

# **APROXIMACION DE PRIMEROS PRINCIPIOS Y REDES NEURONALES EN MODELACIÓN DE UN SECADOR DISCONTINUO DE LECHO VIBROFLUIDIZADO**

**J. E. Gómez\*\*, F. A. Cubillos\* y P. I. Álvarez\***

\*Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Química  
Casilla 10233, Santiago, Chile, francisco.cubillos@usach.cl

\*\*Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Alimentos  
Casilla 4059, Valparaíso, Chile, jaimed.gomez@ucv.cl

## **RESUMEN**

El presente trabajo tuvo como objetivo la modelación y simulación del secado discontinuo en un secador de lecho vibrofluidizado de escala piloto. El modelo considera el efecto de retromezcla y distribución axial mediante el establecimiento de zonas de secado interconectadas entre sí. Las ecuaciones del modelo consisten en los balances diferenciales de masa y energía para cada zona en la fase sólida, mientras que en la fase gas se considera mezcla completa. Los parámetros de secado y de transferencia de calor se correlacionan con las condiciones de operación mediante tres redes neuronales que han sido adaptadas de datos obtenidos experimentalmente. El sistema de ecuaciones álgebra-diferencial entrega los perfiles de humedad de sólido y temperatura del lecho como función del tiempo. El modelo fue validado con datos experimentales de secado de semillas de raps. Se encontró un buen ajuste utilizando sólo cuatro zonas de secado.

## **MARCO TEORICO**

Basados en la segunda ley de Fick, se han desarrollado modelos fenomenológicos para secado fluidizado. Algunos incluyen la resistencia externa a la transferencia de masa, mientras otros consideran la difusividad efectiva como función del tiempo de secado (Alvarez y Shene, 1996). Los últimos han dado excelentes resultados en la predicción de las curvas de humedad de biomateriales (Muñoz, 1999).

Algunos autores han propuesto modelos para distintos tipos de secadores fluidizados, partiendo de los balances de masa y energía asociados a las fases sólida y gaseosa (Wang y Chen, 2000; Paláncz, 1983). Estos modelos tienen una amplia aplicabilidad, pero requieren el conocimiento de un número considerable de parámetros y datos acerca del secador, propiedades del sólido y del gas, que no siempre son conocidos o se pueden estimar sólo aproximadamente. Además, la complejidad matemática de algunos modelos dificulta el uso y la implementación de estos en aplicaciones de control de procesos (Palancar y col., 2001).

Los modelos que utilizan redes neuronales como metodología de predicción han mostrado excelentes resultados en secado de biomateriales (Palancar y col., 2001; Ciesielski y Zbicinski, 2001). Recientemente, Cubillos y Reyes (2003), han presentado un esquema modular para las predicciones de curvas de secado de zanahorias en un secador de lecho fluidizado. En este trabajo se plantea un modelo general basado en primeros principios (balances de materia y energía), junto con redes neuronales, usadas para predecir el efecto de la frecuencia y amplitud de la vibración sobre el secado.

En el interior del secador vibrofluidizado el material sólido experimenta un movimiento circulatorio, fenómeno estudiado por Yang y Hsiau (2000), y que aquí es denominado retromezcla ( $R$ ). El presente modelo considera el efecto de  $R$  y la distribución axial mediante el establecimiento de zonas de secado interconectadas.

## OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo, fue modelar y simular el proceso de secado en lecho vibrofluidizado de semillas de raps (*Brassica napus*), en un equipo de operación discontinua. Para ello, se utilizó un modelo de parámetros concentrados basado en primeros principios, junto con redes neuronales para ajustar parámetros de una expresión de velocidad de secado, considerada función de la temperatura y humedad del sólido.

## MODELO MATEMÁTICO

El sólido dentro del secador se considera dividido en  $n$  zonas con mezcla completa, en cada una de las cuales ocurren la transferencia de calor y materia (Figura 1). El volumen de gas en contacto con el sólido se supone también en mezcla completa e incompresible debido a los pequeños rangos de presión en el secador. Los parámetros  $C_{ps}$ ,  $X_e$ ,  $\lambda_v$ , y  $M_s$ , son los mismos en cada zona. Las pérdidas de calor a través de las paredes del cilindro se consideran despreciables, debido a los rangos de temperaturas usados en el secador. El modelo considera el efecto de la circulación interna del sólido,  $R$ , definido como un flujo neto de sólido que ingresa a una zona dada.

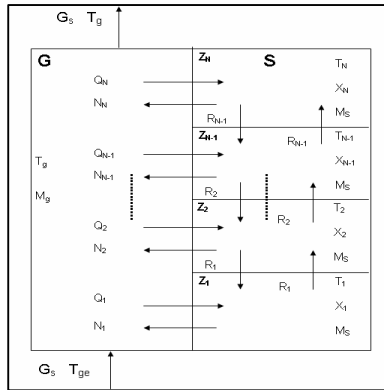


FIGURA 1. Esquema del modelo para el secador de lecho vibrofluidizado.

Las ecuaciones básicas del modelo corresponden a los balances de humedad y energía realizados para las  $n$  zonas de sólido de secado, más el balance de energía del gas en el interior del secador.

Para la zona  $j = 1$ ,

$$M_s \frac{dX_1}{dt} = R_1(X_2 - X_1) - N_1 M_s \quad (1)$$

$$M_s C_{ps} \frac{dT_1}{dt} = R_1 C_{ps} (T_2 - T_1) - N_1 \lambda_v M_s + U_1 a_1 M_s (T_g - T_1) \quad (2)$$

En la zona  $j$ , con  $1 < j < n$ ,

$$M_s \frac{dX_j}{dt} = R_{j-1}(X_{j-1} - X_j) + R_j(X_{j+1} - X_j) - N_j M_s \quad (3)$$

$$M_s C_{ps} \frac{dT_j}{dt} = R_{j-1} C_{ps} (T_{j-1} - T_j) + R_j C_{ps} (T_{j+1} - T_j) - N_j \lambda_v M_s + U_j a_j M_s (T_g - T_j) \quad (4)$$

Para la zona  $j = n$ ,

$$M_s \frac{dX_n}{dt} = R_{n-1}(X_{n-1} - X_n) - N_n M_s \quad (5)$$

$$M_s C_{ps} \frac{dT_n}{dt} = R_{n-1} C_{ps} (T_{n-1} - T_n) - N_n \lambda_v M_s + U_n a_n M_s (T_g - T_n) \quad (6)$$

y el balance de energía para el gas,

$$M_g C_{pg} \frac{dT_g}{dt} = G_s C_{pg} (T_{ge} - T_g) - \sum_{j=1}^n U_j a_j M_s (T_g - T_j) + \sum_{j=1}^n N_j \lambda_v M_s \quad (7)$$

Una solución de variables separadas es postulada para la velocidad de secado considerando el contenido de humedad y la temperatura del sólido como variables independientes; esto es:  $N=f(T)*g(X)$ . Por lo tanto, la velocidad de secado en cada zona, se plantea como función de la temperatura y de la humedad del sólido, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$N_j = \left[ \alpha \times e^{-\left(\frac{\beta}{T_j + 273.15}\right)} \right] \left[ \frac{X_j - X_e}{X_i} \right] \quad (8)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros ajustables dependientes de las principales condiciones de operación del secador.

Debido a que las mediciones de humedad y temperatura experimentales son consideradas como “mediciones de mezcla”, el análisis de los resultados se efectúa considerando como salida del modelo, la humedad de mezcla de sólido  $X_M$ , la temperatura de mezcla de sólido  $T_M$ , y la velocidad de secado de mezcla de sólido  $N_M$ .  $X_M$  se obtiene de la contribución de cada zona de secado, despreciando el contenido de humedad que aporta la pequeña masa de gas contenida en el secador. Para obtener  $T_M$ , se realiza un balance de energía de acuerdo a la ecuación (9); en la práctica el segundo término corresponde aproximadamente a un 1% de todo el contenido energético.

$$M_T C_{PM} T_M = n M_s C_{Ps} T_s + M_g C_{Pg} T_g \quad (9)$$

Las expresiones para las salidas de mezcla del modelo son las siguientes:

$$X_M = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{n} \quad (10)$$

$$N_M = -X_i \frac{dX_M}{dt} \quad (11)$$

$$T_S = \frac{\sum_{j=1}^n T_j}{n} \quad (12)$$

$$T_M = 0.99 \cdot T_S + 0.01 \cdot T_g \quad (13)$$

Los parámetros de secado ( $\alpha$  y  $\beta$ ) y de transferencia de calor ( $U_a$ ), se correlacionan con las condiciones de operación mediante tres redes neuronales que han sido adaptadas de datos obtenidos experimentalmente, de acuerdo al esquema mostrado en la Figura 2. Se usaron redes neuronales *feed-forward* estándares con funciones de activación sigmoidal y una capa oculta. Mediante un procedimiento sistemático, se encontró que utilizando 11 nodos en la capa interna, las predicciones son aceptables (menos de 1% de error).

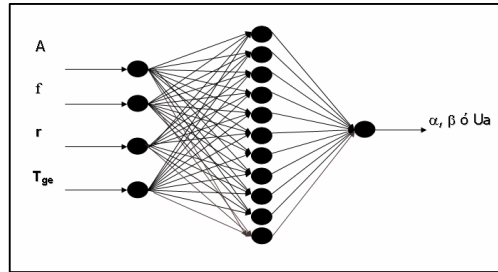


FIGURA 2. Esquema de las redes neuronales para correlacionar los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $U_a$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 3 y 4 muestran el buen grado de correlación entre el modelo y los datos experimentales. En la Figura 5 se observa el ajuste que realiza el modelo, en las condiciones de operación:  $A = 1.95$  mm,  $f = 19.70$  Hz,  $r = 0.98$ ,  $X_i = 0.376$  Kg H<sub>2</sub>O / Kg ss .

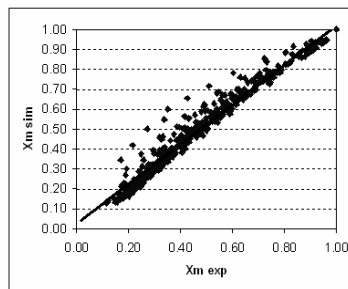


FIGURA 3. Datos experimentales versus predichos de humedad de mezcla del sólido. Coeficiente de correlación  $R^2 = 0.9741$ .

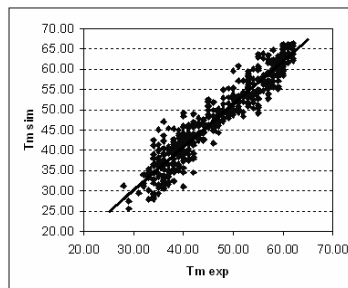
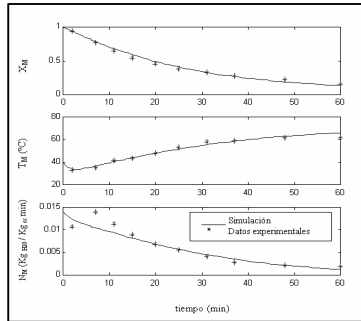


FIGURA 4. Datos experimentales versus predichos de temperatura de mezcla del sólido. Coeficiente de correlación  $R^2 = 0.9018$ .

Para ver el efecto que causa la variación del parámetro  $R$  sobre las curvas típicas de secado, se hizo un análisis bajo las mismas condiciones de operación anteriores. De los resultados presentados en la Figura 6, se concluye que los flujos  $R_j$  no modifican

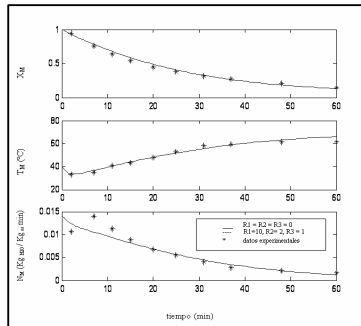
grandemente estas curvas. Se ha encontrado, que en un lecho vibrofluidizado primero fluidiza la capa inferior de partículas sólidas (Lobo, 2000), lo que sugiere, que la remoción de humedad es mayor en la primera zona, y va disminuyendo hacia arriba. Esto debiera producir que las velocidades de secado  $N_j$ , los flujos de calor  $Q_j$  y los valores  $R_j$  sean decrecientes al ir pasando de la zona 1 a la  $n$ , situación que seguramente debe modificar el tiempo de secado.

Haciendo uso del modelo y de su buena capacidad predictiva, se analiza el comportamiento del sistema si se cambia la frecuencia y la amplitud de la vibración.

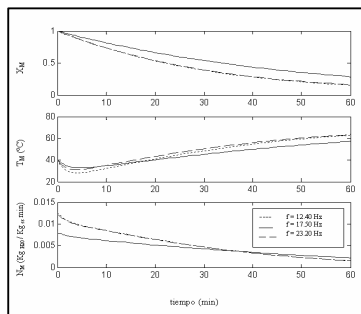


**FIGURA 5.** Datos experimentales y simulación.  $A = 1.95 \text{ mm}$ ,  $f = 19.70 \text{ Hz}$ ,  $r = 0.98$ ,  $X_i = 0.376 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg ss}$ .

Se observa que trabajando con amplitudes y flujos de aire bajos, altas frecuencias de vibración causan una disminución en el tiempo de secado, como se observa en la Figura 7; también, se produce un aumento de la temperatura del sólido durante la segunda mitad del tiempo de proceso.

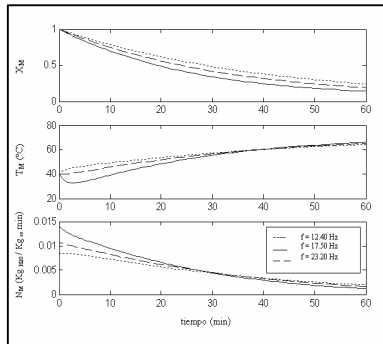


**FIGURA 6.** Efecto de  $R$  sobre  $T_M$ ,  $X_M$  y  $N_M$ .  $A = 1.95 \text{ mm}$ ,  $f = 19.70 \text{ Hz}$ ,  $r = 0.98$ ,  $X_i = 0.376 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg ss}$ .



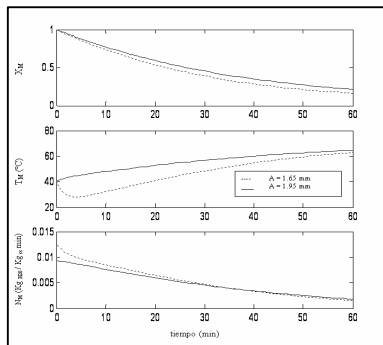
**FIGURA 7.** Efecto de la variación de la frecuencia de vibración sobre  $X_M$ ,  $T_M$  y  $N_M$ , para  $A = 1.65 \text{ mm}$ ,  $r = 0.66$ ,  $X_i = 0.371 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg ss}$ .

Ahora, si vemos lo que ocurre a amplitudes y flujos de aire mayores, la Figura 8 muestra que las altas frecuencias producen un comportamiento similar al anterior.

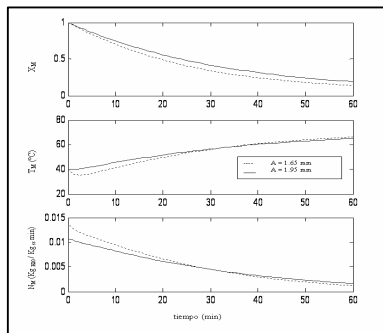


**FIGURA 8.** Efecto de la variación de la frecuencia de vibración sobre  $X_M$ ,  $T_M$  y  $N_M$ , para  $A = 1.95 \text{ mm}$ ,  $r = 0.98$ ,  $X_i = 0.371 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg ss}$ .

Las Figuras 9 y 10 muestran el efecto del cambio en la amplitud de la vibración, para flujos de aire y frecuencias fijos. A bajos y altos valores de estas variables, cuando se opera el secador discontinuo a bajas amplitudes, el tiempo de secado disminuye.



**FIGURA 9.-** Efecto de la variación de la amplitud de vibración sobre  $X_M$ ,  $T_M$  y  $N_M$ , para  $f = 12.40 \text{ Hz}$ ,  $r = 0.66$ ,  $X_i = 0.371 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg ss}$ .



**FIGURA 10.-** Efecto de la variación de la amplitud de vibración sobre  $X_M$ ,  $T_M$  y  $N_M$ , para  $f = 23.20 \text{ Hz}$ ,  $r = 0.98$ ,  $X_i = 0.371 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg ss}$ .

## CONCLUSIONES

El modelo matemático introducido aquí está basado en los balances de masa y energía del sólido y el gas, permitiendo simular el comportamiento del secador discontinuo. La inclusión de un parámetro de retromezcla permitió el estudio de un patrón de fluidización más realista, aunque no se observaron grandes variaciones.

El uso de redes neuronales para correlacionar los parámetros asociados a la transferencia de calor y materia, y las características de la vibración (amplitud, frecuencia y dirección del movimiento), fue muy exitoso.

Cuando el modelo es comparado con resultados experimentales para secado de semillas de raps, se obtuvo un excelente ajuste sobre un amplio rango de condiciones de operación.

Para mejorar el análisis del secado en lecho vibrofluidizado con el modelo propuesto, podría ser de interés incorporar perfiles de la variable retromezcla determinados por pruebas experimentales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, P.I.; Shene, C. (1996) Experimental Study of the Heat and Mass Transfer during Drying in a Fluidized Bed Dryer. *Drying Technology*, 14 (3-4), 701-718.
- Ciesielski, K.; Zbicinski, I. (2001) Hybrid Neural Modeling of Fluidised Bed Drying Process. *Drying Technology*, 19 (8), 1725-1738.
- Cubillos; F., Reyes, A. (2003) Drying of carrots in a fluidized bed. *Drying Technology*, 21 (7), 1185-1190.
- Lobo P. (2000) Fluido-dinámica de un Lecho Vibrofluidizado Cilíndrico. Trabajo de Titulación, Universidad de Santiago de Chile.
- Muñoz R. (2002) Secado de Materiales Granulares en un Lecho Vibro- Fluidizado. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con mención en Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Chile.
- Palancar, M.C.; Aragon, J. M.; Castellanos, J.A. (2001) Neural Network Model for Fluidised Bed Dryers. *Drying Technology*, 19 (6), 1023-1044.
- Palancz, B. (1983) A Mathematical Model for Continuous Fluidized Bed Drying. *Chemical Engineering Science*, 38 (7), 1045-1059.
- Wang, Z.H.; Chen, G. (2000) Heat and Mass Transfer in Batch Fluidized-Bed Drying of Porous Particles. *Chemical Engineering Science*, 55, 1857-1869.
- Yang, S.C.; Hsiau, S.S. (2000) Simulation Study of the Convection Cells in a Vibrated Granular Bed. *Chemical Engineering Science*, 55, 3627- 3637.