

MODELO DE SECADO PARA SECADEROS INVERNADEROS

Miguel Condorí

Luis Saravia

INENCO*

Instituto de Investigaciones en Energía no Convencional
Universidad Nacional de Salta

Calle Buenos Aires 177, (4400) Salta, Argentina.

Fax: (54-87) 255489, Email: Condori@ciunsa.edu.ar

RESUMEN

Se presenta un modelo para todo el proceso de secado. Se encuentran expresiones analíticas para la curva de secado en función de una nueva manera de estandarizar el tiempo de secado, basado en los potenciales de secado. Se presentan los resultados de la simulación computacional.

INTRODUCCION

En un trabajo presentado en 1990 [1], Saravia et al. determinaron analíticamente la dependencia de la velocidad de secado de los secaderos invernaderos de una y dos cámaras con las variables meteorológicas (radiación solar, temperatura y humedad ambiente), en esta oportunidad se introdujo el concepto de performance del secadero. Este estudio se realizó considerando un coeficiente de transferencia de masa constante, por lo cual los resultados solo son aplicables a la primera etapa del secado.

En el presente trabajo, el estudio se completa para las etapas posteriores en la que la resistencia del secado aumenta debido a la disminución del contenido de agua del producto. El modelo obtenido es sencillo y permite predecir la producción, performance y la curva de secado para secaderos de una y dos cámaras y para un producto determinado. También, mediante el cálculo computacional, se comparan la productividad de ambos secaderos.

MODELO TERMICO PARA EL SECADERO SIMPLE

En esta sección se presenta solo los resultados del modelo, los balances de energía y masa ya han sido publicado con mas detalle [1]. Aquí solo se hará énfasis en las mejoras introducidas.

El modelo considera que la velocidad de secado del producto \dot{m}_w es producida por un potencial $(W_s(T_p) - W)$ donde T_p es la temperatura del producto, y W_s su humedad de saturación.

$$\dot{m}_w = H_{pd}(X)(W_s(T_p) - W) \quad (1)$$

*Instituto UNSa - CONICET

H_{pd} es un coeficiente global de evaporación, que agrupa tanto a la superficie de intercambio de masa y al coeficiente de difusión. Este debe tener en cuenta el encogimiento del producto y los cambios internos del tejido que afectan a la evaporación del agua. Se considera entonces, que H_{pd} depende del contenido de humedad en base seca del producto X , este último varía con el tiempo a lo largo del proceso de secado.

Para determinarlas \dot{m}_w es necesario una expresión analítica para $W_s(T_p)$. Dado que la variación para T_p en el secadero es pequeña, se ha utilizado una aproximación lineal para esta función .

$$W_s(T_p) \approx W_o + bT_p \quad (2)$$

La expresión final obtenida para la velocidad de secado, en función de las variables meteorológicas I , T_a , W_a y del contenido de agua X es:

$$\dot{m}_w = \frac{1}{K_0} [K_1 A_s I + (W_s(T_a) - W_a)] \quad (3)$$

donde

$$K_0 = \frac{1}{H_{pd}} + \frac{1}{\dot{m}_a} + bq_f \left(\frac{1}{H_{pT}} + \frac{1}{C_{pa}\dot{m}_a + h_c A_c} \right)$$

$$K_1 = b \left(\frac{\alpha_2 A_{pI}}{A_s H_{pT}} + \frac{\alpha_1}{C_{pa}\dot{m}_a + h_c A_c} \right)$$

El coeficiente K_0 depende del contenido de humedad del producto X a través del coeficiente H_{pd} , \dot{m}_a es el flujo másico y se lo considera constante durante todo el proceso, A_s es el área de planta de la cámara, A_{pI} es el área del producto expuesta a la radiación, α_2 el coeficiente de absorción del producto. H_{pT} agrupa el área de intercambio térmico del producto y su respectivo coeficiente de convección, q_f es el calor latente de evaporación del agua, α_1 la transmitancia - absortancia de la cámara, A_c el área correspondiente a las pérdidas térmicas del invernadero y h_c el coeficiente global de pérdidas térmicas.

En el modelo no se ha considerado el calor almacenado en el suelo ni en el producto y se ha supuesto condiciones uniformes para la temperatura y humedad en el interior de la cámara.

Las expresiones obtenidas para la temperatura de la cámara T , el producto T_p y la humedad absoluta de la cámara W , son respectivamente:

$$T = T_a + \frac{\alpha_1 A_s I - q_f \dot{m}_w}{C_p \dot{m}_a + h_c A_c} \quad (4)$$

$$T_p = T + \frac{\alpha_2 A_{pI} I - q_f \dot{m}_w}{H_{pT}} \quad (5)$$

$$W = W_a + \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} \quad (6)$$

PRODUCCION Y PERFORMANCE DEL SECADERO

La ecuación 3 muestra que en un secadero solar con ganancia directa el proceso de secado tiene dos fuentes potenciales, que expresados en unidades de potencia son: la radiación

total incidente $P_i = A_s \cdot I$ y el potencial de saturación del aire $P_w = q_f \dot{m}_a \cdot (W_s(T_a) - W_a)$, que evalúa la cantidad de agua que podría ser incorporado al aire si se satura a temperatura ambiente.

En función de estos potenciales la producción del secadero puede ser expresada en términos de la energía consumida durante el proceso:

$$P = \frac{1}{K_o} (q_f K_1 P_i + \frac{P_w}{\dot{m}_a}) \quad (7)$$

El factor de performance f_p del secadero se define como la razón entre la energía consumida y la suministrada. Este da una idea de la eficiencia del secadero en el uso de sus potenciales de secado. Los valores que toma f_p durante el proceso se encuentran en el intervalo $[0,1]$. Reemplazando por los valores correspondientes, se encuentra que f_p puede ser expresada como el producto de dos funciones:

$$f_p = U(X) \cdot V(Z) \quad (8)$$

donde

$$U(X) = \frac{q_f K_1}{K_o}$$

$$V(Z) = 1 + \left(\frac{1}{q_f \dot{m}_a K_1} - 1 \right) Z$$

donde Z es una variable adimensional acotada también en el intervalo $[0,1]$, que agrupa las variables meteorológicas y $U(X)$ depende solo de X .

$$Z = \frac{W_s(T_a) - W_a}{W_s(T_a) - W_a + \frac{A_s}{q_f \dot{m}_a} I}$$

Tanto la performance del secadero como su productividad dependen de X , es decir, que cambiarán a lo largo de la evolución del proceso de secado, disminuyendo con el contenido de agua del producto.

LA CURVA DE SECADO

La velocidad de secado, obtenida en la sección anterior, depende del contenido de agua del producto a través del coeficiente global de evaporación. Es necesario establecer la relación adecuada entre ambas para obtener la curva de secado para todo el proceso, y a partir de ésta el tiempo total de secado.

Por definición, la velocidad de secado \dot{m}_w es proporcional a la derivada temporal del contenido de agua del producto X :

$$\dot{m}_w = -M_s \frac{dX}{dt} \quad (9)$$

donde M_s es el peso seco del producto.

Si el valor dado por la ecuación (3) es reemplazado en (9) esta última puede ser integrada separando variables.

$$M_s \int_{X_i}^X K_o dX = - \int_0^t (K_1 \cdot A_s \cdot I + (W_s(T_a) - W_a) dt$$

donde I, T_a y W_a dependen del tiempo y K_o de X . El límite X_i es el valor del contenido de agua inicial del producto. Esta integración implícita determina la función $X(t)$, es decir, la curva de secado para el producto en el secadero.

Definiendo una nueva variable t^* , que tiene dimensiones de tiempo, se logra la integración directa de (): :

$$t^*(t) = \int_0^t (K_1 \cdot A_s \cdot I + W_s(T_a) - W_a) dt \quad (10)$$

t^* será llamado tiempo equivalente y su utilización define una función explícita $X(t^*)$ que depende del contenido de humedad del producto y de los parámetros relacionados con el secadero, pero que es independiente de las condiciones meteorológicas.

periodo de velocidad constante

Durante los primeros momentos del proceso la velocidad de secado se considera constante y la función $X(t^*)$ es lineal:

$$X = X_i - \frac{1}{M_s K_o} t^* \quad (11)$$

periodo de velocidad decreciente

A veces es suficiente con tomar una relación lineal entre \dot{m}_w , y en consecuencia con H_{pd} , y X . Se adopta la siguiente relación:

$$H_{pd}(X) = a^* + b^* X \quad (12)$$

Entonces, se puede expresar la dependencia de K_o con X como:

$$K_o = K_o^* + \frac{1}{a^* + b^* X} \quad (13)$$

donde K_o^* es una constante

$$K_o^* = \frac{1}{\dot{m}_a} + bq_f \left(\frac{1}{A_{pT} h_{pT}} + \frac{1}{C_{pa} \dot{m}_a + h_c A_c} \right)$$

Resolviendo () para este caso se obtiene:

$$K_o^* \cdot (X - X_i) + \frac{1}{b^*} \ln \left(\frac{a^* + b^* X}{a^* + b^* X_i} \right) = - \frac{1}{M_s} t^* \quad (14)$$

X_i será el contenido inicial de agua si se toma una recta decreciente para todo el proceso, o corresponderá al contenido crítico de humedad si se considera un periodo inicial constante.

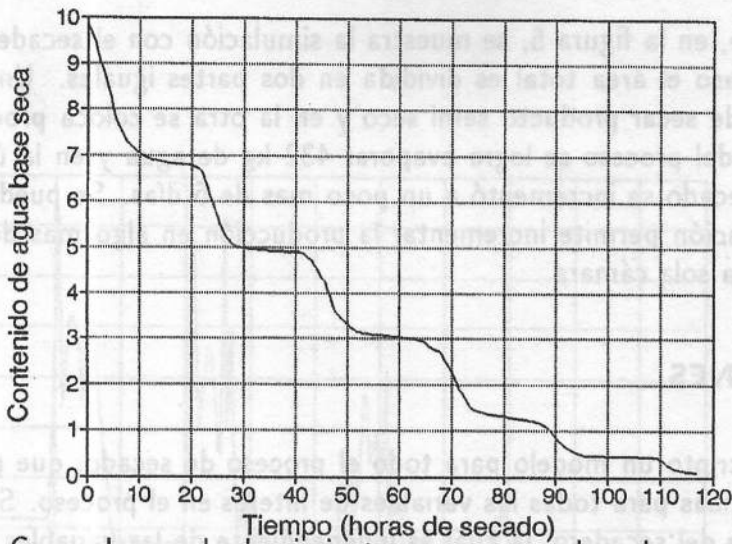


Figura 1: Curva de secado de pimienta para un secadero de una sola cámara

Estos resultados son coincidentes con los publicados por Treybal [2] para secaderos convencionales en los que los potenciales de secados se mantienen constantes. En este caso la dependencia es directamente con el tiempo t .

La función $t^*(t)$ puede ser interpretado como un cambio de escala en el tiempo que depende de las condiciones meteorológicas. La relación implícita

$$t^*(X) = t^*(t) \tag{15}$$

determina la curva de secado $X(t)$ en tiempo convencional.

RESULTADOS DE LA SIMULACION

Se construyó un programa para simular el comportamiento de los secaderos de una y dos cámara. La entrada de datos al programa fue proporcionada por un banco de datos meteorológicos correspondiente a la primera semana de noviembre del 94. En la figura 1 se muestra la curva de secado obtenida para un secadero de una sola cámara de 50 m^2 de planta. El tiempo total requerido para secar 500 kg de pimienta fresco hasta un contenido de agua final de 0,1 en base seca, fueron casi cinco días.

La figura 2 muestra el comportamiento de la performance f_p durante todo el proceso. También se ha graficado la eficiencia de saturación definida como la ganancia de humedad del aire sobre el potencial de evaporación teórico. Es decir, esta última no tiene en cuenta los efectos de la ganancia de radiación directa.

En la simulación se ha dimensionado la carga inicial para no pasar de una eficiencia de saturación del 70 %, ya que lo contrario favorece el crecimiento de hongos. Esta eficiencia cae por debajo del 20 % para el último día.

La figura 3 muestra los kilogramos de agua evaporado por el secadero de una sola cámara durante todo el proceso. La producción total fue de 456 kg para 117 horas de funcionamiento.

La figura 4 Muestra la curva de secado en función del tiempo equivalente, se observa como esta se ha suavizado presentando el aspecto de las obtenidas bajo condiciones controladas.

Finalmente, en la figura 5, se muestra la simulación con el secadero de doble cámara [1]. En este caso el área total es dividida en dos partes iguales. Una cámara se utiliza para terminar de secar producto semi seco y en la otra se coloca producto fresco. En la primera mitad del proceso se logra evaporar 432 kg de agua y en la última 470 kg, pero el tiempo de secado se incrementó a un poco mas de 6 días. Se puede observar que esta simple modificación permite incrementar la producción en algo mas del 50 % respecto al secadero de una sola cámara.

CONCLUSIONES

Se ha descrito un modelo para todo el proceso de secado, que permite obtener expresiones analíticas para todas las variables de interés en el proceso. Se obtuvo la función de performance del secadero, la cual es independiente de las variables meteorológicas. Es decir, si la curva es determinada experimentalmente en algún lugar, cambiando los valores de I o $W_s(T_a) - W_a$, será posible utilizar estos datos para evaluar el comportamiento del mismo secadero en otro lugares.

El modelo también permite determinar una expresión implícita para la curva de secado en función de las variables meteorológicas y del coeficiente de transferencia de masa. Para su resolución se propone la utilización de una nueva variable t^* con dimensiones de tiempo y que tiene en cuenta los potenciales de secado.

El tiempo de secado equivalente, al incluir un integrado de las variables meteorológicas, permite una mejor comparación de las experiencias llevadas bajo diferentes circunstancias. Siempre que sea posible encontrar los valores medios de radiación, temperatura y humedad de forma tal que el área por debajo de (10) sea la misma, se puede extrapolar los resultados de laboratorio a campo o viceversa.

Recientemente, un concepto similar fue propuesto para experiencias de secado a cielo abierto [3], pero basado solo en la radiación solar incidente. Nosotros hemos obtenido un resultado mas general que incluye las influencia de la temperatura y humedad ambiente. Al ser un desarrollo analítico basado sobre los procesos generales del secado el resultado puede ser fácilmente extendido a otros tipos de secaderos.

REFERENCIAS

1. Saravia L. et. al. *Performance y Diseño de Secaderos Invernaderos de Convección Forzada*. Actas 14° Reunión Nacional de Energía Solar y Fuentes Alternativas. Mendoza, 1990.
2. R. E. Traybal, *Operaciones de Transferencia de Masa 2da. edición*, McGraw Hill, México, 1980.
3. A. Mulet, A. Berna, C. Roselló and J. Cañellas, *Analysis of open sun drying experiments*, *Drying Technology*, 11(6), 1385-1400 (1993).

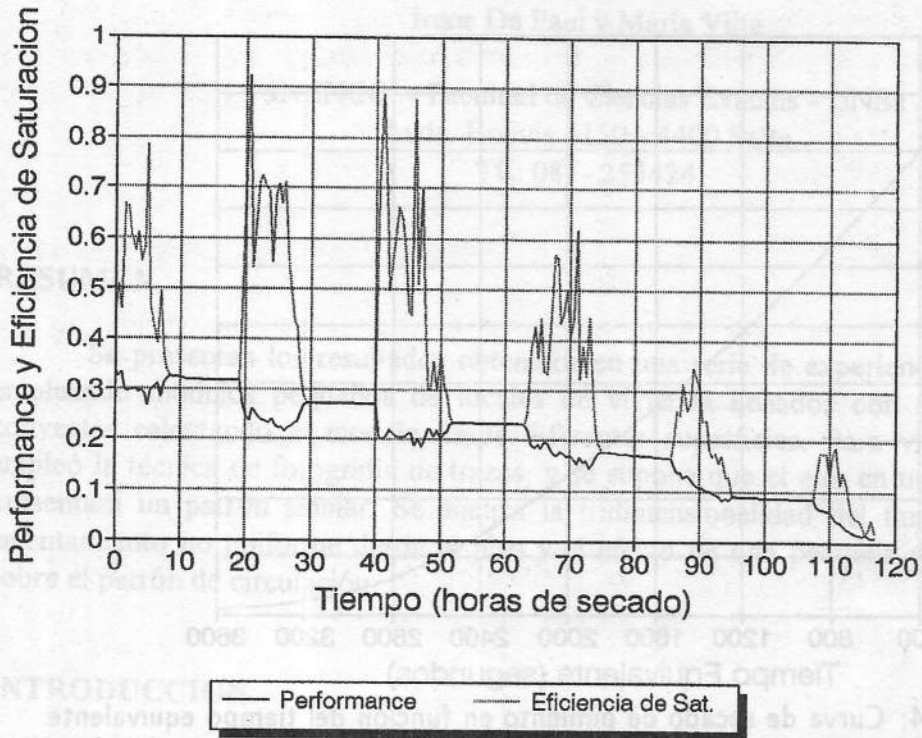


Figura 2: Performance instantánea para el secadero de una sola cámara

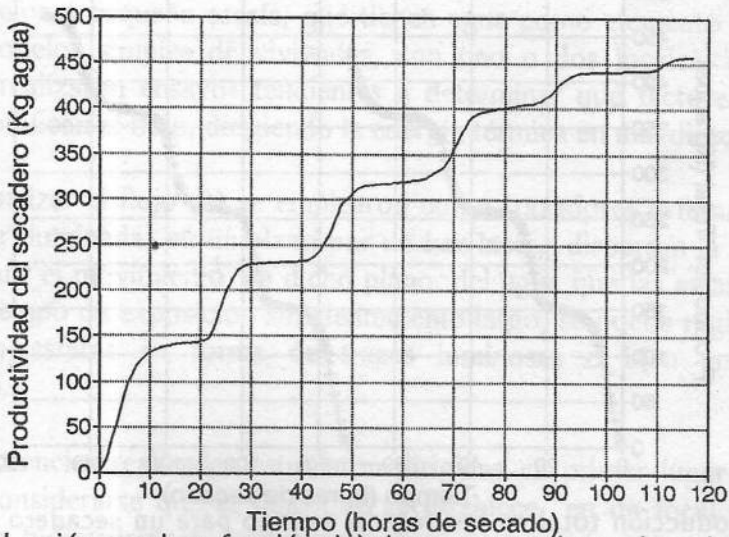


Figura 3: Producción total en función del tiempo para el secadero de una sola cámara

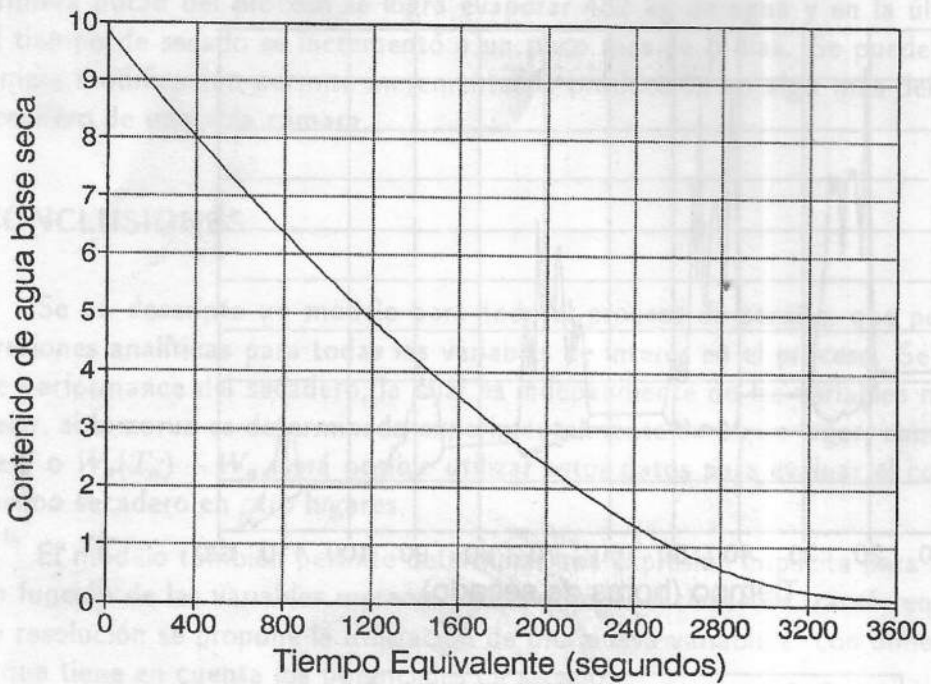


Figura 4: Curva de secado de pimiento en función del tiempo equivalente

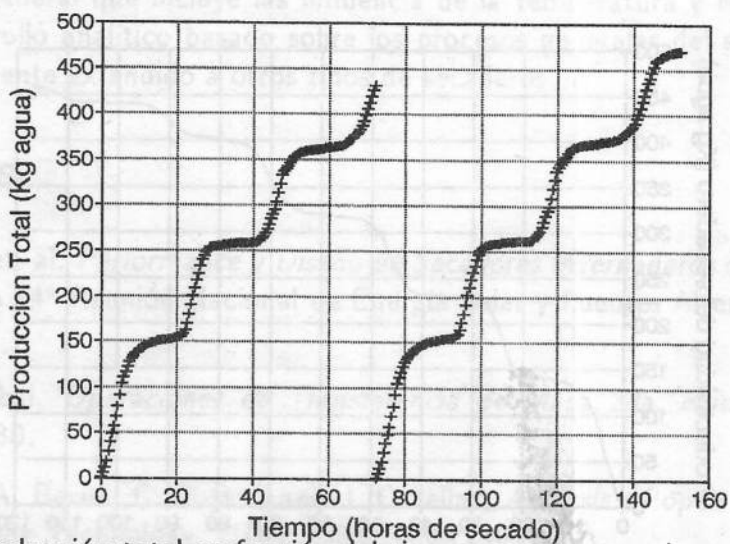


Figura 5: Producción total en función del tiempo para un secadero de doble cámara