

RESISTENCIA GLOBAL PARA EL SECADO DE PRODUCTOS VEGETALES

Víctor Passamai

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

Resumen

Se desarrolla un estudio fenomenológico para la formulación de un modelo que permita la simulación del secado de productos vegetales. Las experiencias fueron realizadas con tabaco, pimientos, ciruelas y cebollas. Como resultado se ha encontrado que para cada vegetal se debe determinar, experimentalmente, una resistencia global a la transferencia de masa que es función del contenido de materia evaporable (fundamentalmente agua). La ventaja de esta forma de trabajo radica en que se evitan las determinaciones de las propiedades térmicas de los objetos que se secan, tales como conductividad y capacidad calorífica, sin que por ello el modelo planteado se aparte demasiado de los resultados que caben esperarse de las experiencias de secado.

Se ha elaborado un programa en BASIC que permite encontrar rápidamente la resistencia global del secado del producto de que se trate, a partir del ajuste de curvas obtenidas de experiencias realizadas bajo distintas condiciones de temperatura y humedad del aire.

Introducción

En un trabajo anterior (1) se justificó la posibilidad de describir la cinética del secado de tabaco mediante la determinación de una resistencia global. Se encontró que la forma de la expresión de la velocidad de pérdida de agua es la siguiente:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{P_v - P_s}{r}$$

Donde X es el contenido de materia evaporable definido en base seca, P_v la presión de vapor del aire del secadero, P_s la presión de saturación a la temperatura en que se está llevando a cabo el proceso y r la resistencia global a la evaporación.

logas a la anterior para la descripción del proceso del secado. Así por ej. Peck y Wasan (2) desarrollaron un modelo para el secado de materiales delgados, suponiendo que el término de resistencia al secado en la fase sólida es despreciable. Asimismo, se han presentado una gran cantidad de trabajos (3, 4, 5) que investigan las características del secado de productos vegetales a partir de muestras pequeñas que sirven para la determinación de las propiedades tales como coeficiente de difusión, de transferencia de masa, calor específico y otras. Se han desarrollado también técnicas para la determinación de propiedades de transporte necesarias para la simulación de procesos de secado, rehidratación y otros (6, 7).

En este trabajo se desarrolla un modelo que permita simular el secado de distintos productos vegetales, a partir de sencillas experiencias de laboratorio.

Teoría

La transferencia de calor desde el aire ambiente al interior del objeto que se seca, así como el movimiento de agua del producto al medio, son controlados, ambos, por dos resistencias al transporte: una externa, entre la superficie del producto y el aire, y otra interna, entre el interior del objeto y su superficie (Fig. 1).

Las resistencias externas para el transporte del calor y materia o los respectivos coeficientes de transferencia se pueden calcular o estimar a partir de un conocimiento suficiente de la geometría y el comportamiento fluidodinámico. Por otro lado, aunque la mayoría de las teorías son satisfactorias si la resistencia interna al transporte de agua es pequeña durante el secado, ello no ocurre cuando dicha resistencia es relativamente grande (2).

Otros autores usaron expresiones aná

* Instituto UNSa. - CONICET

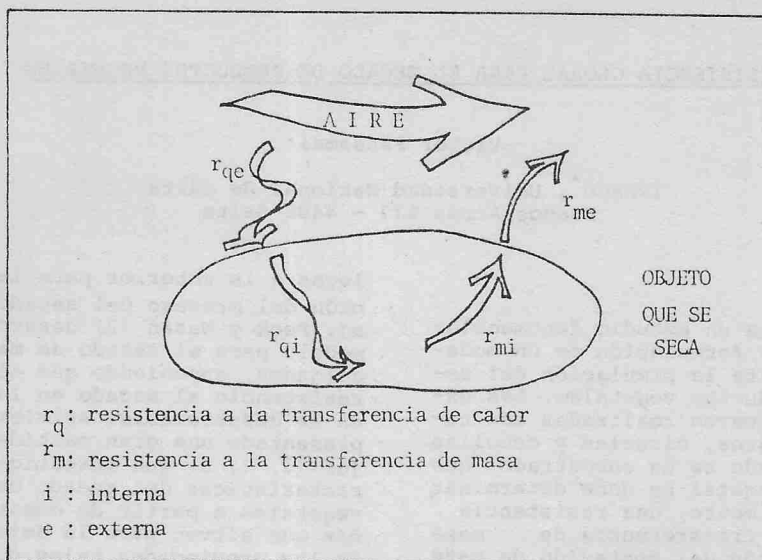


Fig. 1. Resistencias al transporte de calor y masa

Estas dificultades se superan considerando muestras con formas de paralelepípedo, esféricas o similar, para las cuales la integración de las ecuaciones se puede realizar en forma sencilla. No es lo mismo para geometrías complicadas ni para el caso en que se consideran objetos a granel, como es el de pimientos, ciruelas, etc.

Para simplificar estos inconvenientes y con el fin de poder realizar una simulación aceptable del proceso de secado sin la realización de experiencias que requieran de equipo demasiado específico, se desarrolló este modelo basado en las siguientes suposiciones:

1. El peso seco M_s del producto no cambia durante el proceso;
2. El potencial para la transferencia de agua desde el interior del objeto al medio ambiente está dado por la diferencia entre la presión de vapor del agua contenida en el seno del producto (P_{vp}) y la presión de vapor del aire circundante (P_v);
3. El coeficiente entre el potencial y la velocidad de evaporación define una resistencia global a la transferencia de masa;
4. La resistencia global es función solamente del contenido de agua

del producto;

5. La presión del vapor del agua del producto se toma igual a la presión de saturación a la temperatura del aire (P_s).

De acuerdo con la primera suposición la masa de agua M_a contenida en una masa M de producto es:

$$M_a = M - M_s \quad (1)$$

de modo que;

$$\frac{dM_a}{dt} = \frac{dM}{dt} \quad (2)$$

correspondientemente, el contenido de agua en base seca se define:

$$X = M_a/M_s = (M - M_s) / M_s \quad (3)$$

resultando:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{1}{M_s} \frac{dM}{dt} \quad (4)$$

Aplicando las suposiciones 2 y 3:

$$r = \frac{P_{vp} - P_v}{(-dX/dt)} \quad (5)$$

y según la suposición n° 4:

$$r = r(X) \quad (6)$$

Finalmente, la simplificación introdu-

cida mediante el punto n°5 permite hacer uso de la fórmula de Antoine (8) para calcular Pvp:

$$Pvp = Ps = \exp \left[a - b / (c - T) \right] \quad (7)$$

Por definición, la humedad relativa es:

$$\frac{H}{100} = \frac{Pv}{Ps} \quad (8)$$

Reemplazando las ecuaciones (4), (6) y (8) en (5):

$$r(X) = \frac{Ms Ps (1 - H/100)}{dM/dt} \quad (9)$$

Esta última expresión establece un resultado que tiene el carácter de correlación experimental.

Método experimental

El secadero de laboratorio se diseñó de modo que la muestra a tratar fuera representativa del producto a la escala real. Las variables fundamentales cuyos valores deben ser medidos son el peso de la muestra, la temperatura del aire y su humedad relativa.

El dispositivo para medir los pesos consiste en una balanza cuya apreciación puede ser hasta de 20 g, su poniendo que la cantidad inicial de la muestra fresca fuera de unos 4kg. Con ello el error máximo para las pesadas no supera el 5%. Si la duración del proceso del secado es de algunos días, la medición de la evolución del peso puede realizarse cada 5-8 horas, pues no es necesaria una gran cantidad de puntos para lograr una buena correlación para la curva de M en función del tiempo y poder calcular luego dM/dt, necesaria para la ecuación (9).

La temperatura del aire debe controlarse para que su valor se mantenga dentro del rango prescrito para el proceso a nivel industrial. El dispositivo usado es un termostato que interrumpe la corriente sobre las resistencias calefactoras cuando el valor de la temperatura del aire supera el valor recomendado para obtener una buena calidad del producto de que se trate. Dado que el secadero fue aislado térmicamente y a que por su tamaño, tiene cierta inercia térmica, las fluctuaciones de temperatura carecen de importancia. Para estos casos aquélla se mantuvo alre-

dedor del 5% del valor deseado.

La variable crítica es la humedad relativa del aire. Salvo para el caso del tabaco, los niveles de humedad relativa no son de importancia fundamental para la mayoría de los otros productos. Sin embargo, para la determinación de la resistencia interna del secado, es necesario contar con medidas confiables de esta variable. Se usó un termómetro de bulbo húmedo juntamente con el empleado para medir la temperatura del aire, pero este método fue descartado porque se requiere una velocidad estándar de aire para la lectura. Luego se midió con un higrómetro de hilo, pero también se desechó porque existen impedimentos mecánicos para asegurar la reproducibilidad de las medidas. Finalmente, se usó una sonda Vaisala calibrada mediante soluciones estándares.

La velocidad del aire se fijó en alrededor de 1 m/s, de acuerdo con los valores que se midieron en los dispositivos de escala real.

La toma de datos se realizó en planillas metodizadas según la siguiente tabla:

Tabla I: Planilla para la toma de datos

Fecha	Hora	N. de medida	Peso (g)	Temp. (C)	H(%)

donde, si el proceso dura algunos días, la hora se puede leer con una apreciación de 30 minutos, el peso hasta 20 gramos, la temperatura hasta el grado y la humedad relativa hasta el 2%.

Finalizado el proceso, el peso seco Ms puede determinarse luego de llevar las muestras a 105 C durante alrededor de 8 horas. En algunos casos, como se determinó para pimientos, puede tomarse como dato el peso de equilibrio para el cual el producto no pierde más agua, en las condiciones finales de temperatura y humedad del aire del secadero.

Procesamiento de los datos

Los datos de la tabla anterior, junto con el de peso seco y elección conveniente de escalas para las salidas gráficas, son llevados a computadora para su procesamiento. El programa devuelve al usuario lo siguiente:

1. Una tabla del tipo:

Tabla II: Planilla de datos procesados

Nº medida	Tiempo (h)	Peso (g)	Temp. (c)	H(%)
i	hh.m	Mi	Ti	Hí

2. El contenido inicial de agua, X_1 , calculado de la expresión:

$$X_1 = (M_1 - M_s) / M_s$$

3. El gráfico de peso vs. tiempo;
4. Una correlación polinómica conveniente para $M(t)$;
5. Correlaciones para la temperatura y la humedad en función del tiempo $T(t)$ y $H(t)$;
6. La determinación de la resistencia global para el secado como función del contenido de agua, $r = r(X)$, a partir de la expresión (5), para la cual se busca una correlación polinómica de la forma:

$$1/r = A_0 + X (A_1 + X (A_2 + X (A_3 + \dots)))$$

En el caso del tabaco se encontró una correlación diferente.

Validación del modelo

Tabla III: Resistencias globales al secado

Vegetal	$r(X)$ (sPa)	Rango de validez
Tabaco:	$(10^9 / X^{1,2+0,06 X}) + 1800000$	$0,2 \angle X \angle 11$
Pimientos Largos:	$3,6 \cdot 10^9 / (2,7 - 0,19 X + 0,03 X^2 + 0,06 X^3)$	$0,2 \angle X \angle 10$
Pimientos Redondos:	$3,6 \cdot 10^9 / (1,3 + 12 X - 2,3 X^2 + 0,15 X^3)$	$0,1 \angle X \angle 10$
Ciruelas:	$3,6 \cdot 10^9 / (2 + 2 X + 0,4 X^2 - 0,001 X^3)$	$0,1 \angle X \angle 10$
Cebollas (partidas en dos):	$3,6 \cdot 10^9 / (2,42 + 0,6 X + 0,1 X^2 + 0,01 X^3)$	$0,1 \angle X \angle 20$

Una vez hallada una relación $r = r(X)$, cuyo coeficiente de correlación tenga un valor cercano a 1, la validez del modelo, es decir de la relación (5), se debe verificar realizando su integración para distintas condiciones de temperatura y humedad y comparando el resultado con valores medidos de X .

Un parámetro fundamental para la verificación es el tiempo de duración del proceso de secado. Este es determinado a partir del dato experimental de contenido final de agua o de equilibrio del producto que se seca, que es función de la temperatura y humedad del ambiente que circunda el fruto.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de experiencias de secado posteriores a la que permitieron obtener la función $r(X)$, se considera aceptable una discrepancia del 10% para los tiempos finales de proceso obtenidos a partir del modelo, mientras que las diferencias en los valores de contenido de agua pueden llegar a ser mayores, teniendo en cuenta que hacia el final del proceso X puede ser menor que uno.

Resultados experimentales

La tabla siguiente muestra las correlaciones halladas para $r(X)$ en el caso de los vegetales mencionados:

En la Fig. 2 se observan las curvas de secado para algunos de estos casos. En cada uno, la diferencia máxima entre el valor medido y el del modelo no supera el 10%.

ner, W. y Fiebig, M.: "Función empírica para la transferencia de masa durante el secado de tabaco Virginia", - Chem.-Ing.-Tec.56(1984)n°10-775-777.-

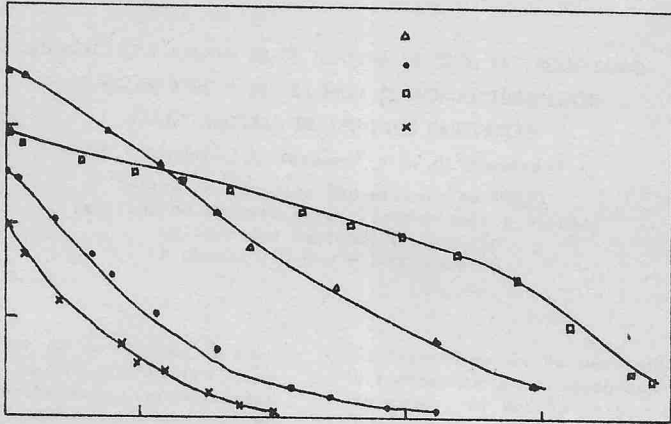


Fig. 2: Curvas de secado

Conclusiones

La simulación del proceso de secado debe servir a los fines del diseño de secaderos industriales. Con la cinética determinada para cada objeto que se seca, es posible aplicar la modelización para distintas situaciones, tal como el secado en túnel. Las experiencias de laboratorio deben reflejar el proceso de escala real. La velocidad responderá a una carga "puntual" y su aplicación para el caso distribuido será inmediata. Este trabajo se ha realizado para el caso del pimiento (9).

Como trabajo futuro, se espera poder realizar una mayor cantidad de experiencias de secado en condiciones variadas de temperatura y humedad. Esto permitirá, por un lado, verificar el grado de validez del modelo presentado y, además, determinar los intervalos de trabajo que aseguran una buena calidad de producto. Asimismo, se espera ampliar la lista de productos que son de interés para la aplicación del secado mediante el uso de la energía solar y de los cuales no se tiene un modelo de simulación sencillo.

Referencias

1. Passamai, V., Morhenne, J., Lei -

2. Peck, R. y Wasan, D.: "Drying of solid particles and sheets" Adv. Ch. Eng., V.9, 247, 1974.
3. Villota, R. y Karel, M.: "Prediction of Ascorbic Acid retention during drying. I. Moisture and temperature distribution in a model system", J. of Food Proc. and Preserv. 4 (1980) 111-134.
4. Cheng, S. y Johnson, W.: "High temperature convective drying of tobacco during curing: I. Effect of air temperature and velocity on leaf temperature and drying rate". Tob. Sci.56:23-28, 1971.
5. Chirife, J.: "Diffusional process in the drying of tapioca root", J. Food Sci. 36,327-330, 1971.
6. Lozano, J., Urbicain, M. y Rotstein, E.: "Thermal conductivity of apples as a function of moisture content". J. Food Sci. 44, 198-199 1979.
7. Lozano, J., Rotstein, E. y Urbicain, M.: "Total porosity in the drying of fruits", J. Food Sci.45, 1403-1407, 1980.
8. Zemansky, M. y Van Ness, H.: "Basic Engineering Thermodynamics"; McGraw, Tokyo, 1966.