

Análisis y caracterización de las variables que inciden en el proceso de secado artificial de yuca en un modelo de secador de flujo radial*

Néstor Durango**, Antonio Bula***, Yasser Moreno**** y Hugo Pérez*****

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, Barranquilla (Colombia)

Resumen

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en la investigación realizada para establecer la influencia e importancia de las variables cantidad de yuca, relación superficie a volumen del material de los pedazos de yuca, velocidad del ventilador y temperatura del aire de recirculación, en el proceso de secado de yuca en un modelo de secador de flujo radial. La metodología experimental utilizada fue el diseño de experimentos factoriales, la cual, mediante una serie de análisis estadísticos, permitió la caracterización del proceso para un tiempo de secado de tres horas y la obtención de un modelo matemático que describe su comportamiento.

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

Abstract

This article presents the results obtained in the research carried out to establish the influence and importance of the variables: amount of yucca to be dried, the surface area / volume ratio of the yucca pieces, fan speed, and re circulated air temperature, in a yucca drying process performed in a radial flow dryer model. The experimental methodology used was the factorial design, which by mean of a statistical analysis, allowed the characterization of the process in a three hour time frame, and helped to gather enough information to develop a mathematical model that describes the process behavior.

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

Fecha de recepción: 4 de agosto de 2003
Fecha de aceptación: 25 de julio de 2005

* Este trabajo forma parte del proyecto "Diseño y Construcción de un secador de yuca", adscrito a la línea de investigación Secado de Alimento 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, Universidad del Norte.

Dirección: Universidad del Norte, Km 5 vía a Puerto Colombia, Barranquilla (Colombia).

**INGENIERÍA
& DESARROLLO**

Número 18
Julio-Diciembre, 2005
ISSN: 0122-3461

1. INTRODUCCIÓN

Colombia se ha caracterizado por producir una gran cantidad de productos agrícolas; sin embargo, esta actividad se ha ejercido en forma poco tecnificada, lo que genera, en ocasiones, bajos niveles de competitividad y productividad frente a mercados internacionales. Por tal razón, la Universidad del Norte, por medio de los grupos de investigación Termodinámica y Gas Natural y UREMA desde el 2000 ha venido desarrollado proyectos encaminados a implementar mejoras e innovaciones en la utilización de métodos de procesamiento de dichos productos. Es así como la yuca ha generado un particular interés, por ser un cultivo propio de la región y que presenta un buen potencial para la industria alimenticia y otras. En función de esto se ha realizado una serie de trabajos, entre los que se encuentra el de Durango *et al.* (2003), que consiste en el diseño y construcción de un horno secador de yuca. Cabe anotar que ya se tiene construido un modelo cuyo diseño se hizo en forma cualitativa, es decir, se utilizaron los conocimientos y experiencias de los grupos en lo que a secado se refiere, sin hacer énfasis en realizar cálculos exactos y pruebas que condujeran a un diseño óptimo; dicho modelo fue probado y se obtuvieron resultados muy cercanos al modelo matemático planteado. Además, se pudo establecer que los factores que inciden en el proceso de secado artificial de yuca son: tamaño y forma de la yuca, temperatura del aire en recirculación, contenido inicial de humedad de la yuca, flujo de aire en recirculación y humedad relativa del aire en recirculación. No obstante, surge la necesidad de llevar a cabo una serie de pruebas experimentales que conduzcan a establecer de qué forma estas variables afectan el desempeño del equipo y qué tipo de relación existe entre ellas, es decir, qué repercusiones representa para el equipo y el proceso de secado, la variabilidad de alguna de ellas; de manera que se tenga la información necesaria para estimar el comportamiento del mismo bajo diferentes condiciones de carga, temperatura del aire, tamaño de los pedazos de yuca y flujo de aire en recirculación.

2. ESTRATEGIA EXPERIMENTAL UTILIZADA

En los diferentes campos del conocimiento se llevan a cabo experimentos con el fin de establecer o descubrir alguna característica de un proceso en particular. Básicamente se puede definir un experimento como una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en la variable de entrada de un proceso o sistema, y se observan los cambios en la variable de salida o respuesta del proceso, de manera que se pueda identificar la relación causa – efecto entre estas variables. El método más conveniente para tratar procesos en los que intervienen varios factores es el diseño factorial. Con dicho método,

los factores son variados juntos en lugar de uno por uno y todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores son investigadas. Así, por ejemplo, si hay “a” niveles de un factor A y “b” niveles de un factor B, cada réplica o repetición contiene todas las combinaciones posibles, con lo cual se garantiza que se investiguen todas las interacciones que puedan existir entre variables; entendiéndose por interacción cuando la diferencia en la respuesta entre los niveles de un factor no es la misma en todos los niveles de los otros factores.

Tabla 1
Resumen de análisis de Varianza

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada (Fo)
A	SS_A	1	$MS_A = SS_A / GDL_A$	$Fo = MS_A / MS_E$
B	SS_B	1	$MS_B = SS_B / GDL_B$	$Fo = MS_B / MS_E$
C	SS_C	1	$MS_C = SS_C / GDL_C$	$Fo = MS_C / MS_E$
D	SS_D	1	$MS_D = SS_D / GDL_D$	$Fo = MS_D / MS_E$
AB	SS_{AB}	1	$MS_{AB} = SS_{AB} / GDL_{AB}$	$Fo = MS_{AB} / MS_E$
AC	SS_{AC}	1	$MS_{AC} = SS_{AC} / GDL_{AC}$	$Fo = MS_{AC} / MS_E$
AD	SS_{AD}	1	$MS_{AD} = SS_{AD} / GDL_{AD}$	$Fo = MS_{AD} / MS_E$
BC	SS_{BC}	1	$MS_{BC} = SS_{BC} / GDL_{BC}$	$Fo = MS_{BC} / MS_E$
BD	SS_{BD}	1	$MS_{BD} = SS_{BD} / GDL_{BD}$	$Fo = MS_{BD} / MS_E$
CD	SS_{CD}	1	$MS_{CD} = SS_{CD} / GDL_{CD}$	$Fo = MS_{CD} / MS_E$
ABC	SS_{ABC}	1	$MS_{ABC} = SS_{ABC} / GDL_{ABC}$	$Fo = MS_{ABC} / MS_E$
ABD	SS_{ABD}	1	$MS_{ABD} = SS_{ABD} / GDL_{ABD}$	$Fo = MS_{ABD} / MS_E$
ACD	SS_{ACD}	1	$MS_{ACD} = SS_{ACD} / GDL_{ACD}$	$Fo = MS_{ACD} / MS_E$
BCD	SS_{BCD}	1	$MS_{BCD} = SS_{BCD} / GDL_{BCD}$	$Fo = MS_{BCD} / MS_E$
ABCD	SS_{ABCD}	1	$MS_{ABCD} = SS_{ABCD} / GDL_{ABCD}$	$Fo = MS_{ABCD} / MS_E$
ERROR	SS_E	$2^k(n-1)$	$MS_E = SS_E / GDL_A$	
TOTAL	SS_T	$n2^k-1$		

En el caso de K factores, cada uno con dos niveles (alto y bajo), el diseño es llamado 2^k factorial¹. Para saber cuáles de los efectos y sus interacciones son los más importantes en el proceso, se realiza un análisis de varianza, el cual es básicamente una prueba de hipótesis estadística acerca de la influencia o no de determinado factor en el proceso. Los cálculos de este análisis se resumen en la

¹ MONTGOMERY, D. (2001). *Design and Analysis of Experiments* (p.218-276). United States of America.

tabla 1, donde $SS_A \dots SS_{ABCD}$ son la suma de cuadrados de los efectos y de las interacciones principales, SS_E y SS_T son la suma de cuadrados del error y del total respectivamente². El valor F para un nivel de significancia de α tomado de una tabla de distribución F se compara con el valor F_0 , de tal manera que si F_0 es mayor que F, significa que la hipótesis nula es rechazada y se acepta la hipótesis alternativa, lo que significa que los efectos de determinado factor o interacción son significativas para el proceso.

3. PROCEDIMIENTO

Se llevó a cabo una inspección visual del estado físico de cada uno de los componentes mecánicos del modelo de secador y se verificaron sus dimensiones y la operación del mismo. Se constató que el sistema de control estaba funcionando normalmente; adicionalmente se establecieron los principales puntos de fuga. Una vez hecho esto, se procedió a diseñar y ejecutar pruebas experimentales que permitieron obtener resultados que manifestaron 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 iban a secar y flujo de aire en recirculación. Por tal motivo se hizo uso del diseño factorial de experimentos; esta estrategia de experimentación se empleó porque se deseaba saber o establecer qué efectos tienen en el proceso de secado de yuca las diferentes variables. Con esta técnica se investigaron todas las combinaciones posibles de los niveles de cada uno de los factores. Teniendo en cuenta las pruebas anteriores, donde se concluye que en el modelo que se iba a probar se tienen cuatro variables controlables: cantidad de yuca, tamaño de los pedazos, temperatura del aire en recirculación y flujo de aire en recirculación, se escogieron dos niveles para cada una de ellas; con referencia al último factor, vale la pena explicar que lo ideal hubiese sido variar y controlar el flujo de aire en los niveles que se iba a trabajar, en lugar de la velocidad del ventilador. Debido a que dicho flujo depende de la cantidad de yuca en el secador, para un mismo nivel de velocidad, el flujo varía a medida que la yuca pierde humedad. En pocas palabras, variando la velocidad en dos niveles no se garantizan dos niveles constantes de flujo durante cada prueba. Sin embargo, en virtud de que no se tenían los medios necesarios para controlar directamente el caudal de aire, se decidió trabajar con la velocidad del ventilador como factor por controlar (ver tabla 2). Con base en lo anterior se diseñaron dieciséis pruebas (3 horas de duración cada una), y por limitaciones de tiempo, cada una de ellas se llevó a cabo dos veces, lo que dio un total de treinta y dos.

² Ibid., p.220, 242-244.

Tabla 2
Niveles escogidos para cada variable del proceso

Nivel	Cantidad de yuca (Kg)A	Relación Superficie / Volumen B	Velocidad del ventilador (rpm)C	Temperatura aire (°C)D
Alto	2	(0.4746 – 0.4804)mm ⁻¹ (Espesor: ½ cm)	2204	80
Bajo	1	(0.1687 – 0.1716)mm ⁻¹ (Espesor: 2 cm)	789	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 ½ 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. Dicho valor se estableció observando los diámetros más comunes que presentaban los tubérculos en los diferentes puntos de venta a los que se acudió. De este modo se controló la relación superficie a volumen de cada uno de los pedazos. La velocidad del motor se controló variando el voltaje del motor. De este modo, para 789 rpm el voltaje en el motor era de 3.5V, y para 2204 rpm era de 6.8V. Para variar la temperatura del aire en recirculación se establecieron dos puntos de control (80°C y 60°C) en el controlador de temperatura. Estas temperaturas son las máximas que el aire podía alcanzar en las respectivas pruebas. Los niveles de las variables que se iban a controlar se escogieron teniendo en cuenta pruebas realizadas anteriormente. En cada prueba se realizaron mediciones de voltaje y corriente en el motor y la resistencia, humedad retirada; flujo de aire y caída de presión al inicio y final de cada prueba.

4. RESULTADOS

Una vez realizados los experimentos se procedió a realizar los cálculos estadísticos, cuyos resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3
Resultados de análisis de varianza

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F calculada (Fo)	$F_{\alpha, v1, v2}$
A	206.96	1	206.96	11.257	4.49
B	1393.128	1	1393.128	75.78	4.49
C	0.66125	1	0.66125	0.036	4.49
D	172.422	1	172.422	9.378	4.49
AB	0.75645	1	0.75645	0.0411	4.49
AC	105.633	1	105.633	5.7456	4.49
AD	3.6585	1	3.6585	0.199	4.49
BC	21.6153	1	21.6153	1.176	4.49
BD	28.3128	1	28.3128	1.54	4.49
CD	4.00445	1	4.00445	0.2178	4.49
ABC	19.53125	1	19.53125	1.0623	4.49
ABD	0.0008	1	0.0008	0.00435	4.49
ACD	0.0378125	1	0.0378125	0.02057	4.49
BCD	45.3628	1	45.3628	2.467	4.49
ABCD	4.06125	1	4.06125	0.221	4.49
ERROR	296.159	16	18.385		4.49
TOTAL	2300.305	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 A (cantidad de yuca), B (relación superficie a volumen), D (temperatura de control del aire de recirculación) y la interacción AC (cantidad de yuca con la velocidad del ventilador) son los que tienen un efecto significativo para el proceso de secado en el modelo probado, ya que F calculado (F_o) $> F_{0.05, 1, 16} = 4.49$. A continuación se muestran gráficas que ilustran el efecto de los factores más importantes en el proceso de secado.

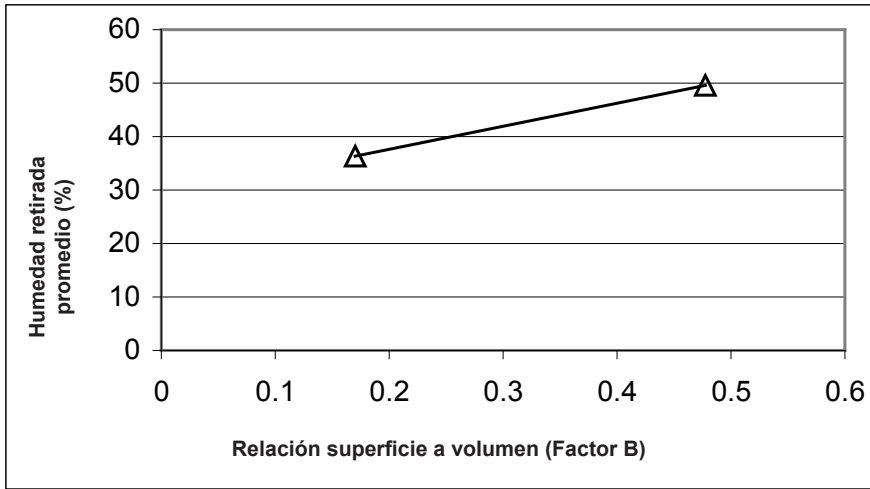


Figura 1. Efecto de la cantidad de yuca en el porcentaje de humedad retirada

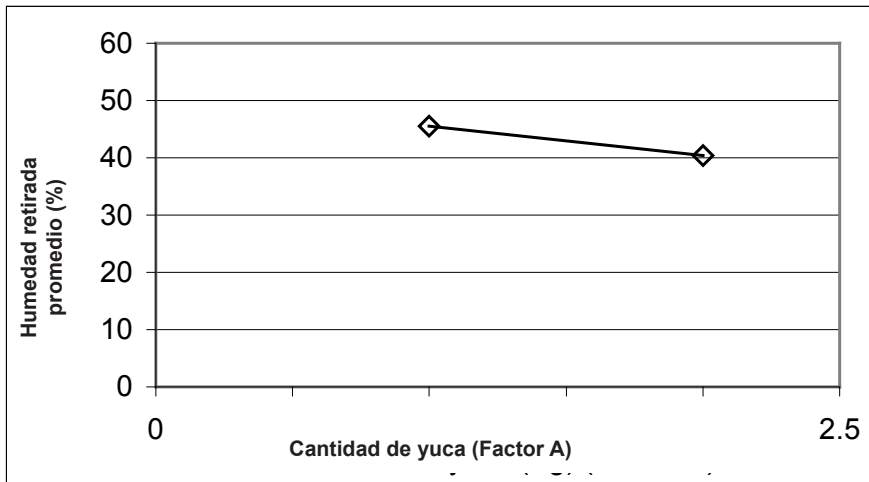


Figura 2. Efecto de la relación superficie / volumen en el porcentaje de humedad retirada

En la figura 1 se observa que el porcentaje de humedad retirada disminuye al aumentar la cantidad de yuca en el secador, mientras que la figura 2 muestra que la humedad retirada aumenta al aumentar la relación superficie / volumen. En la figura 3 se observa que la humedad retirada aumenta al incrementarse

la temperatura del aire de recirculación. De la figura 4 no se puede asegurar el comportamiento respecto a la velocidad del ventilador.

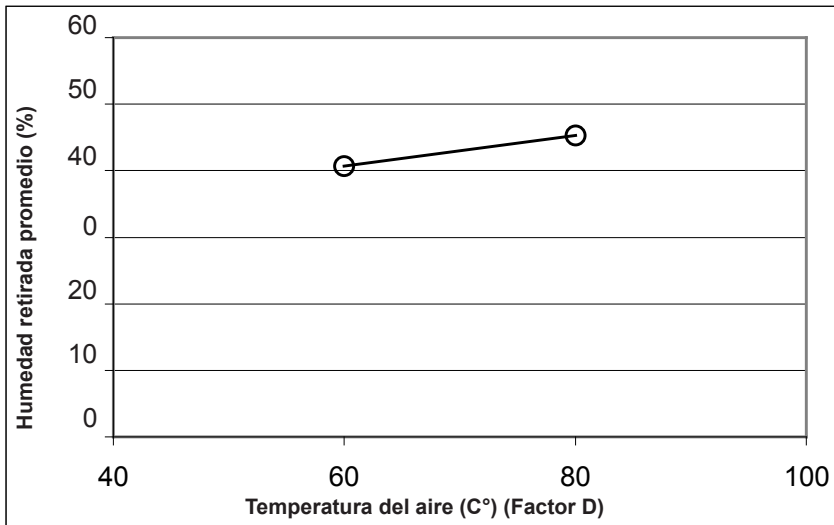


Figura 3. Efecto de la temperatura del aire en el porcentaje de humedad retirada

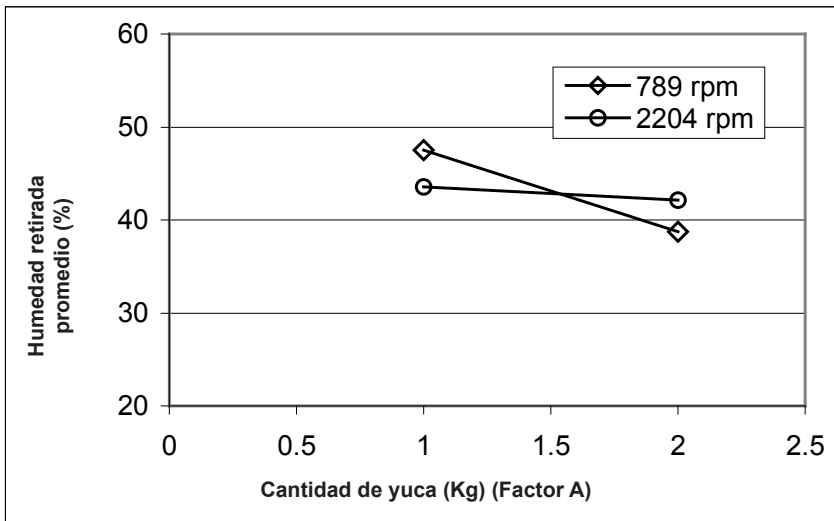


Figura 4. Efecto de la interacción cantidad de yuca y velocidad del ventilador en el porcentaje de humedad retirada

5. 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 múltiple³, y se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\%H=30.9741-0.0123(C)+42.875(A/V)-0.007706(V)-0.2447(T)+4.95 \times 10^{-6}(C)(V) \quad (\text{Ec. 1})$$

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.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las figuras 5 y 6 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 del ventilador o la temperatura. Por otro lado, cabe resaltar que para obtener un determinado porcentaje de humedad retirada, se puede hacer uso de varias combinaciones diferentes entre las variables, es decir, si se quisiera obtener un porcentaje de humedad retirada del 40% para dos kilogramos de yuca secada durante tres horas a una temperatura de control del aire de recirculación 70°C , se podría hacer uso de la figura 6; evidentemente, se puede observar que este porcentaje de humedad retirada podría lograrse con una velocidad del ventilador de 2204 rpm y con una relación de superficie

³ MONTGOMERY, *op. cit.*, p. 392-422.

WALPOLE, R. & MYERS, R. (1992). *Probabilidad y Estadística* (p. 419-442). México.

a volumen de aproximadamente 0.27 mm^{-1} . No obstante, este porcentaje de humedad retirada también pudo haberse obtenido con una velocidad de giro de 789 rpm, bajo las mismas condiciones de temperatura y con una relación superficie a volumen de aproximadamente 0.34 mm^{-1} .

Al comparar las figuras 5 y 6, las cuales están hechas para dos cantidades de yuca diferentes (un kilogramo 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 del ventilador y temperatura del aire de recirculación.

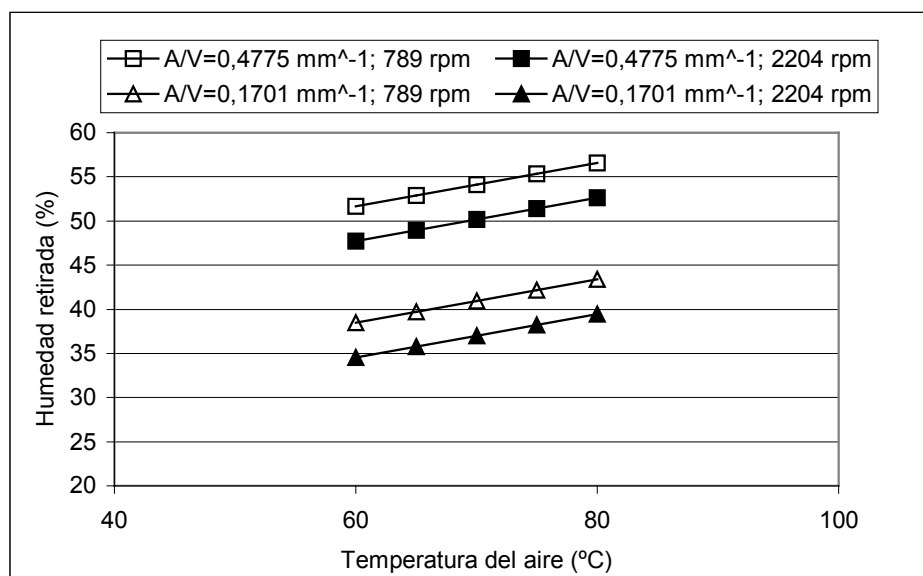


Figura 5. Relación entre humedad retirada y temperatura de control del aire de recirculación para un kilogramo de yuca para dos niveles de velocidad y de relación superficie a volumen

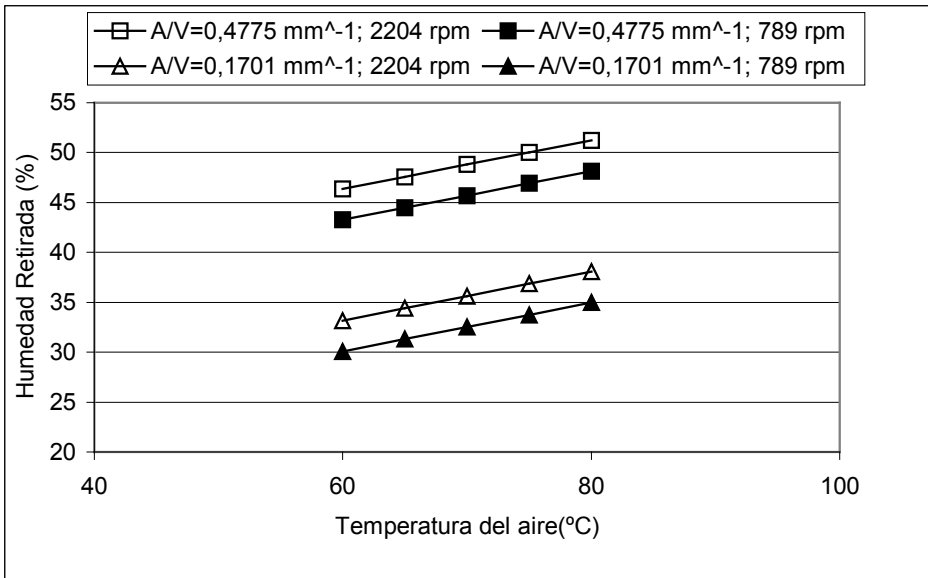


Figura 6. Relación entre humedad retirada y temperatura de control del aire de recirculación para dos kilogramos de yuca y dos niveles de velocidad y de relación superficie a volumen

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados de obtenidos en la investigación se pueden enumerar las siguientes conclusiones acerca del proceso de secado en el secador probado:

- 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 en recirculación y la velocidad del ventilador.
- 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.
- La interacción de mayor importancia es la de la cantidad de yuca con la velocidad del ventilador. Las demás interacciones no tienen importancia

significativa para el proceso. Mediante los resultados obtenidos se puede ver que para una cantidad de yuca alta, el porcentaje de humedad retirada aumenta al aumentar la velocidad del ventilador, y para una cantidad de yuca baja, el porcentaje de humedad retirada disminuye al aumentar la velocidad del ventilador.

- Para iguales condiciones de carga, al aumentar la velocidad del ventilador, el caudal aumenta.
- Para velocidades iguales del ventilador, la potencia hidráulica entregada por éste aumenta al aumentar la cantidad de yuca y viceversa.
- La combinación de variables que produjo el porcentaje de humedad retirada más alto para carga baja fue: relación superficie a volumen alta, velocidad baja y temperatura de control del aire de recirculación alta; y para carga alta: relación superficie a volumen alta, velocidad alta y temperatura alta.
- La potencia eléctrica consumida por el motor sólo varió apreciablemente para los dos niveles de velocidad; en las pruebas donde la velocidad era baja (789 rpm), la potencia eléctrica variaba aproximadamente entre 5 y 7.5 vatios, mientras que en las pruebas donde la velocidad era alta (2204 rpm), la potencia variaba aproximadamente entre 23 y 25 vatios.
- De acuerdo a los valores de eficiencia, se puede concluir que el sistema motor-ventilador presenta una gran cantidad de pérdidas energéticas. Los valores de eficiencia más altos se presentaron en las pruebas que se realizaron con carga alta (2 kilogramos).

REFERENCIAS

- BAIRD, D.C. (1991). *Experimentación, una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. México.
- COCK, J. (1989). La YUCA, Nuevo potencial para un cultivo tradicional. Cali (Colombia).
- DURANGO, N., BULA, A., QUINTERO, H. & FERRANS, O. (2004). Construcción de un modelo de secador de Yuca en medio poroso usando flujo radial de aire caliente. *Revista de Ingeniería y Desarrollo*, N° 15, Universidad del Norte, p. 9.
- MCCABE, W. & SMITH, J. (1975). *Operaciones Básicas en Ingeniería Química*, vol. II. Barcelona (España).
- MONTGOMERY, D.S (2001). *Design and Analysis of Experiments*. United States of America.
- WALPOLE, R. & MYERS, R. (1992). *Probabilidad y Estadística*. México, McGraw-Hill.