

SECADERO INVERNADERO SOLAR HIBRIDO DE PRODUCCION CONTINUA

Miguel Condori*

Luis Saravia

INENCO[†] Instituto de Investigaciones de Energía no Convencional
Universidad Nacional de Salta
Calle Buenos Aires 177, (4400) Salta, Argentina.

RESUMEN

En el presente trabajo se describe el funcionamiento de un nuevo diseño de secadero invernadero que utiliza una estufa a leña como fuente auxiliar de energía. A través de los balances energéticos y de masa se determina el comportamiento de las variables psicrométricas en el túnel de secado y aplicado al secado de pimientos, se realiza el dimensionamiento del sistema.

INTRODUCCION

En un trabajo anterior [1] se presentó el diseño de un secadero solar para el secado de productos frutihortícolas en escala semi industrial. Con el sistema propuesto se obtiene una producción continua de producto seco al trabajar como un túnel de secado con aire circulando en contracorriente al producto. Un prototipo fue construido y ensayado entre los años 92 y 93. Los ensayos realizados con el mismo muestran que el sistema resultó insuficiente para secar en días nublados o de alta humedad.

En este trabajo se presenta un nuevo diseño del secadero invernadero solar túnel en el que se le agrega calefacción auxiliar por medio de una estufa que utiliza biomasa como material combustible. La calefacción auxiliar permite asegurar el funcionamiento diario del secadero aun en días nublados y eventualmente puede utilizarse por las noches para mejorar la producción de producto seco.

FUNCIONAMIENTO

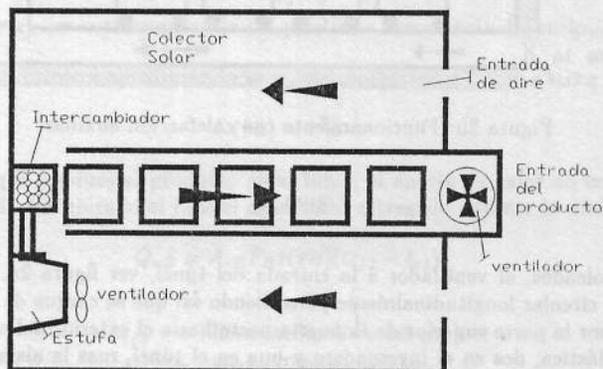


Figura 1: Esquema del secadero Invernadero Híbrido

Un esquema del nuevo diseño de secadero invernadero se muestra en la figura 1. En la parte central del invernadero se construye un túnel de secado colocando plástico transparente, con lo cual

*Becario CONICET

[†]Instituto UNSa - CONICET

el túnel tiene ganancia directa de radiación. El resto del invernadero hace las veces de colector solar de aire. Todo el sistema trabaja en depresión colocando un ventilador axial a la entrada de producto fresco. Como sistema auxiliar se agrega una estufa a leña al final del colector Este. Los gases de combustión circulan con la ayuda de un ventilador pequeño, primero por el banco de tubos ubicado en la parte superior de la puerta de salida del túnel, luego por ductos colocados por debajo del nivel del suelo que recorren longitudinalmente el túnel de secado.

El secadero está diseñado para dos situaciones de trabajo:

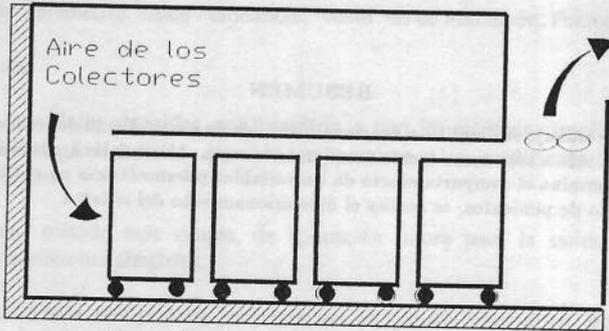


Figura 2a: Funcionamiento en día soleado

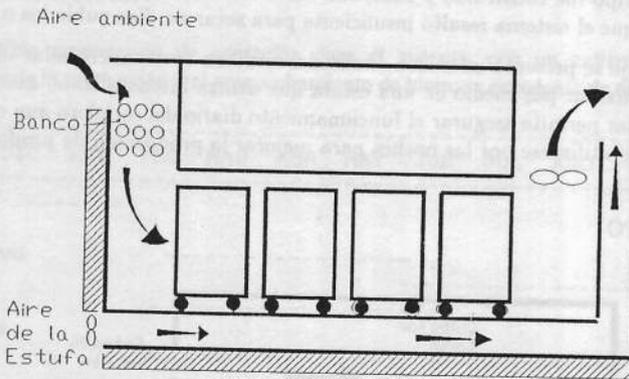


Figura 2b: Funcionamiento con calefacción auxiliar

Figura 2:

a) En días soleados, el ventilador a la entrada del túnel, ver figura 2a, toma el aire de los colectores y lo hace circular longitudinalmente permitiendo así que se cargue de humedad y desaloje el agua evaporada por la parte superior de la puerta norte hacia el exterior del secadero. Un sistema de triple cubierta plástica, dos en el invernadero y una en el túnel, mas la aislación en la pared sur disminuyen las pérdidas térmicas y ayudan a que la ganancia directa de radiación solar eleve la tasa de evaporación.

b) En días nublados se cierran las entradas de aire de los colectores y el túnel queda rodeado solo por aire en convección natural. El ventilador toma el aire ambiente de la parte superior de la pared sur, ver figura 2b, y lo hace pasar por un banco de tubos por los cuales circulan los gases de la combustión producida en la estufa. Se disminuye así el contenido de humedad y se eleva la temperatura del aire que se encuentra con el primer carrito. Luego del intercambiador, el aire caliente se hace circular con la ayuda de un pequeño ventilador, en ductos metálicos por debajo de los carros. En este tramo el aire de la combustión entrega el calor disponible al túnel y es expelido al ambiente

a una altura por encima del invernadero.

DIMENSIONAMIENTO

Se consideran valores medios diarios de las variables involucrada, también que el invernadero está orientado en la dirección norte - sur y que el día es simétrico respecto del medio día solar, con una duración de 12 horas. Un esquema con las dimensiones del secadero invernadero se muestran en la figura 3. En los colectores solares de aire, la temperatura de entrada se puede considerar igual a la

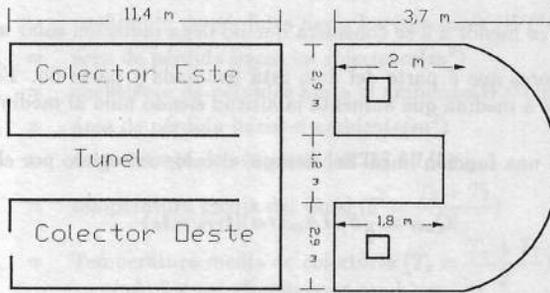


Figura 3: Frente y planta del secadero invernadero

ambiente y el calor útil por unidad de tiempo se define como:

$$Q_u = A_c F_R I (\tau\alpha) \quad (1)$$

- Q_u = calor útil de los colectores (kJ/s)
- A_c = área de colección de radiación (m^2)
- F_R = factor de remoción de calor
- I = radiación solar (W/m^2)
- $(\tau\alpha)$ = transmitancia del plástico - absortancia del suelo

Para triple cubierta en primera aproximación se puede considerar:

$$(\tau\alpha) \approx \tau^3 \alpha$$

Debido a la sombra que produce el producto en el túnel, el aporte de calor no es igual para ambos colectores. Para el colector ubicado al Este el calor total entregado durante la mañana es:

$$Q_{uE} = A_{cE} F_R I (\tau\alpha) (t_{1/2} - t_{ss})$$

$$t_{1/2} = \text{hora medio día solar (hr)}$$

$$t_{ss} = \text{hora salida de sol (hr)}$$

Para el colector Oeste es necesario determinar el ángulo θ que define dos situaciones:

$$\theta = \text{arc tg } \frac{h}{l_0}$$

$$h = \text{altura del túnel (m)}$$

$$l_0 = \text{ancho del colector (m)}$$

<i>Simbolos</i>	<i>Valores</i>
A_{cE}	36,06 m ²
$(\tau\alpha)$	0,72
F_R	0,44
I	1,8 MJ/hora
t_θ	8,35 horas
t_{ss}	6 horas
$t_{1/2}$	12 horas

Tabla 1: Valores de los parámetros

- si la altitud del sol es menor a θ se considera que no llega radiación solar al colector Oeste
- para altitudes mayores que θ parte del área está irradiada y parte no. El área que no recibe radiación disminuye a medida que aumenta la altitud siendo nula al medio día.

Si se considera que A_c es una función lineal del tiempo, el calor entregado por el colector Oeste hasta el medio día es:

$$Q_{uO} = \frac{1}{2} F_R I A_{cO} (\tau\alpha) (t_{1/2} - t_\theta)$$

$$t_\theta = \text{hora correspondiente a } \theta \text{ (hr)}$$

El calor útil total se obtiene por la suma directa de las dos contribuciones y multiplicando por dos debido a la simetría del día.

$$Q_u = 2A_{cE} F_R I (\tau\alpha) \left(\frac{3}{2} t_{1/2} - t_{ss} - \frac{1}{2} t_\theta \right) \quad (2)$$

donde se consideró que $A_{cE} = A_{cO}$.

Evaluando la ecuación 2 según los valores especificados en la tabla 1 se obtiene el siguiente valor para Q_u :

$$Q_u = 296 \frac{MJ}{\text{día}}$$

Para el cálculo del flujo másico del aire caloportador se considera que la humedad específica se mantiene constante (calentamiento sensible). Las condiciones supuestas para el comportamiento del aire en los colectores se muestran en la figura 4

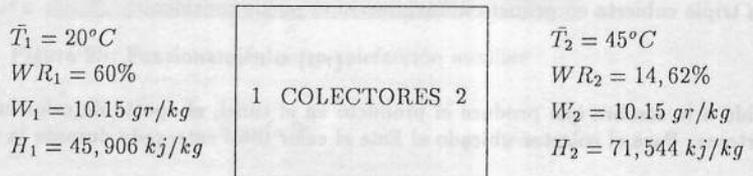


Figura 4: Condiciones del aire en los colectores

Del balance de energía en los colectores se obtiene:

$$\dot{m}_a = \frac{Q_u}{H_2 - H_1} = 0,27 \frac{kg}{s} \quad (3)$$

$$\dot{m}_a = \text{flujo másico del aire (kg/s)}$$

$$H = \text{Entalpía del aire húmedo (kJ/kg)}$$

Realizando el balance de masa en el túnel, el flujo de agua evaporada produce el aumento de la humedad específica del aire

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (W_3 - W_2) \quad (4)$$

$$\dot{m}_w = \text{velocidad de secado (kg/s)}$$

Realizando un balance de energía en el túnel se tiene que la ganancia de calor por radiación y el aportado por los colectores se distribuye en el túnel entre las pérdidas, hacia los colectores y el ambiente, y la evaporación.

$$A_I I^* + \dot{m}_a C_p (T_2 - T_3) = \dot{m}_w L + U_{pc} A_{pc} (T - T_c) + U_{ps} A_{ps} (T - T_a) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_I &= \text{área para la captación de radiación el túnel (m}^2\text{)} \\ I^* &= \text{radiación solar media en el túnel (W/m}^2\text{)} \\ C_p &= \text{calor específico del aire (J/kg}^\circ\text{C)} \\ U_{pc} &= \text{coeficiente de pérdidas hacia los colectores (W/}^\circ\text{Cm}^2\text{)} \\ A_{pc} &= \text{área de pérdida hacia los colectores (m}^2\text{)} \\ U_{ps} &= \text{coeficiente de pérdidas hacia el ambiente (W/}^\circ\text{Cm}^2\text{)} \\ A_{ps} &= \text{área de pérdida hacia el ambiente (m}^2\text{)} \\ L &= \text{calor latente de evaporación } 2257 \text{ kJ/kg agua} \\ T &= \text{temperatura media del túnel } (T = \frac{T_3 + T_2}{2}) \\ T_c &= \text{Temperatura media de colectores } (T_c = \frac{T_a + T_2}{2}) \end{aligned}$$

donde se ha considerado que la temperatura del suelo es la misma que la ambiente

Para la mayoría de los productos frutihortícolas es usual requerir que la humedad relativa a la salida del túnel no supere el 60 % para evitar el crecimiento de hongos en el producto más fresco. Esta condición permite determinar la humedad específica a la salida del túnel conocida la humedad de saturación por medio de la relación:

$$W_3 = \frac{0,62198 W_{R3} W_s}{0,62198 + W_s (1 - W_{R3})} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} W_R &= \text{humedad relativa} \\ W_s &= \text{humedad específica (kgw/kg a)} \end{aligned}$$

La humedad de saturación depende de la temperatura, esta relación se considera lineal para el intervalo de temperatura que va de los 30 °C a los 40 °C.

$$W_s = -0,045448 + 0,002531.T_3 \quad (7)$$

de las ecuaciones 4, 5, 6, 7 se obtiene una ecuación cuadrática para la velocidad de evaporación

$$\dot{m}_w^2 + b\dot{m}_w + c = 0$$

$$b = -0,3642077818$$

$$c = 0,0017245167$$

resolviendo esta expresión se obtiene la cantidad de agua evaporada por día:

$$\dot{m}_w = 0,004798 \frac{\text{kgw}}{\text{s}} = 207,28 \frac{\text{kgw}}{\text{día}}$$

De la ecuación 4 se obtiene la humedad específica a la salida del túnel y de las relaciones psicrométricas el resto de las variables, las que se detallan en la tabla 2. El diagrama psicrométrico del proceso completo se muestra en la figura 5.

La velocidad de secado puede ser expresada en función del contenido de agua en base seca del producto por la siguiente relación:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_p (X_3 - X_2) \quad (8)$$

variables	entrada colector	salida colector	salida túnel
T (°C)	20	45	37
W (gr/kg)	10.15	10.15	28
WR (%)	60	14,62	60
H (kJ/kg)	45,906	71,544	109,143
TBH (°C)	14,88	22,23	29,69

Tabla 2: Condiciones del aire procesado

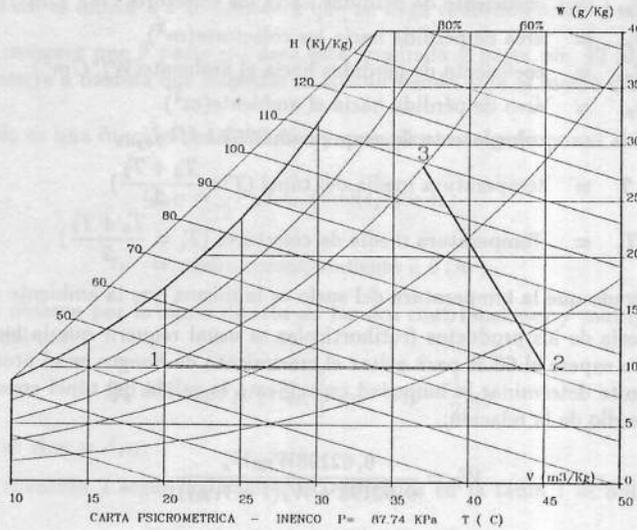


Figura 5: Diagrama Psicrométrico del aire húmedo en el secadero invernadero

\dot{m}_p = flujo de producto seco

X_3 = Humedad base seca a la salida del túnel

X_2 = Humedad base seca a la entrada del túnel

De ésta ecuación se obtiene la producción diaria de producto seco.

Se encontró, ver referencia [2], que la velocidad de secado para el caso de pimientos morrones puede ser expresada en función del potencial de humedad del producto, por la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_w = A_d h_d (W_s(T_p) - W) \quad (9)$$

A_d = área de difusión

h_d = coeficiente de difusión

W = humedad específica media en el túnel $\left(\frac{W_2 + W_3}{2}\right)$

T_p = temperatura del producto

donde h_d disminuye con el contenido de humedad. se obtuvo la siguiente relación para h_d

$$h_d = -0,00446 + 0,000995.X \quad 6,1 \ll X \ll 9 \quad (10)$$

Donde se utilizó datos de la curva de secado de pimienta partido, ver referencia [3], en las siguientes condiciones:

$$T = 45^{\circ}\text{C}, \quad WR = 30\%, \quad \bar{I} \approx 500\text{W}/\text{m}^2, \quad \frac{A_d}{P_s} = 3.9 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}}$$

De las ecuaciones 9 y 10 se determina el área de difusión tomando en primera aproximación $T_p = T = 37^{\circ}\text{C}$. El valor que se obtiene es:

$$A_d = 370 \text{ m}^2$$

Considerando la misma área efectiva de la experiencia de laboratorio obtenemos los kilogramos de producto seco que corresponden a la carga inicial de producto fresco. Los valores que caracterizan al secadero se detallan en la tabla 3

Se requiere que el comportamiento del secadero cuando se utiliza la calefacción auxiliar sea el mismo que cuando trabaja con radiación solar. Despreciando las pérdidas, el calor entregado por el sistema de calefacción debe ser igual a la suma del calor ganado en los colectores y en el túnel. Un esquema del sistema de calefacción auxiliar empleado se muestra en la figura 6.

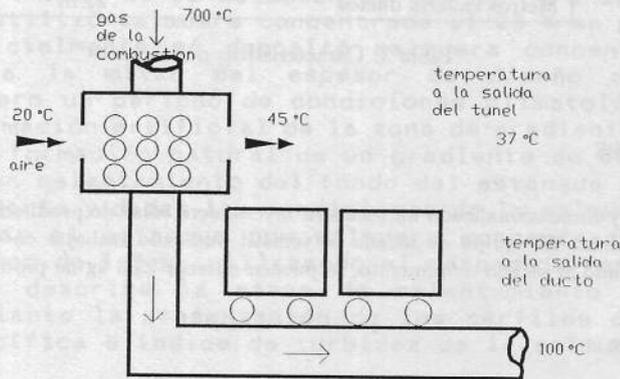


Figura 6: Esquema de la calefacción auxiliar

$$\dot{m}_g C_{pg}(T_e - T_s) = Q_u + A_I I^* \quad (11)$$

- \dot{m}_g = flujo másico del gas de combustión
- C_{pg} = calor específico del gas
- T_e = temperatura de entrada al intercambiador
- T_s = temperatura de salida del ducto

De la experiencia con estufa a leña durante este año se conoce que es posible obtener 700°C de temperatura a la salida de la cámara de combustión y que no es conveniente bajar de los 100°C a la salida de los ductos para evitar problemas de condensación. Reemplazando por los valores correspondientes se obtiene

$$\dot{m}_g = 0.034 \text{ kg/s}$$

Realizando el balance de energía para el banco de tubos se tiene:

$$Q_u = \dot{m}_g C_{pg}(T_e - T_{si}) \quad (12)$$

- T_{si} = temperatura a la salida del intercambiador

se obtiene el valor para la temperatura a la salida del intercambiador de tubos.

$$T_{si} = 496^{\circ}\text{C}$$

con estos valores y la teoría de intercambiadores de calor es posible determinar los metros de cañería necesarios. Los mismos se especifican en la tabla 3.

Area invernadero	79,8 m ²
Largo del invernadero	11,4 m
Ancho del invernadero	7 m
Area túnel de secado	13,68 m ²
Capacidad de carga	939 kg
Producción diaria	23,3 kg
Velocidad de secado	207,28 kg agua/día
tiempo de secado para carga total	4 días
número de carros	7
número de bandejas	70
Contenido de agua inicial producto	9 kgw/kgp
Contenido de agua final	.1 kgw/kgp
Energía total requerida	875 MJ/día
Diámetro cañería banco	7 cm
Metros de cañería banco	26 m
Diámetro cañería ductos	18 cm
Metros cañería ductos	22 m

Tabla 3: Características del secadero

CONCLUSIONES

Se ha diseñado y dimensionalizado un secadero invernadero solar de producción continua que utiliza calefacción auxiliar. El equipo de secado es versátil pudiendo trabajar en días soleados o en días nublados. Aplicado al secado de pimiento, se pueden obtener 23,3 kg de producto seco.

REFERENCIAS

1. L. Saravia y M. Condorí. *Secadero Invernadero del tipo túnel*. Actas 15° Reunión Nacional de Energía Solar y Fuentes Alternativas. Catamarca, 3 al 6 de Noviembre de 1992.
2. M. Condorí y L. Saravia. *Performance del secadero invernadero de tipo túnel*. Actas 15° Reunión Nacional de Energía Solar y Fuentes Alternativas. Catamarca, 3 al 6 de Noviembre de 1992.
3. V. Passamai et al. *Caracterización del secado de productos agrícolas por radiación*. presentado en esta reunión