

VALIDACION DE UN MODELO MATEMATICO DEL SECADO – TOSTADO DE SOJA REMOJADA EN LECHO FLUIDIZADO. SIMULACION DE LA RECUPERACION DE ENERGIA

Torrez Irigoyen, Ricardo M.^{1,2}; Giner, Sergio A.^{1,2,3}.

¹Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecología de Alimentos (CIDCA). Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Calle 47 y 116 (1900)- La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

²Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

³Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Palabras clave: Soja, Secado-tostado, Lecho fluidizado, Transferencia de materia y energía.

1. Introducción.

La soja tiene alto contenido proteico y buen balance de aminoácidos, resultando ideal para complementar la alimentación. A efectos de desarrollar un producto snack listo para consumir se estudió un proceso de cocción, inactivación y secado-tostado de soja para producir un producto poroso y crocante. La técnica de lecho fluidizado se ha empleado a nivel industrial debido a la alta velocidad de transferencia de calor y el intenso mezclado que conduce a un tratamiento más uniforme del producto. En el secado de materiales biológicos, se presenta un proceso complejo debido a los fenómenos simultáneos de transferencia de calor y materia en el interior de las partículas. Por tanto, a efectos de optimizar el proceso y la calidad del producto final es necesario conocer tales fenómenos con mayor detalle (Bialobrzewski y col., 2008).

En trabajos previos realizados en nuestro laboratorio se determinó y modeló la densidad y volumen de granos remojados y parcialmente secados-tostados en lecho fluidizado, en función del contenido de humedad, hallándose que tanto el volumen de los granos como su densidad decrecen con el contenido de agua (Torrez Irigoyen y Giner, 2011a). Posteriormente, al estudiar el comportamiento fluidodinámico de un lecho de soja durante el tratamiento térmico, se encontró que la velocidad superficial del aire necesaria para mantener una fluidización y un mezclado intenso se reducía conforme disminuía la humedad, es decir, conforme aumentaba el tiempo a lo largo del proceso, lo cual permite limitar el consumo energético (Torrez Irigoyen y Giner, 2011b). Previo al desarrollo de un modelo de lecho fluidizado se estudió la cinética de secado en capa delgada. Con este fin, se desarrolló un modelo difusivo que consideró transferencia de materia local con contracción volumétrica y coeficiente de difusión variable (D_{eff}), acoplado a la predicción de la curva de temperatura mediante un balance macroscópico de energía (Torrez Irigoyen y col., 2014). En este trabajo se plantea el estudio del secado de un lecho de granos de soja remojados; a diferencia del caso de capa delgada, la humedad y temperatura del aire experimentarán cambios medibles durante el secado. Los balances correspondientes que los describen se incorporaron al modelo matemático para obtener un “modelo del lecho”. Markowski y col. (2010) destacaron que, para un estudio riguroso, el modelado en lecho fluidizado requiere en primer lugar del análisis y entendimiento de la distribución de humedad y temperatura en el grano.

Con respecto a su aplicación en alimentos, en la bibliografía se encontraron trabajos de diversos autores como Prachayawarakorn y col. (2006) quienes estudiaron el secado de soja en lecho fluidizado para inactivar los factores antitripticos aunque ninguno incluía una interpretación o modelado de las condiciones de transferencia de materia y energía en el lecho. Por tanto, es limitada la información relacionada al secado en lecho fluidizado particularmente en soja remojada. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo y un programa de simulación de lecho fluidizado en lenguaje Matlab a partir de un modelo de capa delgada previamente desarrollado, vinculándolo con balances macroscópicos de materia (agua) y energía en el equipo, a fines de calcular la variación de la humedad y

temperatura del aire a la salida, dadas las condiciones de entrada además de las variaciones de la temperatura y contenido de humedad de los granos en el lecho.

2. Consideraciones teóricas.

2.1. Modelo matemático para el secado en lecho fluidizado.

Un modelo matemático de lecho fluidizado debe ser capaz de predecir la evolución de cuatro variables fundamentales del secado: humedad media del lecho (W_m), temperatura media del lecho (T_m), temperatura del aire a la salida (T_{a2}) y humedad absoluta del aire a la salida (h_{a2}), en función del tiempo. Así que deben deducirse 4 ecuaciones independientes. Las suposiciones realizadas son las siguientes: 1) Las pérdidas de calor en el lecho fluidizado son despreciables frente a la transferencia de aire grano; 2) Los términos de acumulación en el aire son despreciables frente a los correspondientes aportes convectivos. 3) El mezclado de aire y granos dentro del lecho es perfecto; 4) Debido a la suposición 3), la temperatura de salida del aire puede aproximarse igual a la temperatura del lecho; 5) Debido a la suposición 3), la velocidad de secado en el lecho ($-dW_m/dt$) representa al total del lecho, al igual que la variación de temperatura del producto (dT_m/dt); 6) La velocidad del aire en la sección transversal del lecho es uniforme.

2.2. Ecuaciones del modelo de secado en lecho fluidizado.

2.2.1 Balance microscópico de materia en los granos del lecho.

El cálculo de la velocidad de secado se realiza con un balance microscópico de materia que predice un perfil de humedad local en función de la coordenada espacial de la partícula (Torrez Irigoyen y col., 2014). Calculando la humedad media de ese perfil en cada tiempo, se tiene

$$m_W = m_{SL} \left(-\frac{dW_m}{dt} \right) \quad (1)$$

Donde

$$m_{SL} = \rho_{s0} (1 - \varepsilon_0) S Z_{\max}$$

corresponde a la masa seca del lecho, basada en la altura de lecho fijo, Z_{\max} , en m, ρ_{s0} es la relación entre la masa seca y el volumen inicial del grano, kg/m^3 , ε_0 la fracción de huecos o porosidad de lecho fijo y S representa la sección transversal de la cámara de secado, en m^2 .

2.2.2. Balance macroscópico de materia en el aire

La ganancia de humedad absoluta por parte del aire se debe a la pérdida de agua en todo el lecho

$$\rho_a V_0 S (h_{a2} - h_{a1}) = m_{SL} \left(-\frac{dW_m}{dt} \right) \quad (2)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire en kg/m^3 y V_0 representa la velocidad de fluidización en m/s . Obsérvese que h_{a2} va a depender del tiempo, a diferencia de h_{a1} que se mantendrá constante.

$$h_{a2} = h_{a1} + \frac{\left(-\frac{dW_m}{dt} \right) m_{SL}}{\rho_a V_0} \quad (3)$$

2.2.3 Balance macroscópico de energía en los granos del lecho.

El balance macroscópico de energía se aplica a todos los granos del lecho, se diferencia del propuesto para un solo grano en que ahora se considera la masa seca del lecho

$$\rho_a V_0 S C_{pa} (T_{a2} - T_{a1}) = m_{SL} \left[L_w \left(-\frac{dW_m}{dt} \right) + C_p \frac{dT_m}{dt} \right] \quad (4)$$

donde C_p es la capacidad calorífica del grano en base seca, J/kg grano seco °C, L_w el calor de vaporización del agua a la temperatura del lecho, J/kg, C_{pa} la capacidad calorífica del aire, J/kg °C, T_{a1} y T_{a2} las temperaturas del aire a la entrada y la salida respectivamente, en °C. Esta ecuación representa que el flujo de calor del aire al grano se utiliza en parte para abastecer el calor latente de vaporización, y en parte para aportar calor sensible a los granos, lo que eleva su temperatura. Si se asume que el aire deja el lecho en equilibrio térmico con los sólidos del lecho, $T_{a2} = T$ (Kunii y Levenspiel, 1969). Por tanto, reordenando la Ec.(4) obtenemos finalmente la ecuación diferencial ordinaria que predice la variación de la temperatura media de los granos en el lecho

$$\frac{dT_m}{dt} = \rho_a V_0 S C_{pa} (T_{a1} - T) - m_{SL} \left(-\frac{dW}{dt} \right) L_w \quad (5)$$

La Ec.(5) nos dice que la evolución de la temperatura de los granos con el tiempo dependerá de la pérdida de temperatura del aire en su paso por el lecho y de la demanda de calor establecida por la desorción de agua.

3. Resolución numérica del modelo de secado en lecho fluidizado.

El sistema a resolver, está compuesto por el balance microscópico de materia con volumen variable de partícula y difusividad variable, que se resuelve aquí para una condición de contorno W_e determinada por la Ecuación de Halsey modificada (Torrez Irigoyen y Giner, 2014).

dW/dt = el modelo cinético con volumen y difusividad variable, previamente descrito y validado (Torrez Irigoyen y col., 2014), que aproxima la dW_m/dt mediante $(W_{t+\Delta t} - W_t)/\Delta t$, siendo $W_{t+\Delta t}$ y W_t las humedades medias de partícula, que fueron integradas a partir de las humedades locales calculadas dentro de la partícula a los tiempos t y $t+\Delta t$, respectivamente. Las condiciones iniciales para los granos son en el interior de cada grano y por tanto en el lecho:

$$t=0 \quad W = W_0 \quad (6)$$

con respecto al balance microscópico de energía en los granos Ec.(5), las condiciones iniciales para los granos son:

$$t = 0 \quad T = T_0 \quad (7)$$

Por su parte, las ecuaciones para la variación de la fase aire surgen de balances macroscópicos. Mientras que la temperatura del aire a la salida, en cada tiempo, se aproxima igual a la temperatura del lecho

$$T_{a2} \approx T \quad (8)$$

Queda por tanto un sistema que resuelve: 1) Un balance microscópico de materia con volumen de grano y difusividad variable en el grano y 2) la integración en el tiempo de la temperatura del lecho se realizó mediante el método numérico de Euler, para la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias:

$$T_{t+\Delta t} = T_t + \left(\frac{dT_m}{dt} \right) \Delta t \quad (9)$$

Los resultados se expresan a través de la desviación absoluta promedio (*DAP*) en orden de expresar los errores en las mismas unidades que la variable ajustada:

$$DAP = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{\text{exp},i} - y_{\text{pred},i}| \quad (10)$$

4. Materiales y métodos.

4.1. Secado-tostado en lecho fluidizado.

Los granos de soja se limpiaron cuidadosamente y se sumergieron en agua utilizando una relación agua: granos de 2:1 y se dejaron en remojo durante 24 h a 10°C. Para facilitar la fluidización de las partículas los granos se secaron superficialmente a 50°C por 10min utilizando una estufa de convección forzada con control automático. El tratamiento de secado-tostado se realizó en un equipo a escala piloto construido para este propósito con control automático de la temperatura de aire a la entrada y de la velocidad del aire (Torrez Irigoyen y Giner, 2014). Se trabajó con una altura de lecho fijo fue de 0,1 m, una temperatura de aire a la entrada de 140°C y una velocidad de fluidización variable entre 3.9 y 1.8 m/s (Torrez Irigoyen y Giner, 2011b). Para determinar la curva de secado experimental se extrajeron muestras a distintos tiempos durante 60 min. La historia térmica del lecho de partículas se determinó con un termómetro infrarrojo Testo 830 T2 que permite medir la temperatura de superficies sin contacto. Las mediciones se realizaron a intervalos de 2 min.

5. Resultados y discusión.

5.1. Validación de modelo de predicción de humedad y temperatura en el lecho fluidizado.

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos para la predicción de la humedad y temperatura en lecho de partículas

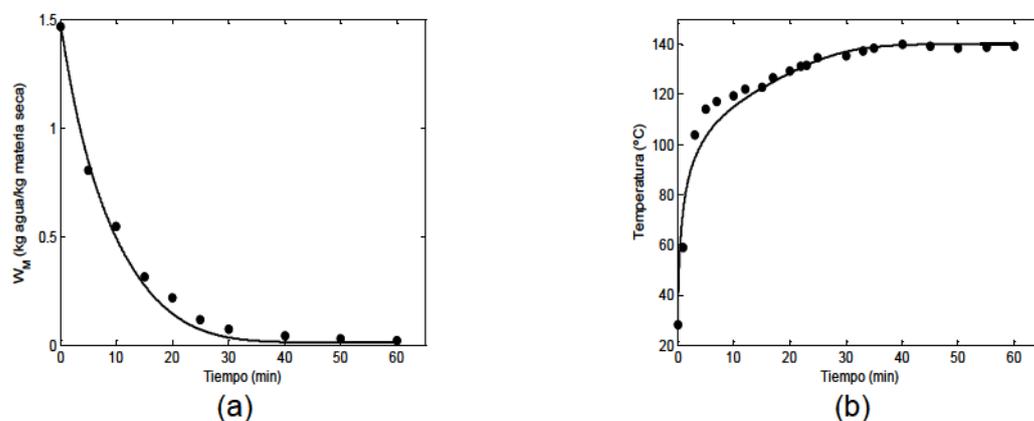


Figura 1. Validación del modelo de secado-tostado a 140°C en lecho fluidizado (línea continua) con datos experimentales (símbolos) de (a) contenido de humedad y (b) temperatura en función del tiempo.

Como se observa los resultados del ajuste fueron bastante satisfactorios. Así también lo demuestran los valores de la DAP para la humedad de 0,035 y 3,1 para la temperatura. El contenido de humedad disminuyó considerablemente dentro de los primeros 20 minutos de proceso. Un comportamiento similar fue reportado por Soponronnarit y col. (2001) quienes estudiaron el secado de soja cruda en lecho fluidizado en rangos de humedad postcosecha con temperaturas de aire de entre 100 y 140°C. Con respecto a la evolución de la humedad absoluta y relativa del aire durante el secado-tostado la Fig.(2) presenta los resultados obtenidos a partir del modelo

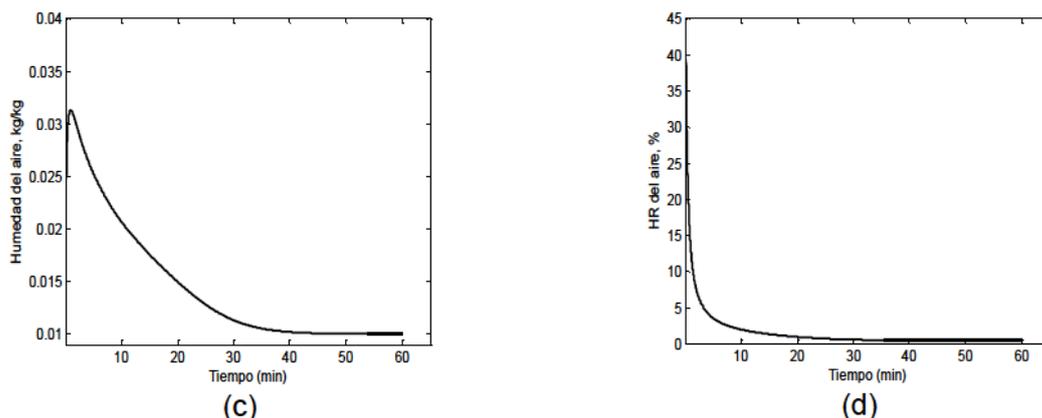


Figura 2. Cálculo de la evolución la humedad absoluta (a) y humedad relativa del aire (b) durante el tratamiento de secado-tostado a 140°C.

La humedad absoluta del aire al ingresar al secador es de 0,01 kg/kg. Su valor a la salida presentó una ganancia considerable al principio del proceso, debido a su paso a través del lecho húmedo de partículas. A medida que el producto se fue deshidratando, la velocidad de secado disminuyó y el aire fue acarreado menos humedad, tendiendo hacia el final del proceso al valor que tenía al ingresar. Un comportamiento similar puede observarse en la Fig.(2b) para el contenido de la humedad relativa en la cual se observa un incremento al inicio del proceso que disminuye gradualmente a medida que transcurre el tiempo de proceso. Estos resultados pueden ser de gran utilidad en caso de que se desee recircular parte del aire de secado.

5.2. Diseño del proceso con recirculación de aire.

A fin de optimizar el consumo de energía en los procesos de secado resulta conveniente llevar a cabo estudios de la eficiencia energética del proceso. Giner y De Michelis (1988) encontraron un alto potencial para la recuperación de energía durante el proceso de fluidización de trigo postcosecha, dado que en su paso por el lecho, el aire sale a elevada temperatura y baja humedad. Por tanto a continuación se llevará a cabo un estudio de la eficiencia térmica del proceso planteado en este trabajo. La eficiencia térmica es el parámetro más conveniente para relacionar el consumo de energía en un secador con el usado para evaporar agua.

$$E_f = \frac{\text{Calor latente para evaporar la humedad del grano}}{\text{Calor añadido al aire de secado}} = \frac{\rho_{S0} (1 - \varepsilon_0) Z_{\max} (W_0 - W_f) L_w}{\rho_a V_m C_{pa} (T_{a1} - T) t_t} \quad (11)$$

Donde V_m la velocidad promedio de fluidización, t_t es el tiempo total de proceso, en s, L_w el calor latente de vaporización promedio y T representa la temperatura del aire resultante de la mezcla del recirculado y el aire fresco. Considerando una temperatura de aire de 140°C con una humedad absoluta de 0,01 kg/kg la eficiencia térmica fue de 9,1%. A efectos de explorar el potencial de recirculación, se plantea un equipo continuo equivalente en el cual se recircula un 90% del aire de secado. La corriente recirculada se mezcla con una corriente de aire fresco ($T_{amb}=20^\circ\text{C}$ y $h_{amb}=0,01$ kg/kg) para dar origen a una corriente de T_{am} y h_{am} la cual debe calentarse a través de un intercambiador de calor e ingresar nuevamente al secadero. En las nuevas condiciones, la elevación de temperatura a T_{a1} no implicaría una demanda considerable de energía.

El cálculo de la eficiencia térmica en el caso de recirculación se llevó adelante por un método iterativo, tal como ocurriría en una puesta en marcha del equipo, hasta tener dos iteraciones con una diferencia en la humedad absoluta de la mezcla menor o igual a 1×10^{-4} . La Tabla 2 presenta los resultados estables obtenidos a distintas condiciones operativas.

| Z_{max} | Con recirculación | | | | | | |
|-----------|-------------------|-------|----------|----------|----------|----------|-------|
| | W_m | T_m | h_{aR} | T_{aR} | h_{am} | T_{am} | E_f |
| 0,10 | 0,011 | 140,0 | 0,024 | 132,9 | 0,021 | 109,4 | 39,2 |
| 0,20 | 0,013 | 139,8 | 0,047 | 122,2 | 0,040 | 102,0 | 56,4 |
| 0,30 | 0,020 | 136,9 | 0,075 | 110,8 | 0,063 | 94,1 | 62,7 |

Tabla 2. Valores obtenidos a partir de la simulación de un proceso continuo con recirculación que considera diferentes alturas de lecho comparados con los tratamientos.

Como puede observarse en todos los casos, la eficiencia térmica incrementa su valor respecto al proceso sin recirculación mencionado previamente. Wiriyaumpaiwong (2002) trabajando en una variante del lecho fluidizado denominado *spouted bed* encontró caudales óptimos de recirculación entre 80 y 90% del caudal del aire de salida, que coinciden con el criterio empleado en este trabajo.

6. Conclusiones.

Se plantearon balances de materia y energía en estado no estacionario para un lecho de granos de soja remojada en un lecho fluidizado con aire. Las predicciones obtenidas se validaron satisfactoriamente con datos experimentales de humedad y temperatura determinados durante el secado-tostado a 140°C de grano entero de soja remojado. La evolución del contenido de humedad absoluta en el aire mostró una ganancia considerable de agua en los minutos iniciales de proceso. Conforme el secado-tostado progresó y la cantidad de agua removida del producto fue menor por unidad de tiempo, los valores de la humedad del aire se redujeron, aproximando los valores de entrada.

Con base en estos resultados, se planteó la simulación de un equipo en continuo con recirculación de un 90% del aire de secado y considerando diferentes alturas de lecho fijo. Los resultados en todos los casos fueron muy satisfactorios encontrándose un incremento considerable de la eficiencia térmica en comparación con un proceso sin recirculación de aire.

Bibliografía

- Giner, S.A., De Michelis A. (1988). Evaluation of the thermal efficiency of wheat drying in fluidized beds: influence of air temperature and heat recovery. *Journal Agriculture Engineering Research*, 41, 11-23.
- Kunii, D. & Levenspiel, O. (1969). *Fluidization Engineering*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Markowski, M., Bialabrzewski, I., Modrzewska, A. (2010). Kinetics of spouted-bed drying of barley diffusivities for sphere and ellipsoid. *Journal of Food Engineering*, 96, 380-387.
- Prachayawarakorn, S., Prachayawasin, P., Soponronnarit, S. (2006). Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 39, 770-778.
- Soponronnarit, S., Swasdiseve, T., Wetchacama, S., Wutiwiwatchai W. (2001). Fluidised bed drying of soybeans. *Journal of Stored Products Research*, 30(2), 133- 151.
- Torrez Irigoyen, R.M. & Giner, S.A. (2011). Volume and density of whole soybean products during hot-air thermal treatment in fluidised bed. *Journal of Food Engineering*, 102, 224-232.
- Torrez Irigoyen, R.M. & Giner, S.A. (2011). Fluidisation velocities during processing of whole soybean snack. *Journal of Food Engineering*, 107, 90-98.
- Torrez Irigoyen, R.M. & Giner, S.A. (2014). Drying-toasting kinetics of presoaked soybean in fluidised bed. Experimental study and mathematical modelling with analytical solutions. *Journal of Food Engineering*, 128, 31-39.
- Torrez Irigoyen, R.M., Goñi, S.M. & Giner, S.A. (2014). Drying-toasting kinetics of presoaked soybean. A mathematical model considering variable diffusivity, shrinkage and coupled heat transfer. *Journal of Food Engineering*, 142, 70-79.