

COLECTOR SOLAR TIPO INVERNADERO PARA SECADO[#]

S. Bistoni, A. Iriarte¹, V. Garcia, C. Rodríguez², M. Lara^{1,3} y V. Luque
INENCO, Catamarca. Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa
M. Quiroga 93 - 4700 Catamarca, Argentina, sbistoni@fcasuser.unca.edu.ar

RESUMEN: En el presente trabajo se presenta el diseño de un secadero solar que utiliza un invernadero como parte componente del colector solar. Se describen aspectos constructivos del colector de plástico interior al invernadero y de la cámara de secado y los resultados experimentales del funcionamiento del colector, como así también los resultados de un ensayo de secado de tomate. La distribución del flujo de aire en el colector y a través de la bandejas en la cámara de secado fue uniforme. Las temperaturas máximas obtenidas a la salida del colector fueron del orden de 60 °C para una radiación solar de 900 W m⁻². Se realizó una modelización usando la analogía térmica – eléctrica utilizando el programa SIMUSOL.

Palabras clave: deshidratación, secadero solar, invernadero

INTRODUCCIÓN

El secado es una forma rápida, sencilla y económica de deshidratar alimentos para su conservación. Consiste en la eliminación de gran parte del agua del producto procesado a través de una corriente de aire caliente, la cual proporciona el calor latente necesario para la evaporación del agua en el producto y se lleva la humedad desalojada.

Actualmente los secadores convencionales son utilizados por la agroindustria y son consumidores de altas cantidades de energía convencional (electricidad, gas, carbón y otras). Para uso familiar se utilizan los secadores tradicionales al sol en donde el producto a secar se coloca bajo el sol sobre suelo arenoso, enramadas, techos de ranchos o bien sobre cañizos especialmente contruidos para tal fin.

Una alternativa para el ahorro de combustible, en los secaderos convencionales es utilizar la energía solar como fuente de energía. En general, los secadores solares indirectos están integrados básicamente por tres partes fundamentales: a) colector solar de aire, b) cámara de secado y c) bandejas porta producto

En regiones en donde los invernaderos se utilizan solamente durante los meses de invierno, un modo de amortizar más rápidamente la inversión inicial en la infraestructura, es su empleo como colectores solares durante el verano (Condorí y Saravia, 1998).

Cuando el invernadero se utiliza como colector solar en un secadero, se acondiciona un sector del interior del mismo colocándole una lámina de plástico negro sobre el suelo para actuar como placa colectora y se le agregan sistemas auxiliares de calentamientos de acuerdo con las necesidades térmicas del proceso de secado. El análisis del comportamiento de este tipo secadero – invernadero fue estudiado para diferentes configuraciones, climas y condiciones de trabajo.

En su versión más simple el secadero – invernadero utiliza una sola cámara de secado, donde se coloca el producto fresco a secar. Una versión mejorada utiliza dos cámaras de secado: el invernadero es dividido en dos zonas una contiene producto semiseco y la otra el producto seco. Un ventilador bombea aire de la primera cámara a la segunda (Saravia *et al.*, 1988; Saravia *et al.* 1988; Sequi *et al.*, 1990). Posteriormente para mejorar la performance del proceso de secado se diseñaron secaderos- invernaderos tipo túnel. Básicamente consiste en la construcción de un túnel construido con plástico transparente ubicado en el interior del invernadero. El espacio sobrante del invernadero trabaja como colector solar de aire. (Saravia y Condorí, 1992; Iriarte *et al.* 1992). Los ensayos realizados demostraron la necesidad de incorporar sistemas auxiliares de energía (Iriarte *et al.*, 1993; Condorí y Saravia 1993; Saravia *et al.* 1993; Iriarte *et al.*, 1994; Condorí *et al.*, 1994; García *et al.*, 1998).

A pesar de las mejoras incorporadas a este tipo de secadero, es necesario aumentar el volumen de producción por metro cuadrado de colección solar. En este sentido se ha pensado utilizar un secadero solar en donde el sistema de colección y el gabinete estén separados.

En el presente trabajo se describe el diseño de un colector solar para un secadero. Esencialmente es un secadero convectivo convencional en que el sol actúa de fuente energética. El aire caliente que circula por el secadero proviene de colectores de plástico colocados dentro de un invernadero. Se destacan aspectos constructivos del colector de plástico interior al

[#] Parcialmente financiado por la UNCa, PDF, INTA

¹ Investigador del CONICET

² SUBCyTca

³ U.N.Rosario

invernadero y de la cámara de secado y los resultados experimentales del funcionamiento del colector y un ensayo de secado de tomate. La simulación se utilizó como herramienta para establecer pautas de diseño.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sistema

El sistema de secado solar que se analiza en este trabajo, está constituido por dos elementos: el colector mediante el cual a través de la radiación solar se calienta el aire y el gabinete de secado donde se coloca el producto. El secadero es del tipo indirecto, es decir, los dos partes constitutivas están separadas y la radiación solar no llega directamente al producto.

• **Colector solar**

El sistema de colección solar está formado por un invernadero más un colector de bajo costo construido dentro de él. Durante el período invernal el invernadero se utiliza para la producción de pimienta y tomate lo que disminuye el costo de la inversión al ser utilizado durante todo el año. Consta de dos macro túneles de 6,00 m de ancho por 50,00 m de longitud, 3,50 m de altura máxima, 2,00 m de altura en los laterales, y está construido en el predio del INTA - Catamarca. Sobre la superficie del piso del invernadero se coloca un plástico negro de 200 micrones para mejorar la absorción de la radiación solar cuando se utiliza como parte del secadero.

El colector de plástico construido dentro del invernadero es del tipo desarrollado por Bistoni *et al.* (2003). Consta de una cubierta de plástico transparente apoyada sobre una malla tipo Sima de 0,15 por 0,15 m pintada de blanco de 30 m de longitud por 2,15 m de ancho. La cubierta forma con el absorbedor un ducto semicircular por donde circula el aire.

La superficie absorbidora es la parte del piso del invernadero que queda debajo de la cubierta. El cerramiento no es hermético pero esto no implica pérdida de flujo de aire, debido que el ventilador succiona el aire a través del ducto formado por la cubierta y el piso. Las dimensiones del colector son: 30 m de longitud, 1,15m de ancho; por una abertura de ducto máxima de 0,50 m.

En la figura 1 se muestran detalles del invernadero y en la figura 2 se puede observar el colector de plástico construido en su interior.



Figura 1. Vista del invernadero en producción de pimienta y tomate



Figura 2. Vista del colector de plástico

• **Gabinete de secado**

El gabinete de secado es exterior al invernadero. Tiene una capacidad de 400 kg de producto fresco por carga. Está construido con estructura y planchas lisas metálicas con aislación térmica de 0,05 m de espesor. Sus dimensiones son: 4,70 m de largo por 2,50 m de altura y 2m de ancho, figura 3. En la parte superior del gabinete, figura 3, posee un ducto para el retorno del aire al invernadero de 1,80 m de ancho por 0,60 m de altura. En el lateral colindante con el invernadero dispone de una abertura donde están los ductos para los ventiladores (circuito para el flujo de aire). En el lateral opuesto dispone de una puerta por donde entran y salen los carros portabandejas.

Las torres portabandejas están construidos con estructura metálica de 1,40 m por 0,90 m. Las bandejas, construidas con barras de hierro y malla tipo pajarera, se encajan una sobre otra. Cada carro tiene capacidad para 17 bandejas. Todo el carro se envolvió con plástico transparente para formar un túnel y asegurar de esta forma que todo el aire proveniente del colector circule por las bandejas.

• **Circulación de aire**

El aire es impulsado por dos ventiladores axiales de ¼ HP cada uno, de 0,60 m de diámetro, colocado en una estructura en forma vertical, entre el invernadero y la cámara. Se dispone de un pleno de aire de 1,90 de longitud por 0,90 de ancho y 1,45 m de alto antes del sector de las bandejas. El ducto está construido por una estructura metálica recubierta con plástico negro. El aire que regresa del gabinete de secado entra al invernadero por la parte superior del lateral del mismo, figura 3 y figura 4



Figura 3. Vista del pleno de estabilización del aire y del ducto de retorno indicado por la flecha



Figura 4. Vista del colector, pleno y cámara

En la figura 5 se aprecia un esquema del sistema, colector- secadero y los circuitos de circulación del aire.

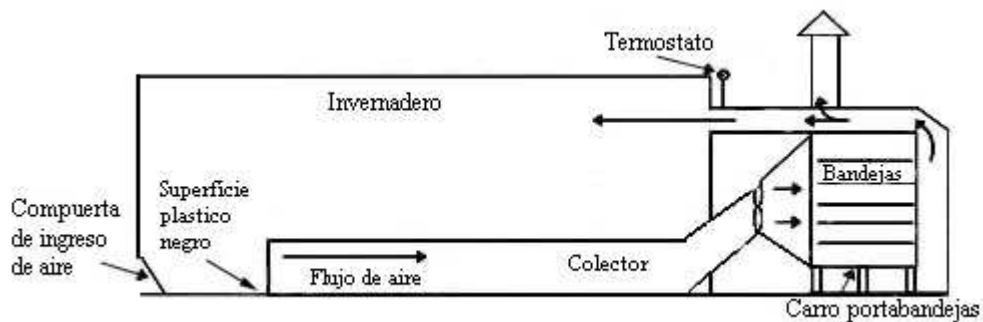


Figura 5. Esquema del sistema secadero - invernadero

Evaluación térmica experimental del secadero solar

La determinación de la temperatura se realizó mediante la instalación de termopares cobre-constantan en distintos puntos del invernadero, del colector y del gabinete de secado. Estos sensores se conectaron a sistemas de adquisición de datos tipo ADAM.

La eficiencia global del sistema colector solar se determinó mediante la ecuación [1] y en dos situaciones de cálculo: una considerando al colector en conjunto con el invernadero, para lo cual se usó la temperatura ambiente exterior como entrada de aire y la otra en donde la temperatura de entrada al colector fue la temperatura del ambiente interior del invernadero.

$$\eta = \dot{m} c_p (T_s - T_e) / I A_c \quad [1]$$

η : eficiencia global [%]

\dot{m} : flujo másico de aire [kg s^{-1}]

c_p : calor específico del aire [$\text{J } ^\circ\text{C}^{-1}\text{kg}^{-1}$]

T_s : temperatura de salida [$^\circ\text{C}$]

T_e : temperatura de entrada [$^\circ\text{C}$]

I : irradiancia sobre superficie horizontal [W m^{-2}]

A_c : área de colección [m^2]

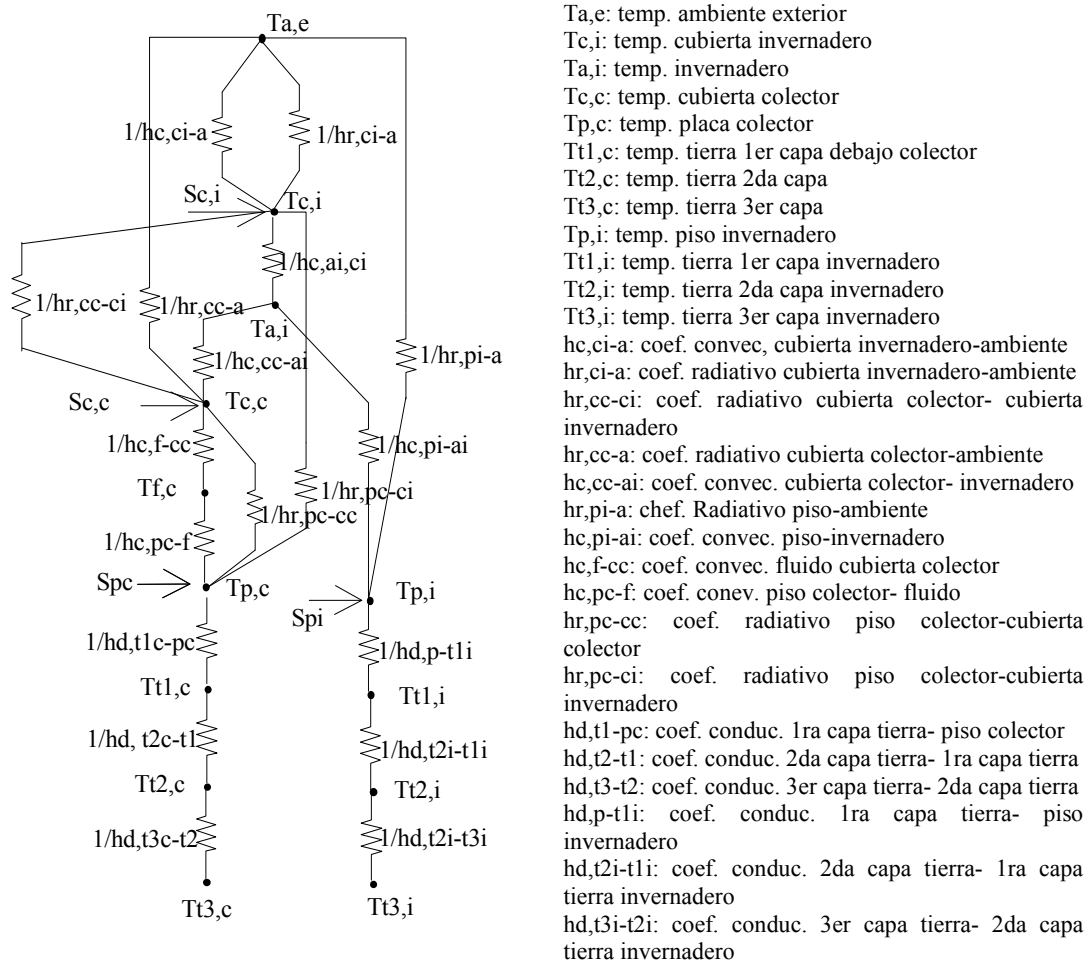
Modelo teórico del invernadero con colector de plástico incorporado

A efectos de construir la red térmica del colector – invernadero, se consideraron los siguientes procesos de transferencia de calor:

- La radiación solar incidente es primero absorbida y transmitida a través de la cubierta de polietileno transparente del invernadero, una fracción llega al piso del invernadero y la otra a la superficie del colector. De la radiación que llega a la cubierta del colector parte es absorbida por la misma y la otra incide sobre el absorbedor del colector.
- Se consideran fenómenos convectivos en el espacio existente entre: la cubierta del invernadero y la cubierta del colector; la cubierta y el piso del invernadero; la cubierta y el absorbedor del colector; y la superficie exterior del invernadero y aire ambiente.

- Las pérdidas conductivas se evalúan a través de tres capas del piso del invernadero y debajo del colector.
- Además de la radiación solar incidente, se consideró el intercambio radiativo infrarrojo entre: cubiertas y ambiente, piso y cubierta, placa colectora y ambiente, placa colectora y cubierta del colector.

En la figura 6 se muestra la red térmica correspondiente.



- Ta,e: temp. ambiente exterior
- Tc,i: temp. cubierta invernadero
- Ta,i: temp. invernadero
- Tc,c: temp. cubierta colector
- Tp,c: temp. placa colector
- Tt1,c: temp. tierra 1er capa debajo colector
- Tt2,c: temp. tierra 2da capa
- Tt3,c: temp. tierra 3er capa
- Tp,i: temp. piso invernadero
- Tt1,i: temp. tierra 1er capa invernadero
- Tt2,i: temp. tierra 2da capa invernadero
- Tt3,i: temp. tierra 3er capa invernadero
- hc,ci-a: coef. convec. cubierta invernadero-ambiente
- hr,ci-a: coef. radiativo cubierta invernadero-ambiente
- hr,cc-ci: coef. radiativo cubierta colector- cubierta invernadero
- hr,cc-a: coef. radiativo cubierta colector-ambiente
- hc,cc-ai: coef. convec. cubierta colector- invernadero
- hr,pi-a: coef. Radiativo piso-ambiente
- hc,pi-ai: coef. convec. piso-invernadero
- hc,f-cc: coef. convec. fluido cubierta colector
- hc,pc-f: coef. convec. piso colector- fluido
- hr,pc-cc: coef. radiativo piso colector-cubierta colector
- hr,pc-ci: coef. radiativo piso colector-cubierta invernadero
- hd,t1-pc: coef. conduc. 1ra capa tierra- piso colector
- hd,t2-t1i: coef. conduc. 2da capa tierra- 1ra capa tierra invernadero
- hd,t3-t2i: coef. conduc. 3er capa tierra- 2da capa tierra invernadero
- hd,p-t1i: coef. conduc. 1ra capa tierra- piso invernadero
- hd,t2i-t1i: coef. conduc. 2da capa tierra- 1ra capa tierra invernadero
- hd,t3i-t2i: coef. conduc. 3er capa tierra- 2da capa tierra invernadero

Figura.6. Red térmica del sistema invernadero- colector

Modelo de simulación

El modelo utilizado se basa en la analogía eléctrica; las simulaciones se realizaron mediante el programa SIMUSOL que calcula numéricamente el funcionamiento transitorio de distintos sistema físicos (Saravia y Saravia, 2000). El SIMUSOL utiliza como base para realizar los cálculos el programa SCEPTRE y para la entrada de datos el programa DÍA que permite el trazado de elementos que representan los sistemas térmicos y segmentos que los unen formando diagramas. Los resultados se presentan en forma gráfica utilizando el programa GNUPLOT.

Teniendo en cuenta el circuito térmico se construyó el circuito utilizando el SIMUSOL. El colector se dividió en cinco módulos para obtener mayor precisión en los cálculos realizados durante la simulación. El ajuste del modelo se realizó comparando la temperatura de salida simulada del colector con los valores experimentales y las variables de ajuste fueron los coeficientes conductivos y convectivos en superficie de captación del invernadero.

Se consideraron nodos en: temperatura ambiente y de cubierta de invernadero, temperatura ambiente interior del invernadero, temperatura cubierta de colectores, temperatura del aire en el interior de los colectores, temperatura de la placa colectora de colectores, temperatura del piso del invernadero, temperatura de tierra en tres capas debajo de los colectores.

En la Fig. 7 se muestra el circuito en SIMUSOL. Solamente se grafican los circuitos correspondientes al primer módulo del colector y el del invernadero. Los distintos módulos del colector están unidos mediante fuentes de corrientes que representan el flujo másico de aire circulante. El circuito del invernadero está conectado al primer modulo del colector mediante el punto doble “5”.

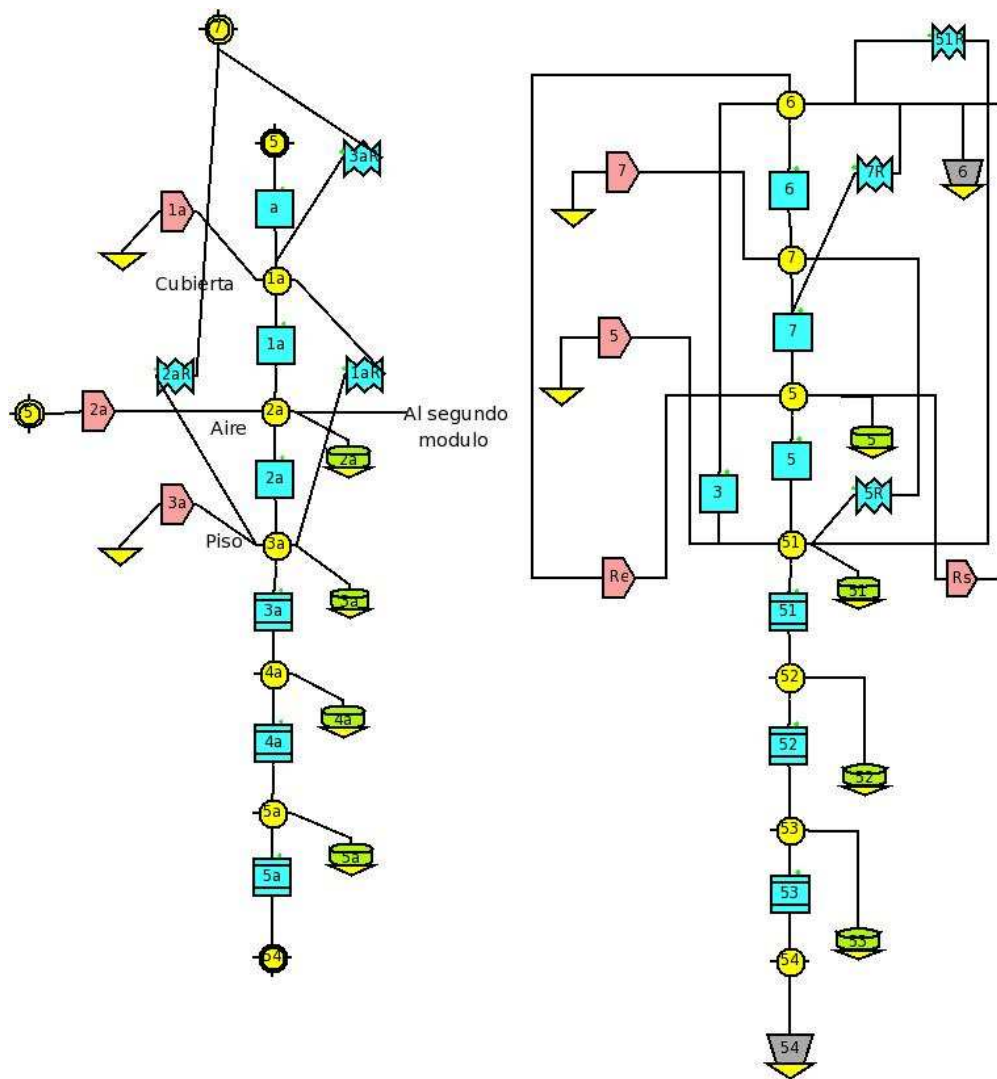


Fig.7. Circuito del colector solar en SIMUSOL

Ensayo de secado

El sistema completo se evaluó primeramente sin producto en el gabinete para comprobar la homogeneidad de la velocidad del aire. Posteriormente se realizó un ensayo de secado de tomate tipo perita. En cada bandeja se colocaron testigos a los que se le determinó el peso cada cinco horas durante las horas de sol.

Los tomates fueron cortados de dos maneras: en gajos y en rodajas. Las primeras nueve bandejas, contadas desde abajo, se cargaron con tomates en gajos, y las restantes con el producto en rodajas.

En la figura 8 se muestra la carga de una torre portabandeja, y en la figura 9 el ingreso a la cámara de secado con el recubrimiento de plástico para homogeneizar la distribución de velocidades en las distintas bandejas.



Figura 8. Vista de la carga de tomate en la torre



Figura 9. Vista ingreso de la torre portabandeja

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Evaluación del comportamiento del colector solar

En la figura 10 se muestra la evolución de las temperaturas en distintos puntos del colector solar, la irradiancia durante tres días de ensayo y la temperatura ambiente exterior para esos días. Como se aprecia hay un aumento significativo de la temperatura de salida del colector respecto a la ambiente interior del invernadero. Se observa también que la temperatura del invernadero en el tercer día llega a valores inferiores a los del primer día, esto se debe a la baja radiación que hubo el día anterior. En cambio la temperatura del aire a la salida del colector aumenta rápidamente, ya que no tiene prácticamente masa.

El sistema presenta una eficiencia global promedio del 12 % cuando se la calcula considerando la temperatura de entrada de aire al invernadero + colector como la temperatura ambiente exterior. En cambio, si se considera la temperatura ambiente del invernadero como temperatura de entrada al colector de plástico se obtiene una eficiencia global del colector del 14 %.

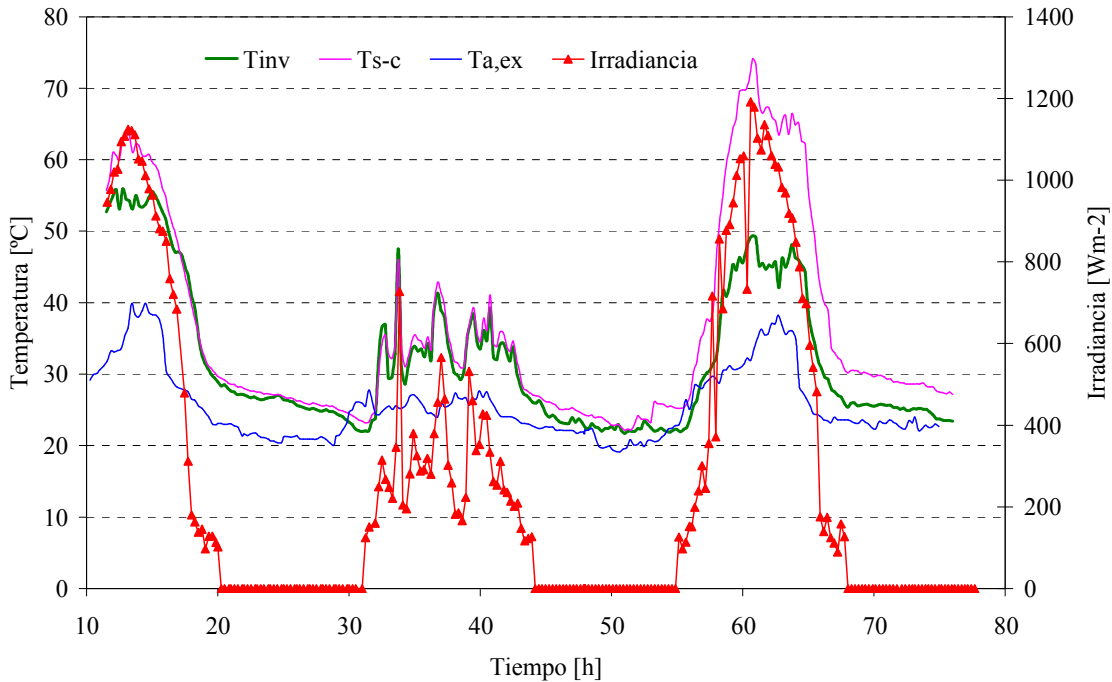


Figura 10. Variación temporal de las temperaturas en el sistema de colección e irradiancia

Simulación del sistema de colección

La figura 11 muestra los resultados de tres días de simulación del sistema de colección, invernadero más colector de plástico.

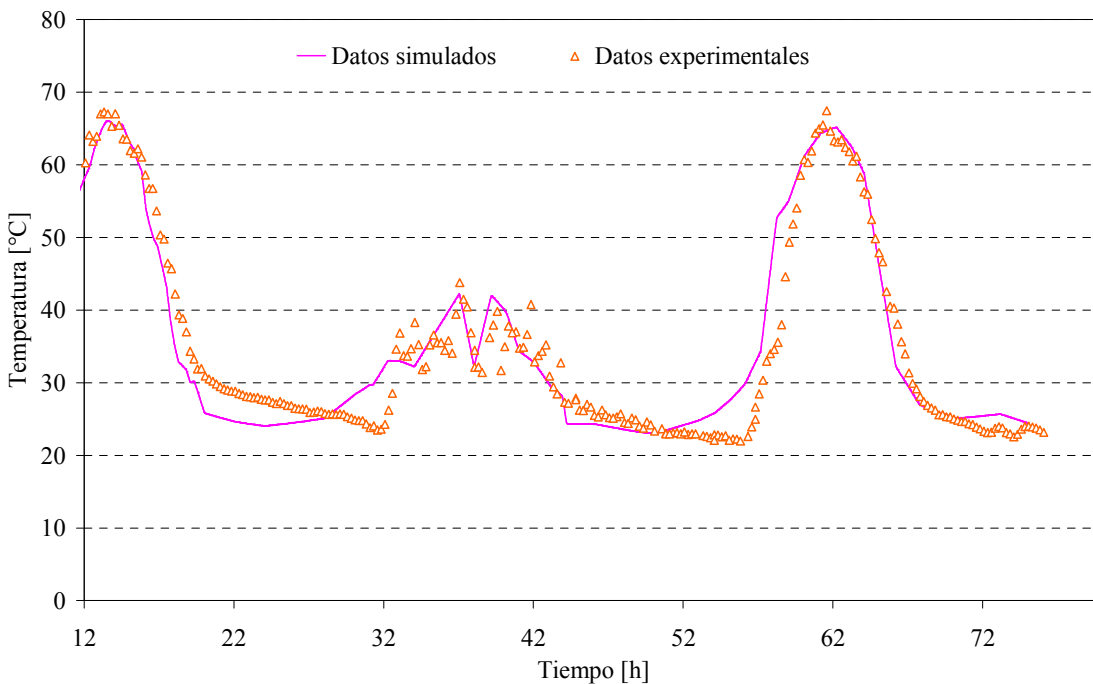


Figura 11. Ajuste de la temperatura de salida del sistema de colección

Para el ajuste se comparó la temperatura de salida del colector con los datos experimentales. La desviación promedio de todos los ajustes realizados durante el mes de ensayo fue de 2 °C y el error relativo porcentual promedio de 4 %.

Ensayo de secado

En el ensayo de secado se cargaron 136,5 kg de tomate, distribuidos en 17 bandejas colocadas en una torre portabandejas. La velocidad promedio del aire en el gabinete fue de 1 m/s. En la figura 12 se muestran las curvas de secado de bandejas con productos cortados en gajos y en la figura 13 las correspondientes al producto en rodajas. Como era de esperar el producto en rodajas se secó más rápido por tener una relación área - volumen mayor.

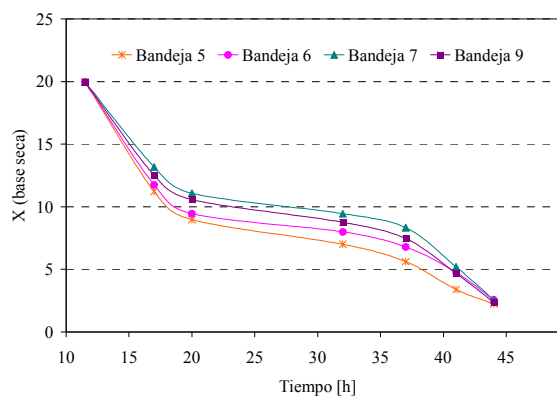


Figura 12. Curva de secado de tomate en gajos

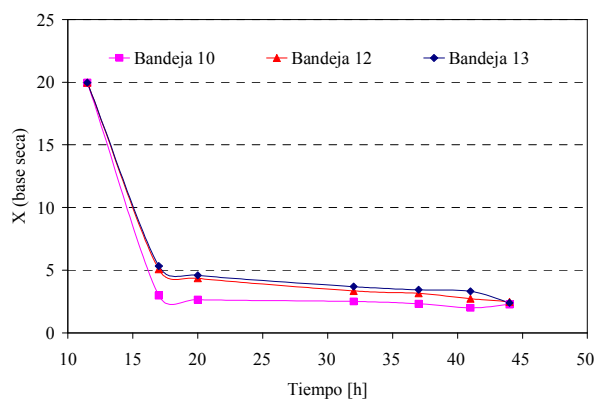


Figura 13. Curva de secado de tomate en rodajas

CONCLUSIONES

La incorporación de un colector de plástico dentro del invernadero resultó conveniente, ya que eleva en una cantidad considerable la temperatura del aire y en las horas de baja radiación la masa del invernadero permite mantener un nivel adecuado de temperatura. Además al ser el colector de plástico de construcción sencilla, es fácilmente removible cuando el invernadero se utiliza para actividades de cultivo protegido.

El uso del SIMUSOL para la simulación resultó de fácil manejo y permitió seleccionar algunas pautas de diseño. Por otra parte los resultados de la simulación demostraron un ajuste razonable con los datos experimentales.

En este ensayo preliminar se obtuvo un producto de alta calidad, en un tiempo razonable y con costos amortizados con el uso en otras actividades. Se observó una disminución del tiempo de permanencia en el invernadero - secador, con respecto a trabajos anteriores, como consecuencia de las modificaciones en el diseño. Como era de esperar las bandejas con el producto en rodajas se secaron más rápido ya que el área de las piezas de material es mayor en relación a su volumen.

REFERENCIAS

- Bistoni S., Iriarte A. y Saravia L., 2003, Análisis teórico de un colector solar de aire, Revista Avances en energía renovables y medio ambiente, Asociación Argentina de Energía Solar, Vol 7, pp. 02-01- 02-06.
- Condori M. y Saravia L., 1993, Secadero invernadero solar híbrido de producción continua, Actas de la 16 reunión de ASADES, La Plata. Tomo II, pp. 413-420.
- Condori M., Saravia L, Echazú R y Cadena C., 1994, Secadero invernadero con calefacción auxiliar. Ensayos preliminares, Actas de la 17 reunión de ASADES, Rosario Tomo II, pp. 389 – 396
- Condori M, Saravia L, 1998, El uso de invernaderos como colector solar, Revista Avances en energía renovables y medio Ambiente, Asociación Argentina de Energía Solar Vol. 2 pp. 01.21- 01.24
- García V., Carabajal D., Iriarte A. y Tomalino L., 1998, Secado solar de Pimientos (*capsicum annum* L.) en invernaderos, Libro Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en el ámbito Latinoamericano, Capítulo Desarrollo Tecnológico, pp. 548 – 553, CLIR'98, La Plata
- Iriarte A., Bistoni S., García V., Sequi J y Rodríguez C., 1992, Uso de invernadero como secaderos solares: diseño y cálculo térmico., Actas de la 15 reunión de ASADES, Catamarca Tomo II, pp. 485, 492
- Iriarte A, García V., Argüello E., Saravia L., 1993, Invernadero colector solar para secado de producto agrícola: ensayos preliminares, Actas de la 16 reunión de ASADES, La Plata. Tomo II pp. 453- 460.
- Iriarte A., García V. y Saravia L., 1994, Secador solar semi-industrial de productos agrícolas: resultados experimentales Actas de la 17 reunión de ASADES, Rosario Tomo II, 381-388.
- Saravia L, Echazú R, Zunino L, y Quiroga M, 1988, Sistema solar para uso como invernadero o secadero. Nuevo diseño, Actas de la 13 reunión de ASADES, Salta, pp.15-20
- Saravia L., Echazú R., Zunino L., Quiroga M. y Robredo P., 1988, Sistema solar para uso como invernadero o secadero. Experimentación y análisis económico, Actas de la 13 reunión de ASADES, Salta, pp.21-28.
- Saravia I. y Condori M, 1992, Secador invernadero de tipo túnel, Actas de la 15 reunión de ASADES, Catamarca, Tomo II, pp. 379, 386

Saravia L., Echazú R., Cadena C y Quiroga M., 1993, Diseño y construcción de un sistema integrado invernadero – secador con calentamiento combinado solar – biomasa , Actas de la 16 reunión de ASADES, La Plata. Tomo II, pp. 405 – 409
Sequi J., Iriarte A., Bistoni S., García V., Saravia L.y Echazu R., 1990, Invernáculo – Secadero de productos agrícolas en Santa María- Catamarca, Actas de la 14 reunión de ASADES, Mendoza, pp. 255-260

ABSTRACT The use of greenhouse as a solar collector is important because it is possible to refund the building costs with other activities. To improve solar collection and air flow through the product, a solar plastic collector was built inside the greenhouse and also tunnels in the drying chamber. The description of building aspects of the solar dryer, the results of a drying experience and the simulation with the SIMUSOL are presented. The air flow distribution in the collector and through the product proves to be uniform. The maximum temperatures in the collector exit were approximately 60 °C for an irradiance of 900 W m². The simulation before the design showed a good adjustment with experimental data.

Key words: to dehydrate, solar dryer, greenhouse