

# Performance del Secadero Invernadero del tipo túnel

Miguel Condorí,<sup>†</sup> Luis Saravia,<sup>‡</sup>

INENCO<sup>†</sup>

Universidad Nacional de Salta

Buenos Aires 177 - 4400 Salta

## RESUMEN

En el presente trabajo se determina analíticamente la variación de la temperatura y del contenido de agua del producto en función de la posición, en el estado estacionario, para un secador invernadero del tipo túnel. Se obtienen Ecuaciones de diseño para la temperatura y humedad absoluta en función de las variables meteorológicas de interés. Finalmente se determina el factor de performance del secadero, en función de un único parámetro que agrupa las tres variables meteorológicas mencionadas.

## 1 Introducción

En ésta reunión, paralelamente, se presenta otro trabajo con los ensayo previos y las características constructivas del secador invernadero del tipo túnel (referencia [1]). El invernadero es dividido en forma longitudinal en tres zonas: en túnel de secado, construido con plástico transparente, en la parte central y dos colectores solares en las partes laterales.

Las variables de interés son la temperatura y humedad del aire en el túnel y, a través de éstas, el contenido de agua del producto. Estas variables dependen de la posición y el tiempo, pero para el siguiente análisis se trabaja solo con las Ecuaciones del estado estacionario donde se considera que todos los coeficientes involucrados son constantes.

Seguidamente se analiza por separado el sistema simplificado, compuesto por un colector solar y un túnel de secado, en donde para la obtención de las Ecuaciones de balance se realizaron las siguientes suposiciones:

*Para el colector:*

- Se desprecia la transferencia de calor por radiación desde el suelo y hacia el cielo.
- Todas las pérdidas térmicas: por el fondo, laterales, etc. se consideran hacia el ambiente.
- Se desprecia la absorción de calor en el plástico y otros elementos de la estructura del invernadero.

---

\*Becario CONICET

†SAPIU-CONICET

‡Instituto UNSa - CONICET

- No se considera la acumulación de calor en el piso, ni el efecto de inercia térmica.

Para el túnel de secado:

- Se considera que el espacio que rodea al túnel de secado se encuentra a la temperatura del colector.
- Se considera un coeficiente global para las pérdidas de calor hacia la temperatura del colector.
- No se consideran los términos de acumulación de calor.
- No se consideran las transferencias de calor por radiación.
- Todas las áreas involucradas están expresadas por  $m^2$  de túnel de secado.

## 2 Colectores solares de aire

Considerando el sentido positivo de la posición en la dirección del flujo de aire en el túnel, la variación de la temperatura en los colectores con la posición puede expresarse por:

$$T_c(z) = T_a + k_1 I [1 - k_3 \exp(k_2 z)] \quad (1)$$

donde:

$$k_1 = \frac{(\tau \alpha)_t}{U_L}$$

$$k_2 = \frac{e_0 U_L F'}{\dot{m} C_p}$$

$$k_3 = \exp(-k_2 L)$$

$U_L$  es el coeficiente global de pérdidas y  $F'$  el factor de eficiencia, y se definen por:

$$F' = \frac{h_s h_{rs} + h_s h_p + h_s (h_{rp} + h_w) + h_p h_{rs}}{(h_{rs} + h_p + h_{rp} + h_w)(h_s + h_{rs} + U_f) - h_{rs}^2}$$

$$U_L = \frac{(h_s h_{rs} + h_s h_p + h_p h_{rs})(h_{rp} + h_w + U_f) + (h_s + h_p)(h_{rp} + h_w) U_f + \frac{A_{lat}}{A_c} U_{lat}}{h_s h_{rs} + h_s h_p + h_s (h_{rp} + h_w) + h_p h_{rs}}$$

Para mayor información ver la referencia [2]

## 3 túnel de secado

Para la ecuación de evaporación se considera una expresión análoga a la utilizada para una superficie de agua:

$$\dot{m}_w = A_d h_d (w_s(T_p) - w) \quad (2)$$

La humedad de saturación esta evaluada a la temperatura del producto y se utiliza una correlación lineal valida solo para un entorno de la temperatura del producto.

$$w_s(T_p) = W_{s0} + \alpha T_p \quad (3)$$

La temperatura de entrada al túnel se considera igual que la de salida de los colectores, esta se obtiene evaluando la ecuación 1 para  $z = 0$ .

$$T_e = T_a + k_0 I \quad (4)$$

donde  $k_0$  es una constante característica del colector.

$$k_0 = k_1(1 - k_3)$$

Para el balance de energía en el túnel se considera que el calentamiento del aire surge de restar a los aportes por radiación solar y transferencia por convección, las pérdidas térmicas.

$$\dot{m}C_p \partial T = (\tau \alpha)_t (e \partial z) I - A_q h_q (e \partial z) (T - T_p) - U_{LT} A_* (e \partial z) (T - T_c) \quad (5)$$

Para el balance de energía en el producto se considera que la radiación que efectivamente le llega se distribuye entre el proceso de evaporación del agua y las transferencias térmicas por convección hacia el aire circulante.

$$q_f \dot{m}_w = A_q h_q (T - T_p) + A_I (\tau \alpha)_p I \quad (6)$$

Sumando las Ecuaciones 5 y 6 se obtiene el balance global térmico, según el cual la energía aportada por la radiación solar se distribuye en la evaporación del agua del producto, el calentamiento del aire y las pérdidas del sistema:

$$A_p I = q_f \dot{m}_w + \frac{\dot{m}C_p}{e} \frac{\partial T}{\partial z} + U_{LT} A_* (T - T_c) \quad (7)$$

donde:

$$A_p = A_I (\tau \alpha)_p + (\tau \alpha)_t$$

De esta última se despeja la velocidad de evaporación:

$$\dot{m}_w = \frac{1}{q_f} \left[ A_p I - \frac{\dot{m}C_p}{e} \frac{\partial T}{\partial z} - U_{LT} A_* (T - T_c) \right] \quad (8)$$

La velocidad de evaporación también interviene en el balance de agua evaporada por el producto y que es transferida al flujo de aire.

$$\dot{m}_w (e \partial z) = \dot{m} \partial w \quad (9)$$

de la ecuación 8 y 9 se obtiene una expresión para el gradiente de humedad, la cual se puede integrar tomando como aproximadamente igual al área de un triángulo, la integral que involucra a las pérdidas térmicas, es decir:

$$\int_0^z (T - T_c) \partial z' = \frac{(T - T_c)z}{2}$$

donde tanto  $T$  como  $T_c$  son funciones de la posición.

Realizando esta aproximación la humedad absoluta del aire para cualquier posición del túnel se expresa por:

$$w = w_a + \frac{c}{q_f \dot{m}} [A_p I z - \frac{\dot{m} C_p (T - T_e)}{e} - \frac{U_{LT} A_s}{2} (T - T_e) z] \quad (10)$$

La temperatura del producto se obtiene del balance de energía en el túnel, ecuación 5.

$$T_p - T = \frac{1}{A_q h_q} \left[ \frac{\dot{m} C_p}{e} \frac{\partial T}{\partial z} - (\tau \alpha)_t I + U_{LT} A_s (T - T_e) \right] \quad (11)$$

Finalmente para obtener la ecuación que determina la variación de la temperatura con la posición, se reemplazan las Ecuaciones 1,3, 4,8,10,11 en la ecuación 2.

$$A \frac{\partial T}{\partial z} + B(z) T = B(z) T_a - C(z) I - \Delta w_s = -E(z)$$

con:

$$B(z) = b_1 + b_2 z$$

$$C(z) = -c_1 - c_2 z + c_3 \exp(k_2 z) + c_4 \exp(k_2 z)$$

Esta es una ecuación lineal no homogénea con coeficientes no constantes donde la solución de la ecuación homogénea es de la forma:

$$\phi(z) = T_e \exp\left(-\int_0^z \frac{B(z')}{A} \partial z'\right) = T_e \exp\left(-\frac{1}{2A}(2b_1 z + b_2 z^2)\right)$$

donde se a tomado como constante de integración la temperatura de entrada al túnel.

Para la obtención de la solución general se propone que la temperatura puede ser expresada como el producto de la solución homogénea por una función que también varía con la posición, es decir:

$$T(z) = \phi(z)v(z)$$

La función  $v(z)$  se obtiene de resolver la integral:

$$v(z) - v_0 = -\frac{1}{A} \int_0^z \frac{-B(z') T_a + C(z') I + \Delta w_s}{\phi(z')} \partial z'$$

donde  $v_0$  es la constante de integración. En esta integración aparecen términos que contienen la variable  $\exp(z^2)$ , estas se pueden aproximar por una serie de potencias y siendo que es uniformemente convergente para todo valor, la integral de la sumatoria sera igual a la sumatoria de las integrales, es decir:

$$\int_a^x \exp(y^2) dy = \int_a^x \sum_{i=0}^{\infty} \frac{y^{2n}}{n!} dy = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{x^{2n+1} - a^{2n+1}}{n! (2n+1)}$$

Realizando esta aproximación se obtiene la siguiente expresión para la función  $v(z)$ :

$$v(z) = \frac{\exp(-t_0^2)}{T_e} (F(z)T_a + G(z)I - H(z)\Delta w_s) + 1$$

donde la constante de integración se toma igual a la unidad para que la temperatura de entrada del túnel sea igual a la de salida de los colectores y los coeficientes toman los siguientes valores.

$$F(z) = \exp(t(z)^2) - \exp(t_0^2)$$

$$G(z) = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{2A}{b_2}} \left( \sum_{i=0}^{\infty} \frac{t(z)^{2n+1} - t_0^{2n+1}}{n! (2n+1)} \right) \left( c_1 - \frac{b_1}{b_2} c_2 \right) + \frac{c_2}{b_2} (\exp(t(z)^2) - \exp(t_0^2))$$

$$- \frac{\exp(t_0^2 - p_0^2)}{A} \left[ \sqrt{\frac{2A}{b_2}} \left( \sum_{i=0}^{\infty} \frac{p(z)^{2n+1} - p_0^{2n+1}}{n! (2n+1)} \right) \left( c_3 - \frac{(b_1 + k_2 A)}{b_2} c_4 \right) + \frac{c_4}{b_2} (\exp(p(z)^2) - \exp(p_0^2)) \right]$$

$$H(z) = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{2A}{b_2}} \left( \sum_{i=0}^{\infty} \frac{t(z)^{2n+1} - t_0^{2n+1}}{n! (2n+1)} \right)$$

$$t(z)^2 = \frac{b_2}{2A} \left( z + \frac{b_1}{b_2} \right)^2$$

$$t_0^2 = \frac{b_1^2}{2Ab_2}$$

$$p(z)^2 = \frac{b_2}{2A} \left[ z + \frac{(b_1 + k_2 A)}{b_2} \right]^2$$

$$p_0^2 = \frac{(b_1 + k_2 A)^2}{2Ab_2}$$

Finalmente, multiplicando  $\phi(z)$  con  $v(z)$  la variación de la temperatura con la posición en el interior del túnel puede ser expresada por:

$$T(z) = T_a + \exp(-t(z)^2) [(G(z) + k_0 \exp(t_0^2)) I - H(z) \Delta w_s] \quad (12)$$

A continuación se definen los coeficientes utilizados en el desarrollo anterior y un detalle de la nomenclatura puede encontrarse al final del trabajo.

$$A = \frac{\dot{m} C_p}{e} \left[ \frac{1}{q_f A_d h_d} + \frac{a}{A_q h_q} \right]$$

$$b_1 = \frac{U_{LT} A_*}{q_f A_d h_d} + \frac{a U_{LT} A_*}{A_q h_q} + a + \frac{C_p}{q_f}$$

$$b_2 = \frac{e U_{LT} A_*}{2 \dot{m} q_f}$$

$$c_1 = U_{LT} A_* k_1 \left( \frac{1}{q_f A_d h_d} + \frac{a}{A_q h_q} \right) + k_0 \frac{C_p}{q_f} + \frac{A_p}{q_f A_d h_d} + \frac{a(\tau \alpha)_t}{A_q h_q}$$

$$c_2 = \frac{e A_p}{q_f \dot{m}} + \frac{e A_* U_{LT} k_1}{2 \dot{m} q_f}$$

$$c_3 = k_1 k_3 U_{LT} A_* \left( \frac{1}{q_f A_d h_d} + \frac{a}{A_q h_q} \right)$$

$$c_4 = k_1 k_3 \frac{e A_* U_{LT}}{2 \dot{m} q_f}$$

$$\Delta w_s = w_s(T_a) - w_a$$

## 4 Factor de Performance

Para el diseño del túnel de secado es de interés evaluar las Ecuaciones obtenidas anteriormente para la posición de salida del túnel. En esta sección se encuentran expresiones que permiten obtener la temperatura y la humedad del aire para este punto, como así también la performance del secadero. La temperatura a la salida del túnel se obtiene evaluando la ecuación 12 para  $z = L$ :

$$T_s = T_a + \exp(-t(L)^2)[(G(L) + k_0 \exp(t_0^2)I - H(L)\Delta w_s] \quad (13)$$

La humedad absoluta del aire a la salida del túnel, se obtiene particularizando la ecuación 10 para  $z = L$ ,  $T_c = T_a$ , y utilizando la ecuación.

$$w_L - w_a = \frac{1}{\dot{m}q_f}[A_T A_p I - \frac{\dot{m}C_p}{e}(T_s - T_e) - \frac{U_{LT} A_T A_s}{2}(T_s - T_a)] \quad (14)$$

Esta se puede expresar en función de las variables meteorológicas por la siguiente ecuación:

$$w_L - w_a = \frac{\dot{m}C_p + U_{LT} A_T A_s / 2}{\dot{m}q_f}[M I + H(L) \Delta w_s] \quad (15)$$

Para obtener una expresión que determine la eficiencia del uso de energía disponible en el secadero, se define la energía transferida en la evaporación:

$$Q_{evap} = q_f \dot{m}(w_L - w_a) \quad (16)$$

el potencial de calor disponible por radiación solar:

$$Q_I = A_T I$$

el potencial de energía disponible por saturación del aire :

$$Q_w = q_f \dot{m}(w_s(T_a) - w_a)$$

y el factor de performance:

$$f_p = \frac{Q_{evap}}{Q_I + Q_w}$$

reemplazando las Ecuaciones 13 y 14 en la 16 se obtiene una relación lineal entre el factor de performance y una única variable adimensional  $\mathcal{Z}$  que contiene las tres variables meteorológicas de interés en el proceso:  $I$ ,  $w_a$  y  $T_a$ .

$$f_p(\mathcal{Z}) = \frac{M}{A_T}(\dot{m}C_p + \frac{U_{LT} A_s A_T}{2})[1 - (1 - \frac{H(L)A_T}{\dot{m}q_f M})\mathcal{Z}] \quad (17)$$

$$\mathcal{Z} = \frac{Q_w}{Q_w + Q_I}$$

con:

$$M = \frac{A_p A_T + k_0 \dot{m}C_p}{\dot{m}C_p + U_{LT} A_T A_s / 2} - e^{-t^2(L)} (G(L) + k_0 e^{t_0^2})$$

## 5 Conclusiones

Para el estado estacionario y bajo las suposiciones realizadas, el factor de performance para este tipo de secador invernadero puede ser expresado de la misma forma que el de cámara simple y doble cámara, (ver referencia [3]). Es decir, por una recta con pendiente negativa en función de una única variable adimensional. El valor de diseño de esta ecuación es análogo al de la ecuación de eficiencia para los colectores.

Si bien se ha considerado que todos los coeficientes son constantes, algunos varían con la posición a lo largo del túnel, en particular el producto  $A_d h_d$ , por lo cual la expresión obtenida solo es válida para los momento iniciales del secado, donde esta variación no es apreciable. No obstante esta ecuación puede ser usada con valores promedios, restando la validación de la misma.

## Nomenclatura

$h_s$  = Coeficiente de convección suelo - aire

$h_p$  = Coeficiente de convección plástico - aire

$h_w$  = Coeficiente de convección por el viento

$h_{r,s}$  = Coeficiente de radiación suelo - plástico

$h_{r,p}$  = Coeficiente de radiación plástico - cielo

$U_f$  = Coeficiente de pérdida por el fondo del suelo

$U_{lat}$  = Coeficiente de pérdida por los laterales del colector

$A_{lat}$  = Area lateral del colector

$A_c$  = Area de colección

$\dot{m}_w$  = Flujo másico del agua

$\dot{m}$  = Flujo másico del aire

$A_T$  = Area de planta del túnel

$A_q$  = Area de transferencia térmica convectivas

$A_I$  = Area de captación solar

$A_s$  = Area de pérdida de calor

$A_d$  = Area de difusión de agua

$h_d$  = Coeficiente de transferencia de masa

$h_q$  = Coeficiente de convección

$U_{LT}$  = Coeficiente global de pérdidas para el túnel

$U_L$  = Coeficiente global de pérdidas para el colector

$w$  = Humedad absoluta en el túnel

$w_s$  = Humedad absoluta de saturación

$w_a$  = Humedad absoluta ambiente

$w_L$  = Humedad absoluta al final del túnel

$T$  = Temperatura en el túnel  
 $T_p$  = Temperatura del producto  
 $T_e$  = Temperatura de entrada al túnel  
 $T_a$  = Temperatura ambiente  
 $T_c$  = Temperatura del colector  
 $T_s$  = Temperatura de salida del túnel  
 $C_p$  = Calor específico del aire  
 $(\tau\alpha)$  = Producto transmitancia - absorptancia  
 $e_0$  = Ancho de los colectores  
 $e$  = Ancho del túnel  
 $q_f$  = Calor latente de vaporización  
 $I$  = Radiación solar por unidad de área  
 $X$  = Cantidad de agua del producto en base seca  
 $P_s$  = Peso seco del producto  
 $L$  = Longitud del túnel  
 $f_p$  = Factor de performance

## REFERENCIAS

- [1] M. Condori. *Optimización del diseño de colectores solares de aire con absorbedor de piedra*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Salta, 1991.
- [2] L. Saravia y M. Condori. *Secador Invernadero del tipo túnel*. Presentado en ésta reunión.
- [3] L. Saravia y colaboradores. *Performance y diseño de Secadores Invernaderos de convección forzada*. Actas del V Congreso Ibérico de Energías renovables. Madrid, 1990.