

MODELADO DE UN SECADOR INDUSTRIAL DE ARROZ (*)

J. Martínez Garreiro ⁽¹⁾, R. Canetti ⁽²⁾, A. Fonseca de Oliveira⁽³⁾, M. Hakas ⁽⁴⁾

Universidad de la República - Facultad de Ingeniería

J. Herrera y Reissig 565 -Montevideo – Uruguay CP 11.300

RESUMEN

Con el propósito obtener un producto más uniforme y de mejor calidad, la empresa uruguaya SAMAN que procesa arroz, ha aumentado su grado de automatización en el secado del grano. Con el objetivo de mejorar las características del control que está instalado, se realizarán nuevos algoritmos de control. Para lograr este objetivo, se desarrolló un modelo fenomenológico para el secado de granos, en secadores continuos de lecho móvil y flujo cruzado, basado en fenómenos convectivos y difusivos, que simula el comportamiento dinámico del secador. Partiendo de las ecuaciones diferenciales de balance y transferencia de calor y materia, se construyó un modelo numérico aproximado. Luego el modelo numérico se optimizó con los datos experimentales de la zafra anterior. Se realizó la estimación de errores de medición y finalmente se contrastó los valores simulados con otra serie de datos experimentales. La desviación estándar del modelo está comprendida entre 0.42 y 0.90, en los distintos cuerpos, expresada como porcentaje de humedad en base seca en los distintos cuerpos del secador.

INDUSTRIAL RICE DRYER MODEL

J. Martínez Garreiro ⁽¹⁾, R. Canetti ⁽²⁾, A. Fonseca de Oliveira⁽³⁾, M. Hakas ⁽⁴⁾

Universidad de la República - Facultad de Ingeniería

J. Herrera y Reissig 565 -Montevideo – Uruguay CP 11.300

ABSTRACT

To obtain a more uniform product and better quality, the Uruguayan company SAMAN that tries rice, has increased its degree of automation in the drying process of grains. To improve the characteristics of the control that is installed, new algorithms of control will be realized. To achieve this, a phenomenological model was developed for the drying of grains, in a continuous dryer of mobile bed and crossed flow, based on convective and diffusive phenomena, that simulates the dynamical behavior of the dryer. Departing from the differential equations of mass and heat balance and transference, a numerical approximate model was constructed. Then the numerical model was optimized by the experimental information of the previous sucrop. The estimation of errors of measurement was realized and finally there were confirmed the values simulated with another series of experimental information. The standard diversion of the model is between 0.42 and 0.90, in the different bodies, expressed as percentage of moisture in dry base in the different bodies of the dryer.

INTRODUCCION

El estudio de la operación de secado se ha desarrollado a lo largo muchos de años, (Lwikov, 1966), (Treybal, 1980), (Mujundar, 1995) y sigue siendo tema de intensa investigación. El proceso ofrece particular complejidad debido a la diversidad de mecanismos de transferencia de calor y materia que ocurren simultáneamente durante el proceso y a los factores particulares introducidos por el producto a secar y por el equipo de secado. Esto resulta en la falta de soluciones generales que den una descripción fenomenológica del proceso. En particular el secado de alimentos ha sido objeto de estudio por numerosos investigadores, (Labuza, 1976), (Bruin y Luyben,

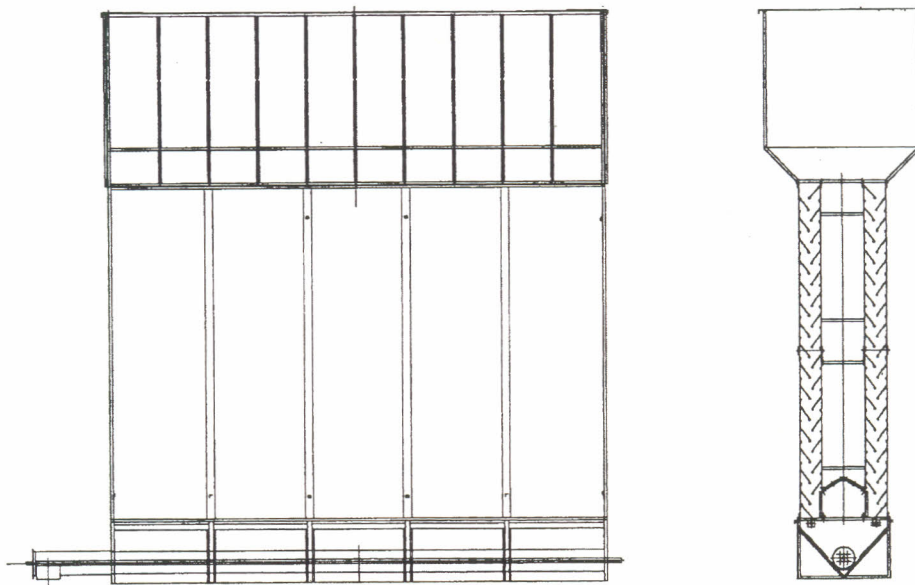
(*) El presente trabajo obtuvo el Primer Premio en el III Encuentro Regional de Ingeniería Química.

1980), (Mishkin, Karel, y Saguy, 1982), con una amplia gama de enfoques, reportándose trabajos sobre cinéticas de secado y su modelado, (Al-Duri y Mc Intyre, 1992), (Alvarez y Legues, 1986), (Martínez y Gerla, 1994), (Martínez, 1998).

Durante la década de los noventa, la producción anual de arroz en Uruguay se incrementó en forma sostenida desde 347.000 toneladas en el año 1990 a 1.209.000 toneladas en el año 2000. Por otra parte a medida que la mecanización de la agricultura se ha difundido, y particularmente la maquinaria empleada en la cosecha de granos a aumentado su productividad, la velocidad de cosecha ha aumentado, imponiendo una fuerte presión sobre las instalaciones de secado.

El arroz se cosecha con una humedad típica de 18 a 22% (bh), y debe ser secado hasta humedades de 12 a 13% (bh), para que no se deteriore durante su almacenamiento. Varias operaciones son requeridas para transformar el arroz "paddy", en arroz blanco.

En la empresa SAMAN el grano cosechado es transportado hasta la planta en camiones que lo vuelcan en un depósito desde donde se alimenta al secador. El secador utilizado es continuo de lecho móvil y flujo cruzado. Consta de 5 cuerpos, que el grano a ser secado recorrerá sucesivamente, y al final de último cuerpo es llevado a un depósito de grano seco. Cada cuerpo consta de dos partes: la tolva y el pantalón.



VISTA LATERAL

VISTA FRONTAL

La tolva, que conforma la parte superior del cuerpo, tiene como objetivo principal darle tiempo al grano para que su perfil de humedades interno se homogeneice, reduciendo así las fracturas.

El pantalón es la parte del cuerpo donde el grano se seca por intercambio de agua y calor con un caudal de aire caliente. El pantalón consta de dos patas, que dejan un espacio entre ellas, por donde se inyecta el aire. El grano fluye en sentido vertical, resbalando por las bandejas que conforman las patas, en tanto que el aire lo hace en forma horizontal (principalmente) desde el interior al exterior del pantalón, cruzado por las patas.

Desarrollo de modelos

Diferentes teorías tratan de explicar como se transfiere calor y masa durante la operación de secado de granos. El punto en investigación se centra en los mecanismos por los cuales el agua se transfiere desde el centro hasta la superficie del grano, para luego evaporarse, y cuál o cuáles de estos mecanismos son los preponderantes en las distintas etapas del proceso.

Del estudio de la información bibliográfica reciente, surge que para el secado de algunos granos en secadores continuos de lecho móvil y flujo cruzado, los modelos matemáticos basados en fenómenos puramente convectivos y los desarrollados en base a fenómenos puramente difusivos, describen ambos el comportamiento del sistema en estudio.

Basados en esto último, se desarrolla en primera instancia un modelo en derivadas parciales, puramente convectivo, con las siguientes suposiciones:

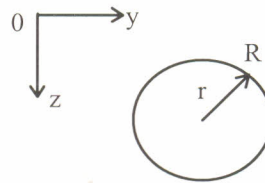
1. Fases ideales
2. Los perfiles de velocidad para ambas fases es unidimensional (flujo pistón en ambas fases)
3. Secador adiabático
4. No hay contracción del sólido
5. El agua está en estado líquido dentro del sólido y se evapora en la interfase

Para el grano desplazándose según el eje z , tenemos

i) Balance de agua

$$G_s \cdot \frac{\partial \bar{X}}{\partial z} = -f \quad [f] = \frac{kg_{agua}}{s.m^3} \quad (1)$$

condición de borde: $\bar{X}(y,0) = \bar{X}^0$



ii) Balance de energía y ecuación de transferencia de calor

$$G_s \cdot (c_p^{SS} + c_p^L \cdot \bar{X}) \cdot \frac{\partial \bar{T}_s}{\partial z} = h.a.(\bar{T}_g - \bar{T}_s) - \lambda.f \quad (2)$$

condición de borde: $\bar{T}_s(y,0) = \bar{T}_s^0$

Para el aire desplazándose según el eje y , tenemos

i) Balance de agua

$$G_g \cdot \frac{\partial \bar{H}}{\partial y} = f \quad (3)$$

condición de borde: $\bar{H}(0, z) = \bar{H}^0$

ii) Balance de energía y ecuación de transferencia de calor

$$G_g \cdot (c_p^{AS} + c_p^V \cdot \bar{H}) \cdot \frac{\partial \bar{T}_g}{\partial y} = -h.a.(\bar{T}_g - \bar{T}_s) - f.c_p^V \cdot (\bar{T}_g - \bar{T}_s) \quad (4)$$

condición de borde: $\bar{T}_g(0, z) = \bar{T}_g^0$

La transferencia del agua, se considera comandada por la resistencia en película gaseosa

$$f = k_g \cdot a \cdot (H_{Sat} - \bar{H}) \quad (5)$$

Teniendo en cuenta los aspectos constructivos así como las condiciones operativas, se generó el modelo integrado, aproximando numéricamente estas ecuaciones. Éste se ajustó a los datos de campo aportados por SAMAN, a los efectos de encontrar los parámetros óptimos del modelo.

A los efectos de calcular las condiciones del aire que ingresa al pleno del secador, se plantearon los balances de conservación de materia y energía en el horno donde se calienta el aire quemando leña, partiendo de las condiciones de aire ambiente.

Realizadas las primeras calibraciones del modelo, se encontró que para el caso del arroz en el tipo de secador en estudio, el modelo puramente convectivo no representa adecuadamente el comportamiento durante el secado. A lo largo de los distintos cuerpos del secador, hay evidencia de la aparición de fenómenos difusivos, que controlan en distinto grado la transferencia de agua. Por este motivo se estudió un modelo puramente difusivo, con las siguientes suposiciones adicionales:

1. Grano esférico de igual volumen al real
2. Controlan los mecanismos de conducción (de calor) y difusión (de humedad)

Para el grano desplazándose según el eje z, tenemos:

i) Balance de agua

$$r^2 \cdot \frac{\partial \rho_{SL}}{\partial t}(r,t) = \frac{\partial}{\partial r} \left[D_{ef} \cdot r^2 \cdot \frac{\partial \rho_{SL}}{\partial r}(r,t) \right] \tag{6}$$

condición inicial : $\rho_{SL}(r,0) = \rho_{sl}^0(r)$

condición de borde : $\left. \frac{\partial \rho_{SL}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$

$$\left. \frac{\partial \rho_{SL}}{\partial r} \right|_{r=R} = -\frac{k_g}{D_{ef}} \cdot [\rho_{gV^{eq}}(y) - \rho_{gV}(y)]$$

ii) Balance de energía

$$r^2 \cdot \rho_s(r,t) \cdot c_p^s \cdot \frac{\partial T_S}{\partial t}(r,t) = \frac{\partial}{\partial r} \left[K_S \cdot r^2 \cdot \frac{\partial T_S}{\partial r}(r,t) \right] + D_{ef} \cdot c_p^L \cdot r^2 \cdot \frac{\partial \rho_{SL}}{\partial r}(r,t) \cdot \frac{\partial T_S}{\partial r}(r,t) \tag{7}$$

condición inicial: $T_S(r,0) = T_S^0(r)$

condición de borde : $\left. \frac{\partial T_S}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$

$$-K_S \cdot \left. \frac{\partial T_S}{\partial r} \right|_{r=R} = h \cdot [T_S(R,t) - T_g(y)] + k_g \cdot [\rho_{gV^{eq}}(y) - \rho_{gV}(y)] \cdot [\lambda + c_p^V \cdot (T_g(y) - T_S(R,t))]$$



Para el aire desplazándose según el eje y, tenemos

i) Balance de agua

$$\varepsilon \cdot \frac{\partial}{\partial y} [v_g \cdot \rho_{gV}(y)] = k_g \cdot a \cdot [\rho_{gV^{eq}}(y) - \rho_{gV}(y)] \quad (8)$$

condición inicial : $\rho_{gV}(0) = \rho_{gV}^0$

ii) Balance de energía

$$\varepsilon \cdot v_g \cdot \rho_g(y) \cdot c_p^g \cdot \frac{\partial T_g}{\partial y}(y) = -h \cdot a \cdot (T_g(y) - T_s(R,t)) \quad (9)$$

condición inicial : $T_g(0) = T_g^0$

Dado que a lo largo del secador, se presentan tanto los fenómenos convectivos como difusivos, basados en el modelo puramente convectivo, y considerando el modelo puramente difusivo, se construyó el modelo híbrido final, desarrollando una relación funcional que tiene en cuenta los perfiles de humedad intragrano, a los efectos de conocer la humedad del grano en la interfase e interrelacionarla con las isotermas de absorción para el arroz, a los efectos de encontrar los parámetros óptimos del modelo.

Métodos

La empresa SAMAN cuenta con un sistema de monitoreo –SCADA FIX– que sensa continuamente una gran cantidad de variables del proceso, y las registra en forma automática.

En primera instancia, como el objetivo era modelar el secador en funcionamiento normal, era necesario tener series largas de datos en esas condiciones.

Se inspeccionó minuciosamente el conjunto de los datos para seleccionar los periodos de funcionamiento continuo que serían usados para la determinación del modelo. Se generaron los archivos de los tramos seleccionados para la implantación industrial que tiene la empresa SAMAN en la localidad de Lascano, en la que se procesó arroz de la variedad Tacuarí. Se seleccionaron dos series de datos, una de 30:52 horas y otra de 64:15 horas. Para la identificación del modelo son imprescindibles medidas de las humedades del grano en distintas etapas del proceso de secado. Las medidas de humedad se realizan en forma manual, cada unos 30 minutos, y se registran en planilla.

En los datos procesados, se contó con la temperatura del aire en cada uno de los cinco cuerpos, la temperatura y humedad relativa ambiente, así como un registro del cual se puede calcular el flujo de arroz que circula por el equipo.

Con estos datos experimentales, se optimizaron los parámetros del modelo, que mejor ajustan los perfiles de humedades en los cuerpos dos, cuatro y cinco. Con este modelo ajustado, se generó el programa para la simulación de datos. Este programa simula el proceso en el secador suponiendo conocidas algunas variables relevantes que le son impuestas. Estas son: la humedad de ingreso del grano, las principales variables ambientales (temperatura ambiente y humedad ambiente), y las acciones de control ejercidas sobre el secador (velocidad de avance del grano, temperatura de cada cuerpo).

Estimación de errores de medición

Un aspecto importantísimo en la precisión de la simulación, y en la interpretación de sus resultados, es la certidumbre de los datos medidos. De éstos, la precisión de la medida de humedad de grano es especialmente relevante.

Básicamente, el error se compone de dos aspectos: la incertidumbre de la medida en sí, y la que resulta de la incertidumbre del instante en que fue tomada la muestra. A su vez, ambos están compuestos de varias fuentes de incertidumbre.

Una hipótesis razonable es suponer que ambos errores son independientes entre sí, y que no tienen sesgo (error sistemático).

Para estimar dicho error se realizaron 32 experimentos consistentes en la toma simultánea de 3 o 5 muestras, y se midió su humedad. El total de muestras fue de 54, resultando una desviación estándar de 0.396, expresada como porcentaje de humedad en base húmeda

Resultados y conclusiones

Con los datos resultantes de la utilización de la primera serie con el programa de simulación se ha realizado la construcción de la función de costo para el algoritmo de optimización. Los datos resultantes de la utilización de la segunda serie fueron utilizados a modo de comparación entre los distintos ajustes obtenidos. Por tratarse de una serie de datos sobre la cuál no se ha realizado ningún tipo de ajuste, se adaptó como criterio de elección el juego de parámetros del modelo que mejor ajuste ambas series simultáneamente, evitando así un ajuste excesivo con relación a los datos de la primera serie.

Series de datos: Serie 1 (utilizada en la optimización)

Resultados	H2	H4	H5
Valor promedio de los datos provenientes del archivo de la historia (valores normalizados en porcentaje)	100 %	100 %	100%
Valor promedio de los datos resultantes de la simulación (valores normalizados en porcentaje)	98,2 %	99,3 %	101,6 %
Desviación estándar calculada (expresada en porcentaje de humedad en base húmeda)	0,90	0,42	0,47
Cantidad de puntos que se apartan más de 2 desviaciones estándar	5	4	4
Cantidad total de puntos de comparación	107	100	95

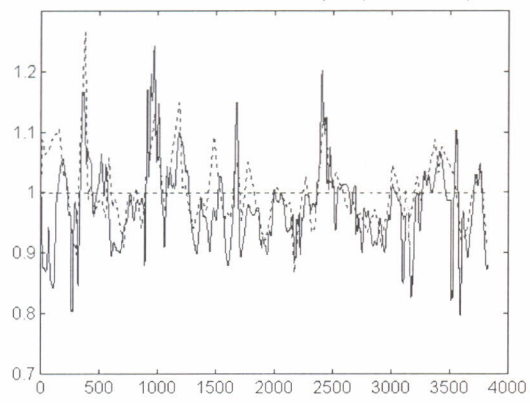
Series de datos: Serie 2 (utilizada en la verificación de los resultados finales)

Resultados	H2	H4	H5
Valor promedio de los datos provenientes del archivo de la historia (valores normalizados en porcentaje)	100%	100%	100%
Valor promedio de los datos resultantes de la simulación (valores normalizados en porcentaje)	103,2%	101,5%	100,7 %
Desviación estándar calculada (expresada en porcentaje de humedad en base húmeda)	1,24	0,74	0,57
Cantidad de puntos que se apartan más de 2 desviaciones estándar	6	3	3
Cantidad total de puntos de comparación	53	43	40

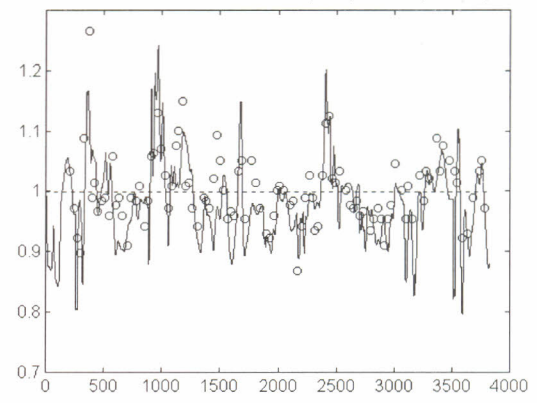


Gráficas Serie 1

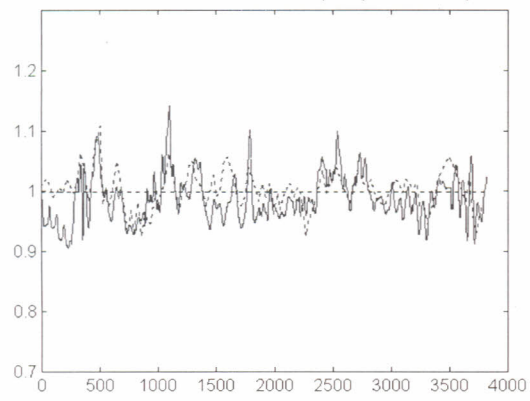
Humedades en la salida del cuerpo 2 (normalizadas)



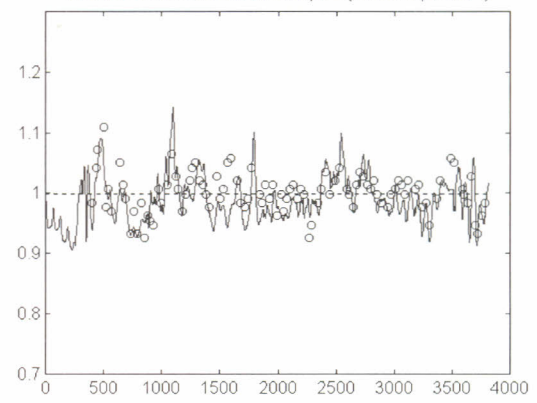
Humedades en la salida del cuerpo 2 (datos disponibles)



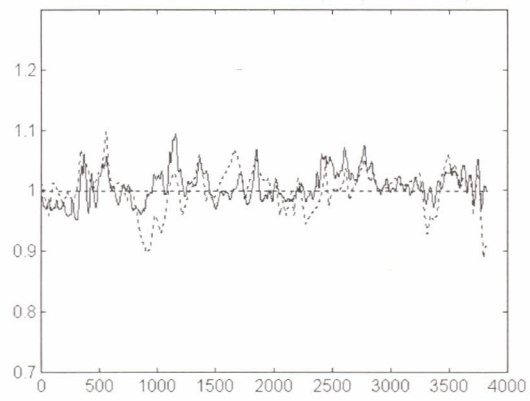
Humedades en la salida del cuerpo 4 (normalizadas)



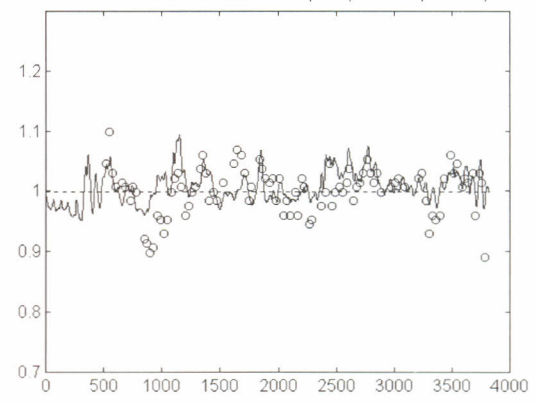
Humedades en la salida del cuerpo 4 (datos disponibles)



Humedades en la salida del cuerpo 5 (normalizadas)

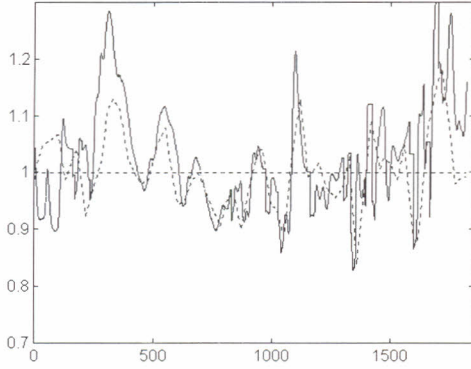


Humedades en la salida del cuerpo 5 (datos disponibles)

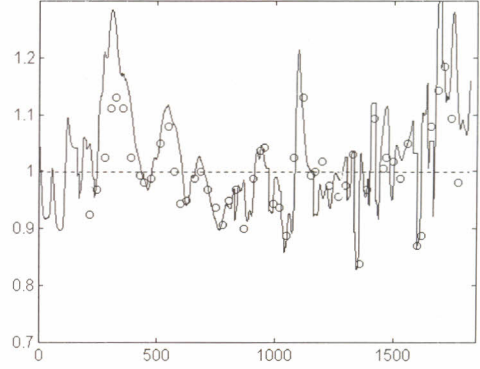


Gráficas Serie 2

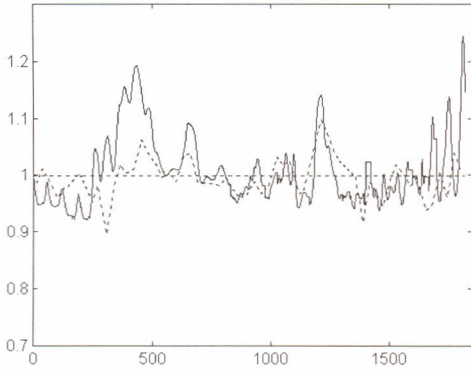
Humedades en la salida del cuerpo 2 (normalizadas)



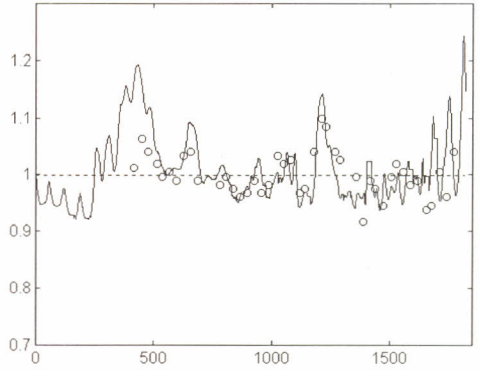
Humedades en la salida del cuerpo 2 (datos disponibles)



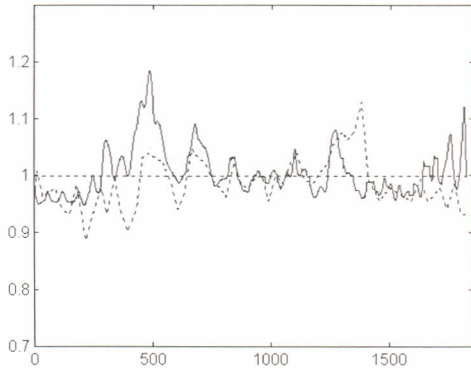
Humedades en la salida del cuerpo 4 (normalizadas)



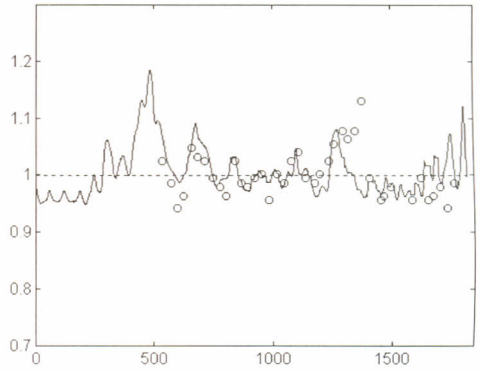
Humedades en la salida del cuerpo 4 (datos disponibles)



Humedades en la salida del cuerpo 5 (normalizadas)



Humedades en la salida del cuerpo 5 (datos disponibles)



La desviación estándar del modelo, particularmente para la humedad de salida (0.57), es de similar orden que el error estimado de medida (0.396).

Nomenclatura

a :	<u>área de transferencia</u> volumen del lecho	[m ² /m ³]
λ :	calor latente de vaporización del agua	[J/Kg]
h :	coeficiente pelicular de transferencia de calor	[J/m ² .s.K]
Kg^{AS} :	Kg de aire seco	
G_g :	flujo de masa de aire seco	[Kg ^{AS} /s.m ²]
Kg^{SS} :	Kg de grano seco	
G_s :	flujo de masa de grano seco	[Kg ^{SS} /s.m ²]
c^{SS} :	calor específico a presión cte, del grano seco	[J/Kg ^{SS} .C]
c^L :	calor específico a presión cte, del agua	[J/Kg.C]
c^{AS} :	calor específico a presión cte, del aire seco	[J/ Kg ^{AS} .C]
c^V :	calor específico a presión cte, del vapor	[J/Kg.C]
k_g :	coeficiente pelicular de transferencia de masa (fase gas)	[Kg/m ² .s.ΔH]
H :	humedad absoluta del aire (base seca)	[Kg ^{AGUA} /Kg ^{AS}]
X :	humedad del grano (base seca)	[Kg ^{AGUA} /Kg ^{SS}]
T_s :	temperatura del grano	[C]
T_g :	temperatura del aire	[C]
r :	posición dentro del grano	[m]
r_s :	concentración en el grano	[Kg/m ³]
r_g :	concentración en el gas	[Kg/m ³]
	(ρ _{SL} y ρ _{SS} son concentración de agua y de sólido en el grano, respectivamente)	
D_{ef} :	difusividad efectiva	[m ² /s]
K_s :	conductividad térmica del sólido	[J/s.m.K]
e :	porosidad (volumen de aire) volumen total	
v_g :	velocidad del aire	[m/s]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Lwиков, A.V. (1966) "Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies." Pergamon Oxford.
- [2] Treybal, R.E., (1980). Mass Transfer Operation. Mc Graw-Hill Book Co., N.Y..
- [3] Mujumdar, Arun S., (1995). Handbook of Industrial Drying. 2nd Ed. Marcel Dekker Inc. N.Y.
- [4] Labuza, T. P. (1976). Drying food: Technology improves on the sun. Food Technol. 30(6), 37
- [5] Bruin, S. and Luyben, A.M., 1980. Drying of Food Materials: A Review of Recent Developements. Advances in Drying. Volumen 1. Ed. by A.S. Mujumdar. Hemisphere Publishing Co..
- [6] Mishkin, M., Karel, M. and Saguy, I. (1982). Application of optimization in food dehydration. Food Technol. 36(7), 101.
- [7] Al-Duri, B. and Mc Intyre, S., (1992). Comparison of drying kinetics foods using an assisted convection oven and a combined microwave-convection oven. J. of Food Eng., 15, 139-155.
- [8] Alvarez, P. and Legues, P., (1986). A semi theoretical model for the drying of Thomson Seedless grapes. Drying Technology, 4 (1), 1-17 .
- [9] Jorge Martínez Garreiro y P. Gerla, (1996). Modelado de la cinética de secado por microondas. IX Seminario Latinoamericano y del Caribe de Ciencia y Tecnología de Alimentos y V Conferencia Internacional sobre Ciencia y Tecnología de los Alimentos, CICTA-5. Editorial PSM, Ciencias y tecnologías.

La Habana, Cuba.

- [10] J. Martínez Garreiro (1998). Secado por microondas: un modelo sencillo. Memorias del "II Congreso Iberoamericano de Ingeniería de Alimentos". Bahía Blanca. Argentina. Trabajo VI-12.

AUTORES:

(1) Prof. Adjunto del Dpto. de Operaciones Unitarias en Ing. Química e Ing. de Alimentos. Especialista en transferencia de calor y materia, particularmente en la operación de secado.

Instituto de Ingeniería Química, Fac. de Ingeniería, UDELAR garreiro@fing.edu.uy

(2) Prof. Titular del Dpto. de Control y Electrónica Industrial. Especialista en modelado matemático y control industrial.

Instituto de Ingeniería Eléctrica, Fac. de Ingeniería, UDELAR canetti@iie.edu.uy

(3) Prof. Adjunto del Dpto. de Control y Electrónica Industrial.

Instituto de Ingeniería Eléctrica, Fac. de Ingeniería, UDELAR andre@iie.edu.uy

(4) Asistente del Dpto. de Control y Electrónica Industrial

Instituto de Ingeniería Eléctrica, Fac. de Ingeniería, UDELAR mich@iie.edu.uy