

## EL USO DE INVERNADEROS COMO COLECTOR SOLAR

M. Condori y L. Saravia\*

INENCO

Universidad Nacional de Salta

Buenos Aires 177, 4400, Salta, Argentina

FAX: 54-87-255489, E-mail: Condori@ciunsa.edu.ar

### RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un modelo analítico para el comportamiento de los invernaderos cuando son considerados como colector solar de aire forzado. Se obtiene una relación lineal entre la temperatura de salida del invernadero y la radiación solar incidente referida al suelo del mismo. Se muestran también, los datos experimentales para dicha relación a partir de ensayos con invernaderos sin cultivo. También, se presentan los registros de eficiencia instantánea para ocho días consecutivos de medición. Se obtiene, a partir del modelo y de los valores experimentales, los parámetros operativos del invernadero.

### INTRODUCCION

El aprovechamiento de los invernaderos como fuente de calentamiento del aire ambiente, especialmente en las épocas del año en las que no se cultiva en su interior, ha sido propuesto y utilizado en las aplicaciones de secado solar. De acuerdo a los prototipos anteriormente ensayados (Condori y Saravia, 1994; 1995), un secador invernadero consta básicamente de un colector solar y de un túnel de secado, integrados ambos bajo la cubierta del invernadero, aprovechando su estructura. El túnel, que también se construye con plástico transparente, ocupa una porción menor del invernadero mientras el resto funciona como colector solar de aire forzado con la ayuda de un ventilador

El esquema de funcionamiento del invernadero como colector es sencillo, el aire ambiente ingresa al interior a través de ventanas ubicadas sobre la cara norte de la cubierta y es calentado principalmente por transferencias de calor convectivas con el suelo. Dirigido por un ventilador el aire circula primero por la zona colectora, en donde se calienta, y luego a través del túnel para ser evacuado finalmente hacia el exterior.

La obtención de una curva de eficiencia para describir el comportamiento térmico de los invernaderos se hace difícil debido a las dimensiones de los mismos. Por otra parte, el hecho que el fluido de entrada se encuentra a temperatura ambiente, indica que el invernadero trabaja permanentemente sobre un sólo punto de la curva de eficiencia, su ordenada al origen. En lo que sigue, se presenta un modelo sencillo que permite obtener los parámetros operativos a partir de la medición de este punto de eficiencia en condiciones normales de funcionamiento.

### MODELO ANALÍTICO DEL INVERNADERO COMO COLECTOR

De acuerdo a la teoría de colectores (Duffie y Beckman, 1991), y debido a que el aire que ingresa al invernadero se encuentra a temperatura ambiente, la eficiencia térmica  $\eta$  sólo depende del factor de remoción de calor  $F_R$  y de los parámetros ópticos del invernadero, es decir:

$$\eta = F_R (\tau\alpha) \quad (1)$$

donde  $\tau$  es la transmitancia de la cubierta y  $\alpha$  el coeficiente de absorción de radiación medio del invernadero. La eficiencia instantánea también se puede definir en términos del calor útil:

$$\eta = \frac{C_p m_a (T_s - T_a)}{A_c I} \quad (2)$$

siendo  $I$  la radiación total incidente sobre superficie horizontal,  $A_c$  la superficie de colección,  $C_p$  el calor específico del aire,  $m_a$  el flujo másico del aire,  $T_s$  la temperatura de salida del invernadero y  $T_a$  la temperatura ambiente. La ecuación (2) permite determinar una relación lineal entre la temperatura  $T_s$  y la radiación  $I$ .

---

\* Investigador del CONICET

$$T_s = T_a + kI \quad (3)$$

donde la constante  $k$  queda definida como:

$$k = \frac{\eta A_c}{C_p m_a} \quad (4)$$

Por otra parte, en un balance sencillo de energía para el invernadero vacío se considera que la radiación solar absorbida se distribuye sólo entre el calentamiento del aire y las pérdidas térmica hacia el exterior

$$(\tau\alpha)A_c I = C_p m_a (T_s - T_a) + hA_p (T_s - T_a) \quad (5)$$

donde  $A_p$  es la superficie que corresponde a las pérdidas de calor y  $h$  el coeficiente global de pérdidas. En este balance, se ha considerado que la temperatura del invernadero es uniforme y no se consideró el calor almacenado en el suelo, ya que mucho de este calor retorna al invernadero a la noche. A partir de la ecuación (5) se determina nuevamente una relación entre la temperatura  $T_s$  y la radiación  $I$ , obteniendo otra expresión para la constante  $k$ .

$$k = \frac{(\tau\alpha)A_c}{C_p m_a + hA_p} \quad (6)$$

Si se elimina la constante  $k$  entre las ecuaciones (4) y (6), se determina la siguiente expresión para la eficiencia  $\eta$

$$\eta = \frac{(\tau\alpha)C_p m_a}{C_p m_a + hA_p} \quad (7)$$

y en consecuencia, aplicando la ecuación (1), se obtiene la siguiente expresión para el factor de remoción  $F_R$ :

$$F_R = \frac{1}{1 + \chi} \quad (8)$$

En estas dos últimas ecuaciones se observa que tanto  $\eta$  y  $F_R$  se comportan como constantes que dependen solamente de los parámetros operativos del invernadero. En particular,  $F_R$  es gobernada por la variable adimensional:

$$\chi = \frac{hA_p}{C_p m_a} \quad (9)$$

que relaciona los coeficientes correspondientes a las pérdidas térmicas y a la cantidad de calor transportado por el aire circulante.  $F_R = 0.5$  cuando ambos aportes son iguales, es decir  $\chi = 1$ . En el caso de los invernaderos  $\chi$  suele ser mayor que 1 disminuyendo así el valor del factor de remoción de calor. Por otra parte, la ecuación (7) muestra que se puede mejorar la eficiencia térmica del secador si se adoptan cualquiera de las siguientes alternativas, en donde se ha considerado los valores de  $\tau$ ,  $h$  y  $C_p$  como difíciles de variar:

1. incrementar  $\alpha$ , colocando superficies o materiales para mejorar la absorción en el suelo.
2. disminuir  $A_p$ , reduciendo las dimensiones del invernadero y de la cubiertas plástica, al mínimo posible.
3. aumentar  $m_a$ , regulando la potencia del ventilador.

Cuando se aplica al secado solar, la alternativa número 3 está condicionada también por el proceso de secado mismo, ya que el caudal de aire determina también la temperatura en el interior del túnel de secado y la velocidad de evaporación. La decisión de un adecuado valor para  $m_a$  requerirá de un compromiso entre la optimización del funcionamiento del sistema como colector y como secador a la vez.

## RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Para la validación del modelo se utilizan los valores medidos en varios ensayos de un invernadero vacío que fueron llevados a cabo durante el verano de 1994-1995.

La figura 1 muestra la temperatura ambiente y las temperaturas de los lados este y oeste del invernadero para dos días consecutivos de diciembre. El comportamiento térmico no es simétrico respecto al medio día solar y se observa que para un día completo las temperaturas medias más altas se producen en el lado este debido al calor almacenado en el suelo que es liberado durante la tarde.

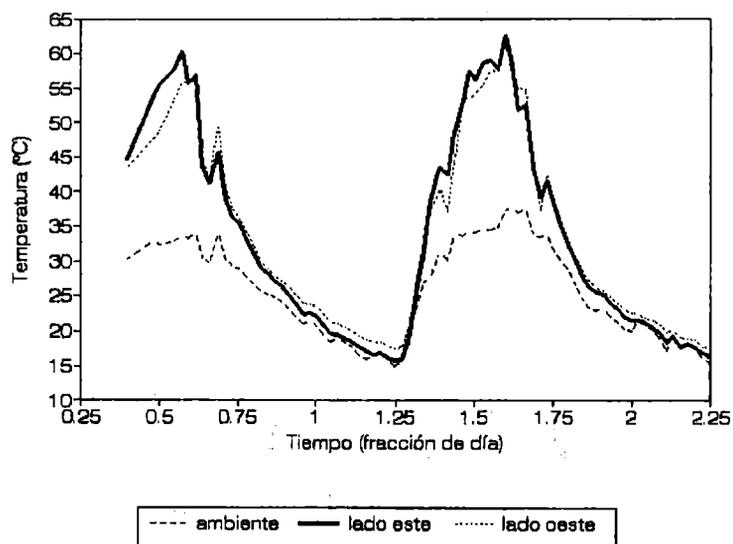


Fig. 1. Temperaturas a la salida del invernadero colector

La temperatura del invernadero siempre se mantuvo por encima de la temperatura ambiente siendo la máxima diferencia entre ellas de alrededor de 25 °C al mediodía. Esta diferencia disminuye a sólo algunos grados durante la noche. Las temperaturas de ambos lados están fuera de fase debido a la inercia térmica del suelo. Las condiciones de trabajo extremas del invernadero para días soleados fueron: una temperatura máxima próxima a los 60 °C y una humedad relativa mínima próxima al 10 %, esto representa un contenido de humedad de 14.5 gr de agua por kg de aire, que puede considerarse constante por ser un calentamiento sensible, siendo una característica de la zona una gran amplitud térmica entre el día y la noche.

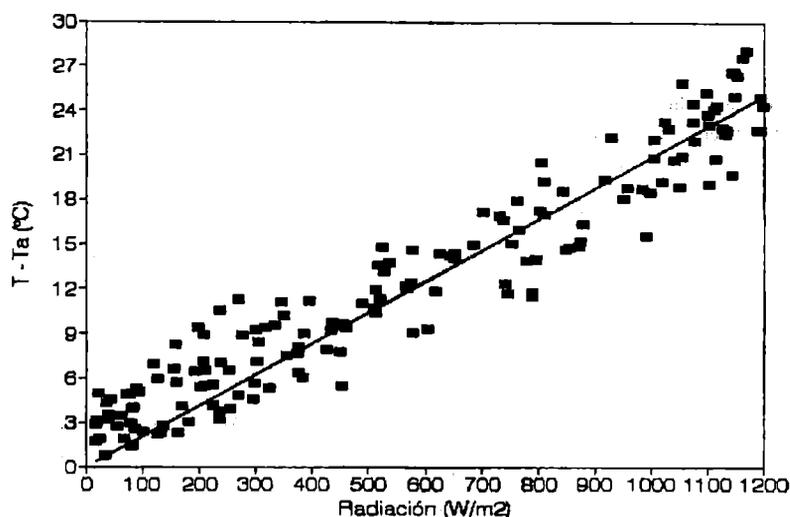


Fig. 2 Correlación y ajuste entre la temperatura del invernadero y la radiación

Como se vio anteriormente, el modelo establece una correlación lineal entre la temperatura del invernadero y la radiación. En la figura 2 se muestran los valores experimentales para dicha relación, donde se utilizaron los registros consecutivos de los primeros ocho días de diciembre. Los valores registrados corresponden a valores diarios y se observa que existe una ordenada al origen de unos 2 °C, que se debe principalmente a la inercia térmica que produce el suelo del invernadero.

$$T_s - T_a = 1.95 + 0.0185I \quad (9)$$

Dicha inercia enmascara los valores reales particularmente cuando la radiación solar es baja. No obstante esta dispersión de puntos se adopta una regresión lineal que pasa por el origen, ya que en el modelo no se consideró la acumulación de calor en el suelo:

$$T_s = T_a + 0.0208 \left[ \frac{^{\circ}\text{Cm}^2}{\text{W}} \right] I \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (10)$$

El coeficiente de ajuste de esta última correlación es 0.9 siendo un buen valor, como se muestra en la figura 2. Se ve también, que el ajuste es mejor para las mediciones de radiación con valores por arriba de los 400 W/m<sup>2</sup>. Utilizando la pendiente de esta regresión se pueden evaluar las pérdidas térmicas del invernadero, el resultado se muestra en la tabla 1.

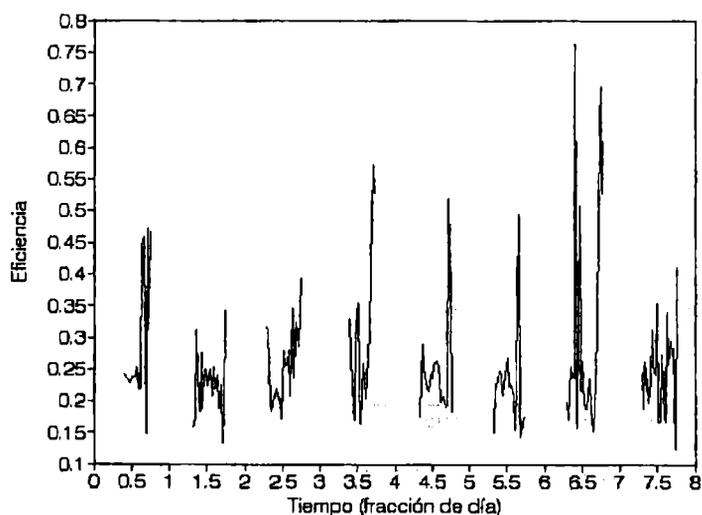


Fig.3 Eficiencia instantánea para los valores diarios de ocho días consecutivos

$$\begin{array}{ll}
 \tau\alpha = & 0.8 \\
 C_p m_a = & 1120 \text{ W/}^\circ\text{C} \\
 A_c = & 91 \text{ m}^2
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ll}
 hA_p = & 2600 \text{ W/}^\circ\text{C} \\
 \chi = & 2.32 \\
 F_R = & 0.30
 \end{array}$$

Tabla 1. Valores de los parámetros operativos del invernadero

En el valor de las pérdidas térmicas, la contribución es mayormente convectiva y debido principalmente a la gran medida de la cubierta del invernadero. La ecuación 7 muestra que la eficiencia térmica del invernadero como colector puede ser considerada con un valor constante. En nuestro caso la eficiencia es de alrededor del 24 %, considerando solamente el funcionamiento diario. En la figura 3 se muestra los registros diarios para la eficiencia instantánea, que corresponden a ocho días seguidos. Como es claro de ver, el valor medio se encuentra alrededor del valor esperado. Los picos abruptos fuera de este valor promedio son debidos al efecto de la inercia que mantiene la temperatura del invernadero por algunos minutos cuando la radiación ha disminuido.

## CONCLUSIONES

Se ha establecido una relación lineal entre la temperatura del invernadero y la radiación incidente sobre el mismo, cuando el invernadero es considerado un colector solar. A partir de las mediciones de los valores diarios de eficiencia se puede determinar la pendiente de dicha relación y los parámetros operativos del invernadero, en particular el valor de las pérdidas térmicas. La eficiencia medida corresponde al punto de la ordenada al origen de la curva y permanecerá casi constante durante el día, siendo sólo modificado por las pequeñas variaciones de  $(\tau\alpha)$ . El modelo se ha validado con una semana de medición y los resultados podrían ser extendidos para un comportamiento anual, restando aún su validación. Si bien, en el modelo no se considera el efecto de inercia térmica, el error en la estimación de la temperatura del invernadero es próximo a los 2 °C para radiaciones bajas, mejorando el ajuste cuando se considera valores de radiación alta.

## REFERENCIAS

- Condorí, M., Saravia L., Echazú R. y Cadena C. (1994). *Secadero Invernadero con Calefacción Auxiliar. Ensayos Preliminares. Actas de ASADES*, Rosario, pag. 389-396.
- Condorí, M., Saravia L. y Echazú R. (1995). *Secado de ajo y perejil en un secador invernadero asistido por calefacción auxiliar. Actas de ASADES*, San Luis, pag. 1.59-1.64.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª. edición, pp. 197-226. Wiley Interscience, New York.