura y humedad perfectamente controlada. Una vez que estas estacas han enraizado son colocados en macetas y trasladados a otro invernadero con el objeto de conseguir que el sistema radicular comience a cumplir su función. En el olivo, según datos recogidos en el INTA– Catamarca, la máxima tasa de crecimiento se alcanza cuando se tienen temperaturas entre 15 y 25 C. Para lograr esta temperatura a nivel raíces se han construidos camas calientes en los canteros por donde circula agua caliente proveniente de un sistema de calefacción interior al invernadero (Iriarte *et al.*, 1998). Otra posibilidad es recurrir al uso de energía solar colectada en el exterior del invernadero y acumulada para las horas nocturnas. En este sentido es posible el uso de colectores solares planos convencionales, pero entre las dificultades para su utilización pueden mencionarse por un lado el costo elevado de los mismos y por el otro que se obtienen temperaturas relativamente altas para aplicaciones agrícolas.

En un trabajo anterior se ha discutido el diseño, construcción y funcionamiento de calentadores solares de agua de bajo costo, y que elevan la temperatura del agua aproximadamente a 30 C. Estos colectores presentan como placa colectora bolsas de plástico soldadas de tal forma que el agua que circula por ellas lo hace en forma de zig-zag. (Bistoni *et al.*, 1997). Como para todo colector solar el rendimiento depende de condiciones meteorológicas es útil el empleo de un modelo de simulación para realizar una evaluación exhaustiva de los mismos.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de simulación basado en las analogías eléctricas para los problemas térmicos, mediante el programa Sceptre (Saravia *et al.* 2000), que utiliza el método de variables de estado para la resolución numérica de los circuitos eléctricos. Mediante este programa se evalúa el rendimiento de los colectores solares de plástico y se investiga la influencia de los parámetros que afectan su rendimiento.

### DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los calentadores con superficie colectora de plástico, forman parte del sistema de calentamiento del agua que circula por las camas calientes. Son dos calentadores conectados en paralelo y colocados en el exterior del invernadero. Ambos colectores tienen la placa colectora formada por bolsas plásticas, de 0,50 m de ancho, soldadas en zig-zag, apoyadas sobre un enrejado de madera y colocadas dentro de una caja de chapa con papel de aluminio en la cara interior de la base. La caja no tiene ningún tipo de aislación. Los dos colectores se diferencian entre sí básicamente en la forma en que está

\* Parcialmente financiado por SEDECYT– UNCa – INTA

<sup>1</sup> Investigador del CONICET

<sup>2</sup> INENCO – Salta

colocada la cubierta. La cubierta es una placa de policarbonato alveolar de 0,006 m de espesor y está separada 0,08 m de las bolsas. Uno de los colectores (Colector N°1) presenta un área de colección de 2,10 m<sup>2</sup> y un área de apertura de 2,40 m<sup>2</sup> y la cubierta es fácilmente removible. El otro (Colector N° 2) tiene un área de colección de 2,20 m<sup>2</sup> y un área de apertura de 2,70 m<sup>2</sup>. En este colector la cubierta está sellada y el manejo de las bolsas se realiza por la parte superior de la caja. Ambos colectores están orientado hacia el norte y tienen una inclinación de 30° respecto a la horizontal.

A través de una bomba de ½ HP el agua circula desde un reservorio, aislado construido en el exterior del invernadero, ingresa a ambos colectores por la parte superior y se distribuye en las bolsas mediante microaspersores autocompensados colocados en una manguera de polietileno de 0.0125 m de diámetro. El agua se calienta a su paso por las bolsas y regresa al reservorio.

## EVALUACIÓN DE LOS COLECTORES

La determinación del rendimiento de los colectores es un paso importante y necesario para evaluar el rendimiento de los sistemas solares. Para determinar las características fundamentales de los colectores ensayados se utilizó el método de la eficiencia instantánea (Duffie *et al*, 1980). La eficiencia instantánea se calcula mediante la ecuación:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I}$$

Por otro lado la eficiencia instantánea de un colector convencional operando bajo condiciones estacionarias puede escribirse en función de la radiación que absorbe la placa y las pérdidas que se producen como sigue:

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_{en} - T_a)}{I}$$

en donde  $(\tau\alpha)$  es el producto de la transmitancia de la cubierta por la absorbancia de la placa colectora.

En el caso del colector con superficie colectora formada por bolsas plásticas, al término relacionado con la radiación absorbida es necesario sumarle otro que tenga en cuenta la fracción de la radiación que llega al fondo de la caja y que es reflejada hacia las bolsas por la cara aluminizada de la misma, es decir  $\tau_c \tau_b (1 - \alpha_{ca}) \alpha_b$ .

Por tanto la ecuación de eficiencia para este tipo de colector queda de la forma:

$$\eta = F_R [\tau_c \alpha_b (1 + \tau_b (1 - \alpha_{ca}))] - F_R U_L \frac{(T_{en} - T_a)}{I}$$

Para determinar experimentalmente la eficiencia instantánea se midió el flujo másico en cada colector, las diferencias de temperatura entre la entrada y la salida del agua para cada uno de ellos y la radiación incidente sobre el plano del colector

( $\beta = 30^\circ$ ). Los valores obtenidos se graficaron y ajustaron en función de  $(T_{en} - T_a)/I$

## DESARROLLO DEL MODELO

El modelo utilizado se basa en la analogía existente entre los procesos térmicos y los procesos eléctricos. En primer lugar se identifican los nodos y se conectan con elementos eléctrico representativos de los distintos fenómenos térmicos. Los coeficientes de pérdidas de calor se calculan como resistencias térmicas y se representan por resistencias eléctricas: RD para las pérdidas conductivas, RV para las pérdidas convectivas y RR para las radiativas. Los flujos de calor (JQ) y los flujos asociados a flujos de masa (JM) se representan por fuentes de corriente. La acumulación de calor sensible se esquematiza mediante capacitores (C) y las fuentes de tensión (E) representan valores de temperatura conocidos. Para determinar el valor de la temperatura en un nodo se utiliza como termómetro una fuente de corriente (JT) de valor nulo entre el nodo y tierra. El valor de la temperatura se mide con la diferencia de potencial de la fuente (VJT).

Para aplicar este modelo al calentador solar con superficie colectora plástica se consideraron los siguientes procesos de transferencia de calor:

- La radiación solar incidente es primero transmitida a través de la cubierta de policarbonato, luego a través del plástico de las bolsas con agua. Finalmente una fracción de ella llega a la caja en donde van colocadas las bolsas y es reflejada por la superficie aluminizada hacia la bolsa y absorbida por el agua.
- Existen fenómenos convectivos en el espacio entre: placa colectora (bolsas) – cubierta, placa colectora – caja, cubierta – aire exterior y caja – aire exterior.
- Se consideran pérdidas conductivas a través de la placa de policarbonato y a través de la caja de chapa que contiene a las bolsas colectoras.
- El intercambio radiativo infrarrojo se considera entre: cubierta – cielo, placa colectora – cubierta y placa colectora – cielo.

Desde el punto de vista eléctrico los nodos se ubicaron en: nodo 2 y 3 en las superficies exterior e interior de la cubierta respectivamente; nodo 4 en la parte media del espacio entre la cubierta y la placa colectora; nodo 5 representa la placa

colectora; nodo 6 se ubica en la línea media entre la placa colectora y la caja; nodos 7 y 8 en las superficies interior y exterior de la caja. Por último la temperatura del ambiente exterior se tomó como nodo 9 y como nodo 10 la temperatura de entrada del agua al colector.

A los fines de realizar el cálculo se dividió la superficie colectora en dos partes en la dirección vertical, y a cada parte se le asignó un circuito eléctrico unidos por una fuente de corriente (flujo de masa térmica). En la Fig. 1, se esquematizan los dos circuitos y se identifican los distintos elementos con las letras A y B de acuerdo a si se trata de la parte superior o inferior respectivamente. Como se muestra en la misma, a la placa colectora (nodo A5) llega una fuente de corriente (JMQ1) que representa el flujo de agua que ingresa a las bolsas con la temperatura de entrada y del nodo B5 sale una fuente de corriente (JMQ3) que corresponde al flujo térmico de salida del colector. También a estos nodos llega JQA2 y JQB2 representando la fracción de radiación solar que llega a la placa y JQA4 y JQB4 la fracción de radiación que llega por reflexión desde la parte aluminizada de la caja. Además los nodos A5 y B5 tienen cargados, cada uno, un condensador (CA1 y CA2) a fin de considerar la masa y el calor sensible que posee el agua acumulada en los conductos de la placa colectora.

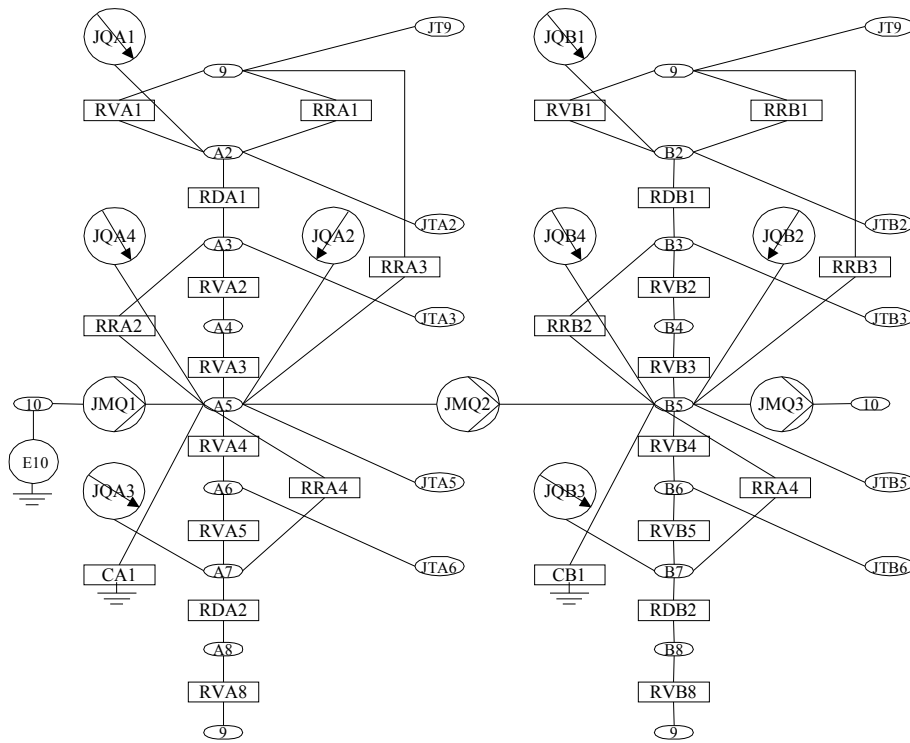


Fig. 1. Circuito eléctrico asociado al calentador solar de agua con superficie colectora de plástico

La radiación solar absorbida por las diferentes componentes del colector se calcularon como sigue:

- fracción de radiación solar absorbida por la cubierta (nodos A2 y B2):  $\alpha_c I A_c$
- fracción de radiación solar absorbida por la placa colectora (nodos A5 y B5) :  $\tau_c \alpha_b I A_b$  y  $\tau_c \tau_b (1 - \alpha_{ca}) \alpha_b I A_b$
- fracción de radiación solar absorbida por la caja:  $\tau_c \tau_b \alpha_{ca} I A_c$

Los coeficientes de transferencia de calor por radiación que se utilizaron para calcular las resistencias se determinaron mediante las siguientes ecuaciones:

$$h_{r(2-9)} = \frac{\epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_{sk}^4)}{(T_c - T_a)}$$

$$h_{r(5-3)} = \frac{\sigma (T_b^3 + T_b^2 T_c + T_b T_c^2 + T_c^3)}{\left( \frac{1}{\epsilon_b} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1 \right)}$$

$$h_{r(5-9)} = \frac{\epsilon_b \tau_c \sigma (T_b^4 - T_{sk}^4)}{(T_b - T_a)}$$

$$h_{r(7-5)} = \frac{\sigma (T_b^3 + T_b^2 T_{Al} + T_{Al}^2 T_b + T_{Al}^3)}{\left( \frac{1}{\epsilon_{Al}} + \frac{1}{\epsilon_b} - 1 \right)}$$

La temperatura de cielo se calculó mediante la ecuación (Duffie, 1980):

$$T_{sk} = 0,0552 T_a^{1,5}$$

Para calcular las resistencias convectivas se utilizaron los siguientes coeficientes:

$h_c$  entre nodos 2 - 9 y 8 - 9:  $12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ;

$h_c$  entre nodos 3 - 4 y 6 - 7:  $6 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ;

$h_c$  entre nodos 4 - 5 y 5 - 6 :  $9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ .

Para el cálculo de las resistencias conductivas se tomaron los valores  $0,036 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y  $107,32 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para las conductividades térmicas del policarbonato y de la chapa de la caja respectivamente.

## RESULTADOS Y DISCUSION

La Fig. 2 muestra los puntos experimentales de la eficiencia instantánea en función de  $(T_{en}-T_a) / I$  para los dos colectores del ensayo. Para el colector N° 1 la recta de ajuste es  $\eta = -12,6 (T_{en} - T_a) / I + 0,35$  mientras que para el colector N° 2 responde a la ecuación  $\eta = -21,1 (T_{en} - T_a) / I + 0,34$ . Como puede verse las ordenadas al origen de ambas rectas son aproximadamente iguales, lo que era de esperar ya que ambos colectores tiene prácticamente la misma placa colector. Por otro lado como las pendientes de las rectas están directamente relacionadas con el coeficiente global de pérdida ( $F_R U_L$ ), se advierte que en el colector N°2 las pérdidas son más importantes que en el colector N°1 y debiéndose fundamentalmente a las características de la caja.

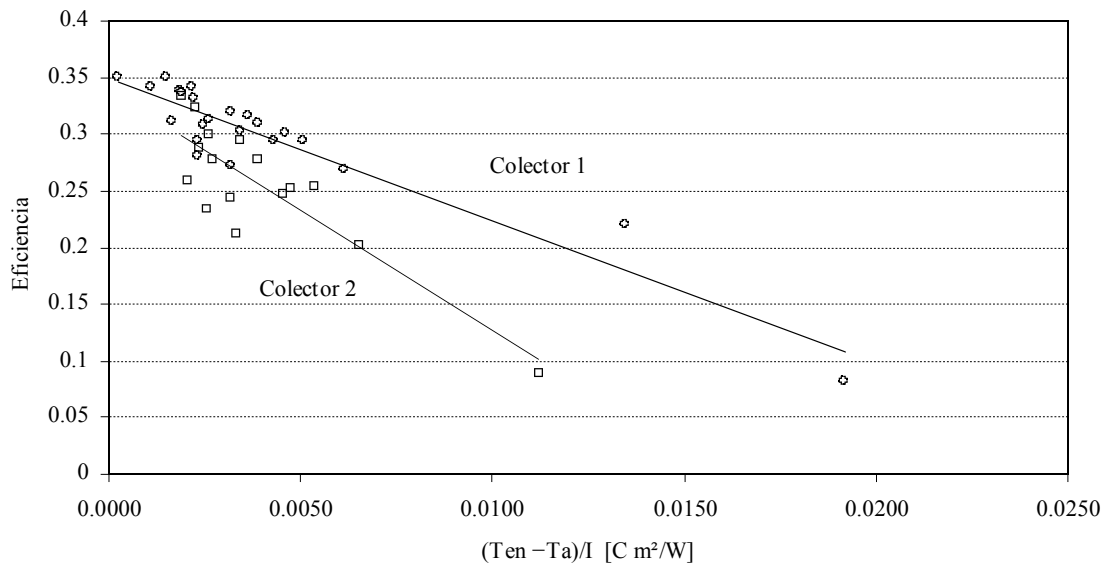


Fig.2. Eficiencias instantáneas experimentales para los colectores

Para validar el modelo se utilizaron los datos medidos durante el período de funcionamiento (10 horas - 17 horas). Como datos de entrada para la simulación se emplearon los valores de radiación solar global sobre superficie inclinada  $30^\circ$ , temperatura ambiente, flujo másico del agua y temperatura de entrada del agua al colector. Las condiciones del ajuste para las resistencias radiativas fueron  $\epsilon_c = 0,80$ ,  $\epsilon_b = 0,80$ ,  $\epsilon_b \tau_c = 0,14$  y  $\epsilon_{Al} = 0,22$  mientras que el porcentaje de radiación solar absorbido por las bolsas se tomó en un 30%.

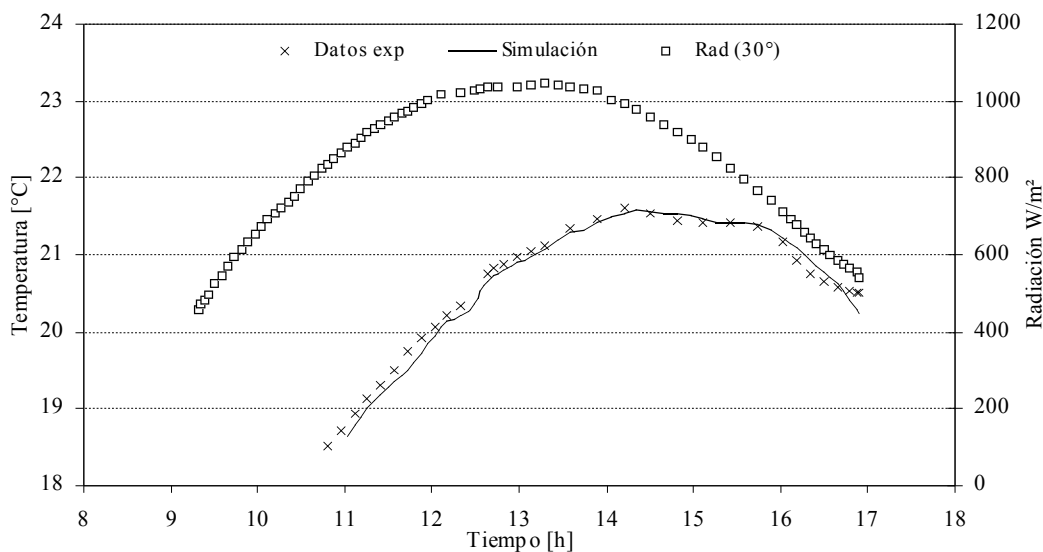


Fig. 3. Ajuste con el modelo circuital de la temperatura de salida del colector solar

La temperatura de salida del agua se determinó a partir de la simulación y se comparó con los datos experimentales. Los resultados se muestran en la Fig. 3, en donde se aprecia que los valores simulados concuerdan con los experimentales entre las 12,30 y las 17 horas. Entre las 10 y las 12,30 horas los valores experimentales son ligeramente mayores que los simulados, lo que se explica si se tiene en cuenta que cuando la bomba comienza a funcionar, el colector ya posee un cierto nivel de calor acumulado debido a la radiación incidente, hecho que no se tiene en cuenta en la simulación.

En general, el flujo másico del fluido circulante es uno de los parámetros que más afecta el rendimiento de los colectores solares. Por tanto, utilizando el modelo, se investigó la influencia de este parámetro sobre el calor ganado por el colector para flujos másicos comprendidos entre  $0,01 \text{ kg s}^{-1}$  y  $0,07 \text{ kg s}^{-1}$ , Fig. 4.

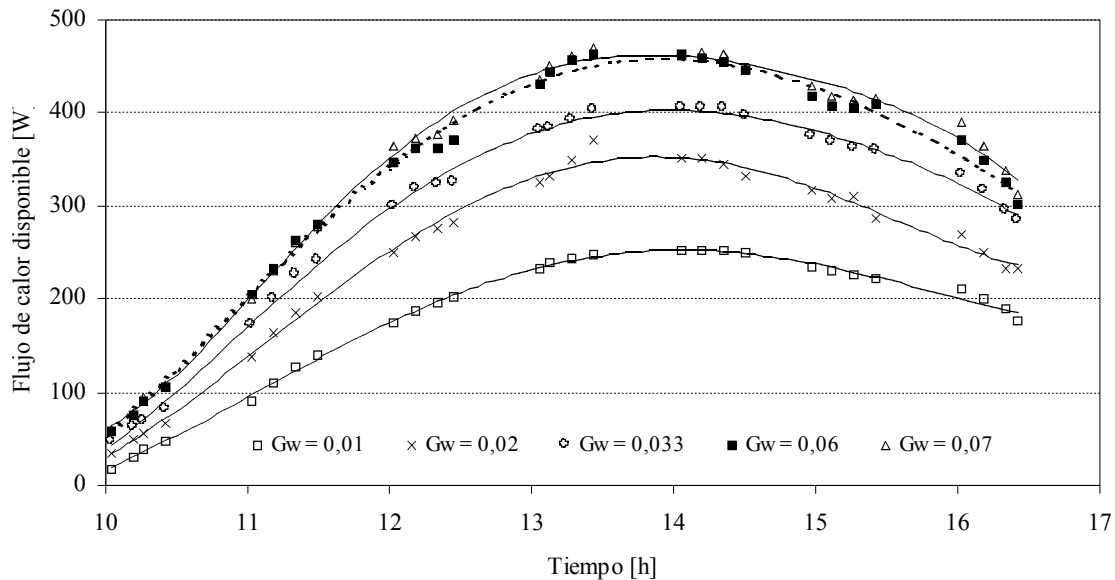


Fig. 4. Variación del flujo de calor útil para diferentes flujos másicos simulados mediante el modelo.

Como era de esperar a medida que aumenta el flujo másico se incrementa el calor ganado por el colector; pero como puede verse para flujos superiores a  $0,06 \text{ kg s}^{-1}$  éste se hace independiente del flujo de agua. Esta gráfica permite visualizar el nivel máximo del flujo másico admisible por el colector desde el punto de vista térmico. Además permite calcular la potencia de la bomba requerida sabiendo que la pérdida de carga de los microaspersores es de 20 m.c.a.

El modelo ha permitido realizar un gráfico para diseño (Fig. 5) el cual predice, en función del flujo másico y para una determinada hora del día, cuál será el salto de temperatura que se obtendrá en el agua circulante respecto a la radiación solar incidente, permitiendo además inferir, con la utilización de la Fig. 4, el flujo de calor disponible en un intervalo de tiempo determinado

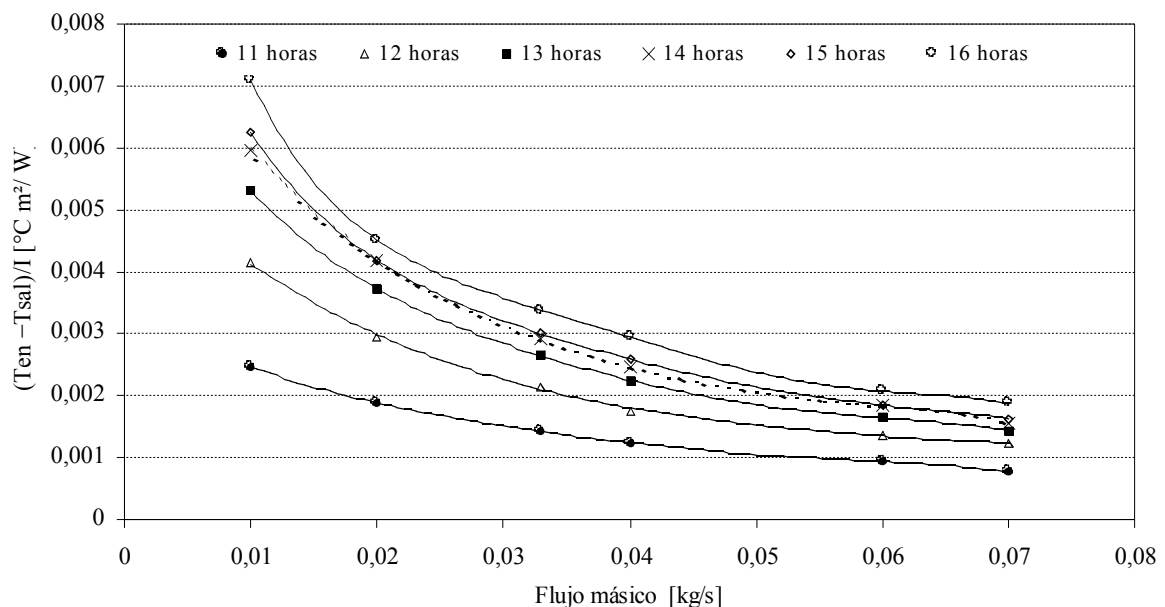


Fig. 5. Diagrama de funcionamiento para diferentes horas del día

Para flujos pequeños ( $0,01 \text{ kg s}^{-1}$ ) esta variación es fuertemente dependiente de la hora del día, mientras para flujos mayores a  $0,05$  la variación es menos dependiente del flujo y de la hora del día. Por otro lado entre las 14 horas y las 15 horas se observan que las curvas coinciden debido a la alta radiación solar incidente sobre la superficie del colector.

## CONCLUSIONES

Los calentadores solares con superficie colectora plástica, conectados en paralelo, se ensayaron durante los meses de invierno comprobándose que cumplen con las condiciones que se requieren para su empleo en aplicaciones agrícolas tal como es el caso del calentamiento de las camas calientes dentro de los invernaderos. La caracterización del colector desde el punto de vista de la eficiencia instantánea concuerda en general con los valores obtenidos anteriormente. Las diferencias obtenidas se deben fundamentalmente a cuestiones constructivas. Si se compara el rendimiento de los colectores N° 1 y N° 2 se recomienda el diseño del colector N° 1 porque además de ser más sencilla su construcción permite manejar las bolsas con mayor facilidad.

En cuanto a la simulación se puede concluir que los resultados obtenidos tienen un alto grado de correlación con los datos experimentales, lo que muestra que los coeficientes de transferencia utilizados en el modelo tienen valores razonables. Asimismo las figuras de caracterización del colector permiten obtener datos para diseño de instalaciones con las modalidades particulares de la aplicación a la que se destinarán los colectores.

## NOMENCLATURA

$W_s$	Flujo másico [ $\text{kg/s}$ ]
$T_{sk}$	Temperatura de cielo [K]
$T_{en}$	Temperatura del agua a la entrada al colector [K]
$T_{sal}$	Temperatura de salida del agua [K]
$T_a$	Temperatura ambiente [K]
$T_{Al}$	Temperatura de la superficie aluminizada [K]
$I$	Radiación solar global sobre superficie inclinada $30^\circ$ [ $\text{W m}^{-2}$ ]
$h_r$	Coefficiente de transferencia de calor radiativo [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$h_x$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]
$\epsilon$	Emitancia
$\alpha$	Absorbancia
$\tau$	Transmitancia
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzman
$F_R$	Factor de remoción del calor
$U_L$	Pérdida global de calor [ $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ]

### Subíndices

b	Bolsas con agua – Placa colectora
c	Cubierta
ca	Caja de chapa donde se coloca la placa colectora
Al	Superficie aluminizada

## REFERENCIAS

- Bistoni S., Iriarte A., 1997. Calentador solar de agua de bajo costo, Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente, Vol. 1, N° 1, pp. 89 – 92.
- Iriarte A., García V., Bistoni S., Saravia I., Matías C., 1998. "Invernadero rusticadero" para plantines de olivo: diseño y construcción. Avances en Energía Renovables y medio Ambiente, Vol 2, N° 1, pp. 1.41 – 1.44.
- Matallana A., Montero J., 1993. Invernaderos: diseño, construcción y ambientación. Ediciones Mundi Prensa, Madrid
- Saravia L., Saravia D., 2000. Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad. Avances en Energía Renovables y medio Ambiente, Vol 4, N° 2, pp. 8.17 – 8.23 .

**ABSTRACT:** The cultivation of ornamentals plants in pots, as in horticulture and fruit growing inside greenhouses, uses heating systems built with pipes at the level of the vegetal or underground. One of the possible ways to heat the water is by mean of solar collectors outside. The solar water heater with plastic absorbing surface is adequate for agricultural purposes. The object of this work is to develop a simulation model based in electric analogies for thermal problems. The influence of the parameters that affect their performance was determined. The results of the simulation was consistent with experimental data.