

# SIMULACION DEL SECADO EN TUNEL

Víctor Passamai

INENCO\*, Universidad Nacional de Salta  
Buenos Aires 177 - 4400 Salta

## Resumen

En un trabajo anterior (1) se simuló por vía numérica el comportamiento de un sistema de colectores solares de plástico, obteniéndose como resultado la temperatura del aire que se usa para secar pimienta contenido en un túnel longitudinal de secado.

En este trabajo se plantean las ecuaciones que describen el proceso de secado en el túnel y se completa así la modelización numérica del conjunto que conforma un secadero solar de pimienta.

Para simular el secado del pimienta en el túnel se secado, se debieron realizar experiencias de laboratorio que permitieron formular un modelo de la pérdida de agua basado en una resistencia interna que se determinó como función del contenido de agua del fruto (2). A continuación se introdujo este modelo discreto en el túnel, dentro del cual se lo consideró distribuido.

## Introducción

Todos los secaderos de tipo túnel con carros y bandejas para deshidratación de frutos y vegetales tienen un aspecto común que los distingue de los otros tipos de secaderos. Esta característica es el método empleado para el manejo de la instalación (3). Normalmente, el producto se coloca partido sobre bandejas especiales fabricadas en madera, formando una capa delgada. Dependiendo del producto, la carga por bandeja oscila entre 5 a 15 Kg/m<sup>2</sup> para vegetales y 5 a 25 Kg/m<sup>2</sup> para frutas. Las bandejas apilan, una sobre otra, formando un carro que se puede desplazar a lo largo del túnel mediante ruedas. La altura de las bandejas apiladas puede llegar a los 1,5 - 2,1 m, según las condiciones de operación.

Las bandejas deben diseñarse de tal forma que exista pasaje del aire entre ellas y por sobre el producto. Los carros cargados son empujados, de a uno por vez, hacia el extremo seco del túnel, por donde entra el aire caliente. La longitud de los túneles es variable. Algunos pueden llegar a contener 4 ó 5 carros, otros llegan hasta 20. Durante la operación, el carro del extremo seco del túnel se extrae por una puerta lateral y, por el extremo húmedo del túnel, se introduce un carro cargado con producto fresco. El resto de los carros es empujado hacia adelante para cubrir el espacio vacante dejado por el carro removido. Esta es una operación cuasi-continua, cuya realización interesa simular con el modelo aquí planteado. Durante esta operación "progresiva", el flujo del aire caliente se realiza a lo largo de la capa superficial del material. Muy poco aire circula a través de la capa como sería el caso de un secadero con bandejas apiladas a lo largo de una única columna y el aire circulando en la dirección de la vertical. Se ha elegido el tipo de túnel de movimiento del aire en sentido contrario al del producto (Fig. 1).

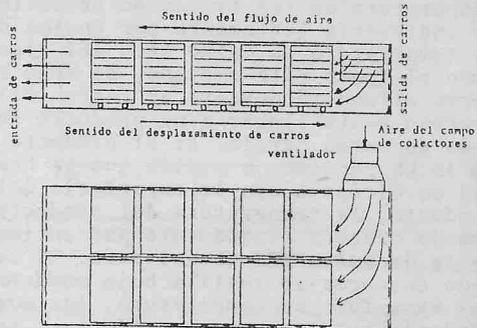


Figura 1: Túnel de secado a contracorriente

Para este túnel en contracorriente el aire caliente que proviene del campo de

\* Instituto UNSa. - CONICET

colectores o de otro sistema calefactor, tendrá una temperatura de bulbo húmedo mucho menor que su temperatura de bulbo seco. A medida que fluye por el túnel, la presencia de producto fresco hará que el aire tome humedad y baje su temperatura. El aire más seco y caliente se pone en contacto con el producto que está por terminar de ser secado, mientras que el aire más frío y húmedo lo hace con el producto recién ingresado que tiene mayor contenido de agua. La máxima temperatura del aire que puede alcanzarse depende del producto que se seca y está determinada por la temperatura que tolera el producto casi seco durante algunas horas sin daño perceptible. En este tipo de túnel, las condiciones de secado son suaves para el producto fresco y llegan a su máximo para el producto prácticamente seco. Teniendo en cuenta la teoría por la cual el producto presenta mayor resistencia al secado cuanto menores su contenido de agua (2), es razonable hacer uso del procedimiento en contrarriente para favorecer las condiciones del secado cuando es oportuno. La longitud del túnel no debe sobrepasar el límite para el cual existe condensación de agua del aire sobre el producto. Más aún, condiciones razonables de secado se pueden asegurar haciendo que en el extremo húmedo del túnel el aire tenga una temperatura y humedad tales que el proceso de evaporación esté asegurado.

Si el producto a secar se ha preparado adecuadamente, la temperatura del material situado en el extremo húmedo no superará la temperatura de bulbo húmedo del aire secado. A medida que progresa el secado y se desplaza el carro hacia la salida, el agua tiene mayor dificultad para atravesar la estructura interna del producto y la superficie del mismo se seca. En este momento la temperatura de los trozos de producto se incrementa lentamente por encima de la temperatura de bulbo seco del aire. Como el fruto está cortado, el agua interna difundirá durante el resto del proceso hasta llegar a un producto secado en forma pareja. Si el producto no se ha partido, a medida que la humedad se dirige hacia la superficie del producto, la temperatura del producto húmedo crecerá rápidamente por encima de la de bulbo húmedo del aire. El secado entonces se realiza bajo condiciones excesivas de temperatura, las que tenderán a hacer que el producto se parta y exista pérdida de líquido con abundante materia disuelta en él.

### Circulación forzada de aire

La introducción del movimiento forzado de aire es, según Kilpatrick et al, la contribución más importante al desarrollo de un deshidratador moderno. Antes de usarse ventiladores el movimiento del aire en los secaderos dependía de la circulación natural del aire caliente. El secado era lento y la eficiencia del secadero pobre, con un resultado final que obligaba al uso de un gran número de secaderos para una planta de una determinada capacidad.

Las velocidades de aire en los deshidratadores comerciales de tipo túnel oscilan entre 1,5 y 5 m/s para el túnel vacío. Esto implica un aumento de la velocidad entre el 50 y 100% cuando se considera la velocidad de aire sobre el producto cargado. Estudios realizados por Guillou y Moses (3) llevaron, sin embargo a la conclusión que, por las características de secado de ciruelas y la importancia de disminuir los costos de capital y operación, debe elegirse una velocidad de aire relativamente baja. Para secaderos de vegetales, por otro lado, la velocidad del aire en una sección vacía del túnel era de 4m/s. Para túneles con dimensiones de las usuales (2 m de ancho por 2,1 m de alto), los requerimientos de aire oscilan entre  $4m^3/s$  y  $20 m^3/s$ .

Al considerar el funcionamiento de ventiladores es costumbre estandarizar las condiciones del aire de modo que su densidad se toma en  $0,85 \text{ Kg/m}^3$ , correspondiente a aire a  $20 \text{ C}$  y una presión barométrica muy cercana a los 760 mm Hg. El funcionamiento de un ventilador para condiciones diferentes se puede pasar a otras mediante el uso de los manuales de ingeniería.

### Simulación numérica del túnel

El secadero, cargado con bandejas dispuestas horizontalmente de modo que los pimientos van soportados sobre ellas, se modelizó como un paralelepípedo que tiene una longitud  $L$  y una sección  $A$  como lo indica la Fig. 2.

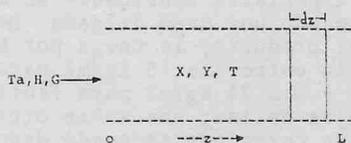


Fig. 2: Esquema del túnel de secado

En ésta,  $T_a$  es la temperatura del aire que proviene del colector,  $H$  la humedad relativa,  $G$  el flujo másico,  $X$  el contenido de agua en  $\text{Kg/Kg}$  de sólido seco,  $Y$  la humedad absoluta del aire y  $T$  la

la temperatura a lo largo del lecho. Esta última es función de la duración del proceso y de la longitud sobre la dirección indicada con  $z$ . Se supone que los cambios sobre los planos normales al eje  $z$  son despreciables.

Para hallar la variación del contenido de agua en función de la longitud del túnel y del tiempo de secado, se tomó una longitud  $dz$  del mismo y se supuso válida la siguiente ecuación que describe la cinética de secado:

$$-\partial x / \partial t = P_s (1-H) / r (X) \quad (1)$$

Con las siguientes condiciones iniciales:

$$X(0, z) = X_0$$

$$T(0, z) = T_a(0) \quad (2)$$

$$Y(0, z) = Y(0)$$

Además se agregaron las siguientes ecuaciones:

balance de agua:

$$G \partial Y / \partial z = (M_s / L) \partial X / \partial t \quad (3)$$

balance de energía:

$$G C_p \partial T / \partial z = (L_a M_s / L) \partial X / \partial t \quad (4)$$

donde  $M_s$  es el peso seco de pimiento,  $C_p$  la capacidad calorífica del aire y  $L_a$  el calor latente de vaporización del agua. Se aplicaron las hipótesis de igualdad de temperaturas para el producto y el aire y se despreció el intercambio térmico entre la estructura del túnel y el producto y las pérdidas al exterior. Se introdujeron las relaciones habituales para la humedad absoluta  $Y$  y la relativa  $H$ , así como la ecuación de Antoine (4) para la presión del vapor  $P_s$  del agua en el aire. Las ecuaciones en forma dimensionada se resolvieron mediante computadora aplicando un esquema explícito de diferencias finitas. La fig. 3 muestra resultados obtenidos de este modelo correspondientes a la variación del contenido de agua del pimiento en función de la longitud del túnel de secado y el tiempo como parámetro. Puede observarse que, por la disminución de la velocidad de secado cuando la radiación disminuye, las curvas se acercan entre sí. También es posible notar que la diferencia de contenido de agua entre las muestras ubicadas en las bocas de entrada y salida del aire caliente, aumenta a medida que transcurre el tiempo. Este hecho se tuvo en cuenta para la política de carga y descarga de los carros en el túnel.

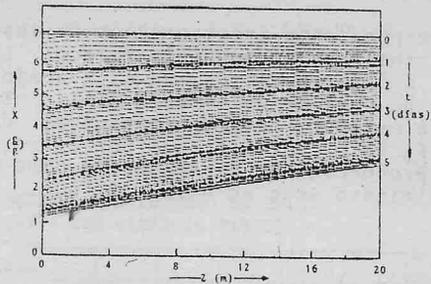


Fig. 3. Variación del contenido de agua en función de la longitud del túnel, con el tiempo como parámetro.

Los parámetros elegidos para la simulación fueron los siguientes:

$$X_0 = 7,15 \quad T_a(0) = 22C \quad H(0) = 0,30\%$$

$$L = 20 \text{ m} \quad v = 1 \text{ m/s} \quad \rho = 0,85 \text{ Kg/m}^3$$

$$A = 4,8 \text{ m}^2 \quad M_s = 330 \text{ Kg} \quad C_p = 1 \text{ KJ/Kg C}$$

$$L_a = 2400 \text{ K}^J/\text{Kg}$$

### Resultados de la simulación

La simulación del secado de pimientos redondos no partidos, permite ilustrar la predicción del funcionamiento del túnel durante un período aproximado de dos meses:

Una vez que el túnel se carga con unos 2700 Kg de pimiento fresco, se inicia el secado a las 9:00 horas del primer día, con 11 horas de funcionamiento del sistema por día, con los datos de radiación, temperatura externa y del aire de secado proveniente del colector dados por la Fig. 4, en promedio durante dos meses.

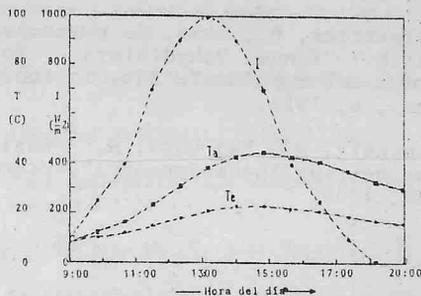


Fig. 4. Datos horarios de radiación (I) y temperatura externa (Te) que definen la temperatura simulada del aire a la salida del colector (Ta).

De acuerdo con los datos obtenidos de la simulación, el túnel deberá trabajar sin movimiento de carros durante los seis primeros días, hasta que en el séptimo deberá comenzar la extracción de cuatro carros por el extremo seco y la

correspondiente incorporación de los que contienen el producto fresco. La Fig. 5 ilustra el régimen de trabajo para un período de sesenta días. Se puede estimar, para una capacidad de 150 Kg de producto fresco por carro, una producción de alrededor de 2000 Kg de pimiento seco en dicho período.

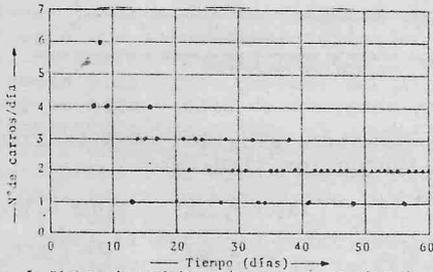


Fig. 5: Régimen de movimiento de carros en el túnel de secado.

La validación de estos resultados se realizó verificando la duración del proceso y el contenido de agua del pimiento. Sin embargo, se espera poder probar el programa de simulación del túnel mediante la toma de un conjunto completo de datos en experiencias futuras.

#### Referencias

1. Saravia, L.; Passamai, V.; Echazú, R.; "Secado solar de pimiento: Resultados Experimentales y su Simulación". ASADES, 9:1 (1984).
2. Passamai, V.: "Resistencia Global para el secado de productos vegetales", ASADES, 1986.
3. Kilpatrick, P., Lowe, E. y Van Ars del W.: "Tunnel Dehydrators for fruits and vegetables", Adv. in food Res., 6, 1955.
4. Zemansky, M., Van Ness, H.: "Basic Engineering Thermodynamics", McGraw ISE, 1966.