

Modelo matemático para secador de alimentos de flujo radial*

Néstor Durango**, Antonio Bula***, Rafael Quintero****,
Luis Donado****,
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad del Norte

Resumen

Los resultados obtenidos en esta investigación ajustan el modelo matemático en un secador de alimentos de flujo radial. La metodología siguió el diseño de un experimento factorial, el cual, mediante análisis estadístico, posibilitó la obtención del modelo matemático que describe el comportamiento del proceso para un tiempo de secado de tres horas. Las variables estudiadas fueron: relación superficie / volumen, masa de yuca, temperatura del aire de recirculación y velocidad de flujo de aire. El análisis estableció que las variables de mayor influencia en el proceso son la relación superficie/volumen, seguida por la masa de material que se iba a secar. También se encontró que independientemente de la cantidad de masa de yuca, la mayor cantidad de humedad retirada se obtiene cuando las otras tres variables se encuentran en su nivel alto.

Palabras clave: Diseño de experimentos, secador, medio poroso, yuca, secado de alimentos.

Abstract

The results obtained from a research carried out to adjust a mathematic model in a radial flow food dryer are presented. The methodology followed a factorial experimental design. By mean of a statistical analysis, a mathematic model was obtained that describes the behavior of the process in a three hours time frame. The study considered the following variables: surface area / volume ratio, mass of yuca to be dried, recirculated air temperature, and air flow velocity. The analysis showed that the main factors affecting the process are surface area / volume ratio and the mass to be dried. It was also found that no matter the mass, the maximum amount of humidity retired from the yuca, is always attained at the high values of the different variables.

Key words: Design of experiments, dryer, porous media, yuca, food drying.

Fecha de recepción: 4 de agosto de 2003
Fecha de aceptación: 13 de mayo de 2004

* Este trabajo forma parte del proyecto «Diseño y construcción de un secador de yuca», adscrito a la línea de investigación Secado de Alimentos del grupo Termodinámica y Gas Natural, y del proyecto «Secado de Alimentos», adscrito a la línea de investigación Bioprocesos del grupo UREMA de la Universidad del Norte.

** Ingeniero Mecánico, MSc en Generación de Energía, profesor Universidad del Norte, ndurango@uninorte.edu.co

*** Ingeniero Mecánico, MSc, Ph.D en Ingeniería Mecánica, profesor Universidad del Norte, abula@uninorte.edu.co

**** Ingeniero Mecánico.

1. INTRODUCCIÓN

La Universidad del Norte, por medio de los grupos de investigación Termodinámica y Gas Natural y UREMA, desde el año 2000 viene desarrollando proyectos encaminados a implementar mejoras e innovaciones en la utilización y métodos de procesamiento de varios productos. En función de esto se han desarrollado varios de proyectos, de los cuales podemos citar el de Durango *et al.* (2003-a), que consiste en el diseño y construcción de un horno secador de yuca de flujo radial; Durango *et al.* (2003-b), en el cual se planteó un modelo matemático para el secado de yuca en un secador de flujo radial, teniendo en cuenta la relación superficie / volumen, masa de yuca, temperatura del aire de recirculación y velocidad de flujo de aire calculada a partir de las revoluciones del ventilador. Los resultados obtenidos muestran la necesidad de ajustar el modelo matemático, debido a que se utilizaron las RPM del motor para representar el flujo de aire que recircula; posteriormente, al analizar los resultados se observó que esta variable no se manifestaba de igual forma que las otras. Esto hizo necesario el replanteo de la variable y la realización de nuevas pruebas, para así ajustar el modelo matemático del secador de alimentos de flujo radial.

2. PROCEDIMIENTO

Primero se realizó una recopilación de información acerca del secado de sólidos, los diferentes tipos de secadores existentes para tal propósito, características de la yuca y procesos de secado utilizados, para lo que se utilizó fuentes bibliográficas e Internet. En adición, se revisaron los trabajos concernientes al secador de flujo radial desarrollado por la Universidad del Norte. Esto brindó claridad acerca del tema y marcó el punto de partida de la investigación. Con base en las recomendaciones y resultados obtenidos en las investigaciones mencionadas, se cambió la velocidad del motor por la velocidad del aire que fluye como variable representativa del flujo. Posteriormente se procedió a evaluar de forma estadística la incidencia de este cambio en el proceso y se diseñaron las pruebas necesarias para corroborar el comportamiento que muestran los datos estadísticos del modelo ajustado; estas pruebas se realizaron teniendo en cuenta los niveles de funcionamiento establecidos como los más adecuados para la operación del secador según los resultados del anterior trabajo de investigación, y se establecieron los niveles de funcionamiento del secador para la nueva variable. Se revisó el estado del equipo para ver en qué condiciones se encontraba y se realizó una prueba para comprobar que funcionaba correctamente.

Se procedió a realizar pruebas experimentales que permitieron obtener resultados que manifestaran el comportamiento de cada uno de los parámetros que intervienen en el secado artificial de yuca bajo diferentes condiciones de carga, temperatura del aire, tamaño de los pedazos de yuca que se van a secar y flujo de aire que recircula; en cuanto a este último, se construyó un dispositivo de regulación de voltaje con el cual se pudiera regular la velocidad del motor y con esto controlar la velocidad del aire que circula.

Tabla 1
Niveles escogidos para cada variable del proceso

Nivel	Cantidad de yuca (gr)	Relación Superficie a volumen	Velocidad del flujo de aire que recircula (m/s)	Temperatura del aire que recircula (°C)
	A	B	C	D
Alto	2000	(0.4731 – 0.4743)mm ⁻¹ (Espesor: _ cm)	3	80
Bajo	1000	(0.1734 – 0.1743)mm ⁻¹ (Espesor: 2 cm)	1.5	60

Para variar el tamaño de la yuca se tuvo en cuenta la relación superficie a volumen de cada pedazo, y para tal efecto se cortaron discos de dos espesores diferentes (2 centímetros y $\frac{1}{2}$ centímetro). Debido a que la yuca no tiene un diámetro uniforme en toda su longitud y además el diámetro también varía de yuca a yuca, se tuvo cuidado en utilizar tubérculos que fueran lo más rectos y uniformes posibles en toda su longitud y que el diámetro de cada uno de ellos tendiera a un valor predeterminado. La velocidad del flujo de aire que recircula se controló variando el voltaje del motor para obtener las velocidades de 1.5 y 3 m/s. Para variar la temperatura del aire que recircula, simplemente se establecieron dos puntos de control (80 y 60°C) en el controlador de temperatura.

En cada prueba se realizaron mediciones de voltaje y corriente en el motor, porcentaje de humedad retirada, flujo de aire y consumo de potencia en la resistencia, que como se mantenía prácticamente constante para cada prueba de acuerdo con los datos obtenidos por el anterior grupo, esta medición se efectuó sólo en una ocasión para verificar estos datos.

Luego de los experimentos se procedió al análisis estadístico de rigor, que permitió establecer el efecto de cada una de las variables del proceso, así como la interacción entre ellas.

3. RESULTADOS

Una vez realizados los experimentos se hicieron los cálculos estadísticos, cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2
Resultados de análisis de varianza

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada (Fo)	F _{a,v1,v2}
A	345,7135125	1	345,7135125	45,43007654	4.49
B	1211,550313	1	1211,550313	159,2093495	4.49
AB	32	1	32	4,205107399	4.49
C	151,90245	1	151,90245	19,96144114	4.49
AC	20,7690125	1	20,7690125	2,729247754	4.49
BC	18,8805125	1	18,8805125	2,481080713	4.49
ABC	0,70805	1	0,70805	0,093044572	4.49
D	254,70245	1	254,70245	33,47034865	4.49
AD	4,5150125	1	4,5150125	0,593316015	4.49
BD	13,7026125	1	13,7026125	1,800654913	4.49
ABD	0,3042	1	0,3042	0,039974802	4.49
CD	1,26405	1	1,26405	0,166108313	4.49
ACD	0,1326125	1	0,1326125	0,017426556	4.49
BCD	2,6565125	1	2,6565125	0,349091262	4.49
ABCD	5,1842	1	5,1842	0,68125368	4.49
ERROR	121,7567	16	7,60979375		4.49
TOTAL	2185,7422	31			

Con un nivel de significancia α de 0.05 y con las tablas de distribución F, $F_{0.05, 1, 16} = 4.49$, donde 1 son los grados de libertad de la fuente de variación y 16 son los grados de libertad del error. De lo anterior se puede concluir, con un 95% de confianza, que los factores B (relación superficie a volumen), A (cantidad de yuca), D (temperatura de control del aire de recirculación) y C (velocidad de flujo de aire) en su orden presentan la mayor influencia en el proceso de secado. También se hace evidente que no existe ninguna interacción significativa entre las variables del proceso.

4. MODELO MATEMÁTICO OBTENIDO

A fin de describir el proceso de secado en el dispositivo en términos de las variables más importantes, se hizo uso del análisis de regresión lineal múltiple¹, y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\%H = 8.0826 - 0.006603 (C) + 41.2561 (A/V) + 2.8028 (V) + 0.2792 (T) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

C : Cantidad de yuca (gramos)

A/V : Relación superficie a volumen (mm^{-1})

V : Velocidad del ventilador (rpm)

T : Temperatura de control del aire de recirculación ($^{\circ}\text{C}$)

Es importante aclarar que este modelo de regresión presenta la limitante de que sólo es válido para valores de las variables independientes (cantidad de yuca, relación superficie a volumen, velocidad del ventilador y temperatura de control del aire de recirculación) que estén dentro del intervalo de valores utilizados en las pruebas y para un tiempo de secado de tres horas, con un coeficiente de correlación $R^2 = 88.6\%$. La relación lineal supuesta puede ser válida dentro de dicho intervalo, pero tal vez no lo sea al momento de una extrapolación.

5. ILUSTRACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL PROCESO

En las figuras 1 y 2 se muestran gráficas del modelo matemático obtenido, de manera que se pueden establecer diferencias para diferentes condiciones de secado.

La importancia de estas gráficas radica en que se pueden establecer diferencias claras para determinadas combinaciones de variables al cambiar los niveles de éstas. Así, por ejemplo, es evidente que al variar la relación superficie a volumen se obtienen mayores cambios en el porcentaje de humedad retirada que variando la velocidad de flujo de aire o la temperatura.

¹ MONTGOMERY, Douglas, *Design and Analysis of Experiments*. United States of America, 2001, p. 392-422. WALPOLE, Ronald y MYERS, Raymond, *Probabilidad y Estadística*. México, McGraw-Hill, 1992, p. 419-442.

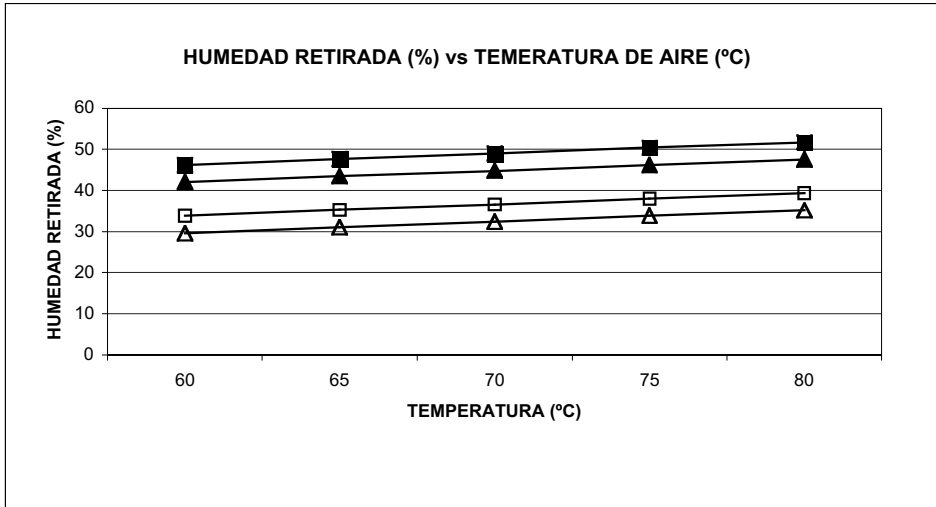


Figura 1. Relación entre humedad retirada y temperatura de control del aire de recirculación para un kilogramo de yuca, dos niveles de velocidad y de relación superficie a volumen

Al comparar la figura 1 con la 2, las cuales están hechas para dos cantidades de yuca diferentes (uno y dos kilogramos respectivamente), se puede apreciar que cuando la carga es baja el porcentaje de humedad retirado es mayor para iguales condiciones de relación superficie a volumen, velocidad de flujo de aire y temperatura del aire de recirculación.

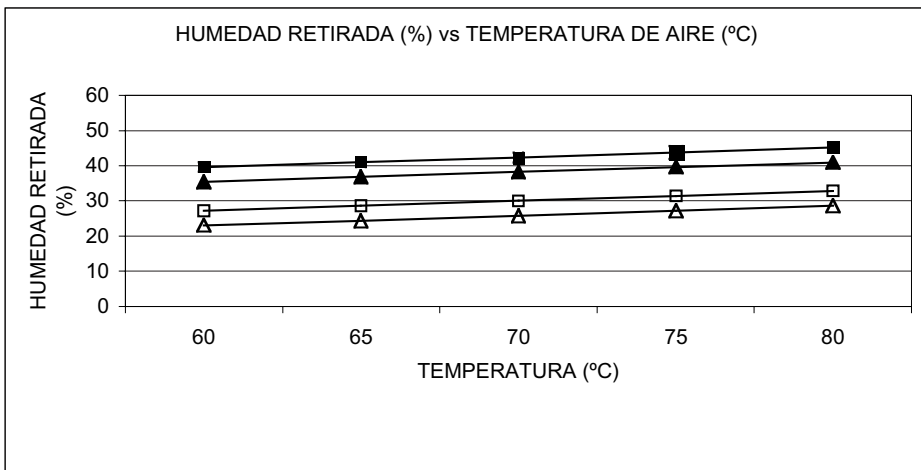


Figura 2. Relación entre humedad retirada y temperatura de control del aire de recirculación para dos kilogramos de yuca, dos niveles de velocidad y de relación superficie a volumen

CONCLUSIONES

- La variable que tiene mayor influencia en el proceso de secado es la relación superficie a volumen, seguida de la cantidad de yuca, la temperatura del aire que recircula y la velocidad de flujo de aire.
- Para iguales condiciones de secado, el porcentaje de humedad retirada aumenta al
 - aumentar la relación superficie a volumen (pedazos de menor espesor)
 - disminuir la cantidad de yuca en el secador
 - aumentar la temperatura de control del aire de recirculación
 - aumentar la velocidad de flujo del aire que recircula.
- Dado que el objetivo principal de este proyecto de investigación y desarrollo era ajustar el modelo matemático que representa el proceso de secado de alimentos, se puede concluir que la variable rpm del motor no tenía relación directa con el proceso o la variable a la cual ésta quería representar (velocidad de flujo de aire que recircula). Por lo tanto, al controlar directamente el flujo de aire permitió obtener mejores resultados y eliminar la interacción existente en el modelo matemático anterior.
- Para iguales condiciones de carga, al aumentar la velocidad de flujo de aire aumenta el caudal.
- La combinación de variables que produjo el mayor porcentaje de humedad retirada para carga baja fue aquella donde las otras tres variables se encontraban en su nivel alto, siendo ésta la que mayor porcentaje de humedad retiró de todas las combinaciones con un valor de 53.15%.
- La combinación de variables que produjo el mayor porcentaje de humedad retirada para carga alta fue aquella en la que todas las variables se encontraban en su nivel alto, con un porcentaje de humedad retirada de 47.77%.
- El modelo de regresión para el proceso de secado es válido para procesos de secado de tres horas de duración y para valores de las variables que estén dentro de los intervalos con los cuales se realizaron las pruebas.
- Con este trabajo de investigación se recopiló información experimental que será útil para trabajos posteriores encaminados al desarrollo del diseño de un prototipo a escala industrial.

Referencias

- BAIRD D. C., *Experimentación, una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. México, 1991.
- COCK, James, *La YUCA, nuevo potencial para un cultivo tradicional*. Cali, Colombia, 1989.
- DURANGO, N., BULA, A., QUINTERO, H. & FERRANS, O., Construcción de un modelo de secador de yuca, en medio poroso, usando flujo radial de aire caliente. *Revista Ingeniería y Desarrollo*, 2003-a. En evaluación.
- DURANGO, N., BULA, A., MORENO, Y. & PÉREZ, H., Análisis y caracterización de las variables que inciden en el proceso de secado artificial de yuca, en un modelo de secador de flujo radial. *Revista Ingeniería & Desarrollo*, 2003-b. En evaluación.
- MCCABE, Warren & SMITH, Julián, *Operaciones Básicas en Ingeniería Química*, Vol II. Barcelona, 1975.
- MONTGOMERY, Douglas, *Design and Analysis of Experiments*. United States of America, 2001.
- WALPOLE, Ronald & MYERS, Raymond, *Probabilidad y Estadística*. México, McGraw-Hill, 1992.