

Construcción de un modelo de secador de yuca, en medio poroso, usando flujo radial de aire caliente*

Néstor Durango**, Antonio Bula***,
Hugo Quintero****, Orlando Ferrans****
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad del Norte

Resumen

Este artículo presenta el diseño y fabricación de un secador radial de yuca, en lecho poroso, usando energía eléctrica como fuente de calentamiento del aire de secado. Se presentan las pruebas llevadas a cabo en el secador con el fin de analizar su desempeño energético, la tasa de remoción de humedad en función del tiempo y las temperaturas de operación del mismo.

Palabras clave: Secado de alimentos, diseño de secador, medio poroso, yuca.

Abstract

This paper presents the design and manufacturing process of a radial yucca dryer in porous media, using electrical energy as heating source for the drying air. The different tests carried out in the dryer are presented in order to analyze the energy performance, the moisture removal rate as a function of time, and the operating temperature reached.

Key words: Food drying, dryer design, porous media, yucca.

Fecha de recepción: 4 de agosto de 2003
Fecha de aceptación: 28 de abril 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

Uno de los cultivos de mayor importancia en las regiones tropicales es la yuca, donde sus raíces constituyen un alimento básico para sus pobladores. De igual manera, alrededor del 80% de la producción mundial de yuca es utilizada para el consumo humano, la cual aporta cerca del 10% de las calorías requeridas por el hombre. Adicional a lo anterior, este producto posee una gran capacidad para el desarrollo y utilización industrial: la extracción de almidón para panificación, las posibilidades de uso como alimento para animales y la producción de alcohol carburante, son algunas de las principales utilidades derivadas de su cultivo. De estas potencialidades, uno de los usos industriales que ofrece mejores perspectivas es la utilización de la yuca como sustituto de cereales en raciones balanceadas destinadas a la alimentación animal (aves, cerdos, vacas, terneras), ya que debido al importante crecimiento de estas actividades y a lo limitada que es la disponibilidad local de cereales para satisfacer su demanda, los países tropicales se han visto obligados a importarlos en cantidades cada vez más significativas. Sin embargo, debido a que la yuca, por sus características de cosecha y elevada humedad, está sujeta a un rápido deterioro, se hace indispensable que las raíces sean sometidas a un proceso de secado previo, a fin de garantizar un almacenamiento seguro por un período más largo, sin que se presente riesgo de pérdidas debido a pudrimiento. El nivel de deshidratación óptimo es aquel en el que se ha reducido el contenido de humedad a valores entre el 10 y el 14% (la yuca contiene una humedad inicial elevada: entre 60 y 80%). Finalmente, y teniendo en cuenta que nuestra región es una zona favorable para el cultivo de este producto, los grupos Termodinámica y Gas Natural y UREMA de la Universidad del Norte están realizando un proyecto de investigación encaminado al desarrollo de un modelo de secador de yuca para optimizar el proceso de conservación de este producto, y de esta manera poder aprovechar sus beneficios.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del modelo se siguieron los siguientes pasos:

- Recopilación bibliográfica acerca de las características naturales de la yuca, los procesos de secado a que puede ser sometida y los diversos tipos de secadores existentes para tal propósito. Entre lo recopilado se encontró, entre otros, la secuencia de pasos que se deben seguir para llevar a cabo un adecuado proceso de secado de yuca, el cual ayudará a establecer un procedimiento guía para futuras experiencias.

- Se establecieron los factores que más influían en el proceso de secado.
- Para el prediseño se estudiaron varias alternativas para el ventilador, el sistema de calentamiento, la forma de circulación del aire. Con respecto a la selección del tipo de ventilador, se investigó la influencia que la forma de los álabes tiene sobre el comportamiento caudal – presión del ventilador, dada la necesidad que se presentaba de vencer la alta resistencia al paso del aire que ofrecería la yuca durante el proceso de secado (lecho poroso). Para el calentamiento del aire y teniendo en cuenta el costo inicial que representaría implementar algún sistema de quemadores de combustibles, se escogió calentar el aire utilizando resistencias eléctricas, las cuales son de fácil consecución y utilización, además de brindar una forma práctica de controlar el efecto calentador (variar la resistencia) y, por consiguiente, la temperatura del aire.
- Del diseño conceptual se pasó a un diseño gráfico, en el cual se dimensionó el secador con base en los elementos que lo componen, para luego proseguir con la etapa de construcción del modelo. Esta etapa fue de vital importancia en el desarrollo del proyecto, ya que, con excepción del moto ventilador, prácticamente no se tenían piezas construidas aún y se pudo preveer diferentes inconvenientes que se podrían presentar al momento del funcionamiento del secador. El motoventilador fue crucial para definir las dimensiones del secador en cada una de sus diferentes partes.
- A partir de este prediseño se discutió un diseño tentativo, para luego continuar con la etapa de construcción. La construcción del secador se realizó en un taller de metalmecánica. Para la escogencia del taller, luego de visitar diferentes talleres de la ciudad, tuvo en cuenta la calidad de sus trabajos.
- Luego de construido el modelo se comenzaron las primeras pruebas del secador, sin yuca y con yuca, para ver su funcionamiento y comportamiento, y se hicieron los ajustes necesarios que permitieron mejorar el rendimiento y optimizar el proceso de secado.
- Realizadas las pruebas, y con base en la experiencia adquirida, se redactó una guía de operación del secador con el propósito de que sirviera de marco de referencia para futuras pruebas, ya sea por parte del grupo o del resto de estudiantes que sigan la misma línea investigación.

3. DISEÑO

Tal como se explicó en la justificación, se escogió el secador radial porque debido a que presenta simetría radial brinda un diseño más compacto y práctico en comparación con otro tipo de secadores.

Ventilador. El punto de partida para iniciar el prediseño fue la escogencia del tipo de ventilador que permitiría la recirculación del aire caliente, debido a que éste es muy influyente en el funcionamiento del secador. Existen tres tipos de ventiladores según la disposición de los álabes: curvados hacia adelante, curvados hacia atrás y radiales. La diferencia principal de los ventiladores con estos tipos de álabes reside en su comportamiento cuando se encuentran trabajando a diferentes condiciones de carga. Para este tipo de aplicación es recomendable los ventiladores con álabes curvados hacia atrás, porque en ellos se genera mayor presión en la medida en que aumenta la carga, lo cual evita el estancamiento del aire en el producto que se está secando, dado que los espacios por los que circula disminuyen a medida que la yuca pierde humedad. Con los ventiladores con álabes curvados hacia delante se presenta el caso contrario: al aumentar la carga disminuye la presión generada por el ventilador, lo que dificulta la circulación del aire por el producto en la medida en que avanza el proceso de secado del mismo. Los ventiladores con álabes radiales presentan un comportamiento intermedio entre los dos anteriores.

Motor. Se buscó un conjunto ventilador-motor, ya que al estar éstos separados podría haber dificultades al momento de acoplarlos y no se tendría seguridad sobre si el motor era el adecuado para el ventilador. Se prefirió que el motor fuera de corriente directa, ya que permite un control de velocidad más fácil que uno de corriente alterna. Para tal efecto se haría la conversión de corriente alterna a corriente directa con un rectificador de corriente especificado para el amperaje que se manejaría en el motor.

Características geométricas. El principio de funcionamiento de este secador se basaría en la circulación radial y en ciclo cerrado, de aire caliente, a través de una canasta cilíndrica que contiene el producto que se va a secar dividido en pedazos. El calentamiento del aire circulante se realiza por medio de una resistencia eléctrica. Para tal efecto, la canasta estaría dentro de la carcasa, sostenida por cuatro patas formadas por perfiles en C y con un espacio suficiente entre ellas para permitir la recirculación del aire caliente. Para la canasta se necesitaba un material apropiado que mantenga la yuca en el lugar dispuesto para esto y a la vez permitiera el paso del aire. Para ello se escogió una malla metálica que tuviera orificios de aproximadamente 1 cm^2 , y para garantizar la

forma cilíndrica y poder sostener la malla se colocaron varios soportes a modo de columnas tanto en el diámetro interno como externo de la base metálica de la canasta. También se colocaron aros metálicos en los bordes externo e interno de la canasta. Para darle rigidez a la canasta, se hicieron perforaciones para colocar pernos pasantes que evitaran el movimiento de la canasta durante el funcionamiento del secador. El sistema de calentamiento se calculó en 80W. La tapa de la carcasa cumpliría varias funciones: soportar el motoventilador, servir como tapa para la carcasa, permitir la salida del aire saturado de vapor de agua y evitar que el aire que recirculaba escapara de la carcasa. El material de la tapa de la carcasa debía ser lo suficientemente rígido para sostener el motor. A su vez, la tapa contendría orificios de tamaño variable para permitir la salida del aire saturado de vapor de agua; esto se lograría perforando la lámina de la tapa en el diámetro medio entre el diámetro externo y el interno de la canasta. La fuente de poder del motoventilador utilizaría un transformador reductor de 120/12 V. Adicionalmente se utilizaría un rectificador, un condensador para disminuir las fluctuaciones y variaciones de intensidad, una resistencia eléctrica que ayudaría a la descarga del condensador cuando éste no estuviera en funcionamiento y un fusible para proteger la integridad del motoventilador.

4. MATERIALES Y CONSTRUCCIÓN

A continuación se describen los componentes que conforman el secador y se indica el proceso de manufactura que se llevó a cabo para su construcción.

Tapa. Se fabricó a partir de una lámina de acero. Los orificios de escape de aire se taladraron con una broca de $1/4''$. Los ángulos que unen la tapa con la carcasa se consiguieron a partir del mismo tipo de lámina haciendo un doblado a 90° y perforándolos con una broca de $1/8''$. La tapa se observa en la figura 1 y la lista de materiales se detalla en la tabla 1.

Carcasa. Se formó a partir de dos partes de lámina de acero. Una de éstas sería la base, la cual se hizo de igual forma que la tapa en el inciso anterior. La segunda sería la pared de la carcasa, la cual obtuvo su forma por medio de rolado. La unión entre la base de la carcasa y la pared se hizo con soldadura eléctrica con electrodo revestido. Para las patas de la carcasa se utilizaron perfiles en C formados a partir del mismo tipo de lamina usado para la base y la pared; éstas se unieron a la base con soldadura eléctrica con electrodo revestido. Los orificios para fijar la canasta con la carcasa se hicieron perforando la lámina con una broca de $1/8''$. La lista de materiales se observa en la tabla 2.

Tabla 1
Lista de materiales para la fabricación de la tapa

ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	Tapa para secador de yuca	Lámina de acero al carbón calibre 14
2	Arandela que cubre orificios de salida de aire saturado	Lámina de acero al carbón calibre 14
3	7 pernos de cabeza hexagonal de $f 1/4'' \times 3/4''$ con sus respectivas tuercas	Acero al carbón
4	4 pernos de cabeza ranurada de $f 1/8'' \times 3/4''$ con sus respectivas tuercas	Acero al carbón
5	4 ángulos en L para unir la tapa con la carcasa	Lámina de acero al carbón calibre 14
6	4 topes para evitar que se desprege la arandela de la tapa	Lámina de acero al carbón calibre 14

Tabla 2
Lista de materiales para la fabricación de la carcasa

ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	Pared de la carcasa	Lámina de acero al carbón calibre 14
2	Base de la carcasa	Lámina de acero al carbón calibre 14
3	4 patas para la carcasa con forma de perfiles en C	Lámina de acero al carbón calibre 14

Canasta. Esta consta de varios elementos: base, malla, soportes, aros, bases y pernos. La base se fabricó a partir de una lámina y su forma se obtuvo por medio de oxicorte. Las patas se fabricaron de igual forma que las patas de la carcasa, pero éstas tenían una lámina pequeña adicional, la cual sirve para fijar la canasta con la carcasa. Los soportes se hicieron a partir de varillas lisas de acero, los cuales se colocaron verticalmente y fueron soldados a la base con soldadura eléctrica con electrodo revestido. En la parte superior éstos fueron unidos por medio de aros metálicos obtenidos a partir de la misma varilla lisa de $3/8''$ de diámetro y obtuvieron su forma circular por medio de rolado. La lista de materiales se presenta en la tabla 3.

Malla. Se cortó de acuerdo con las medidas que se tenían en el diseño y fue sujeta a los soportes con un alambre delgado. La unión entre las patas y la

base se hizo por soldadura eléctrica con electrodo revestido. La base tiene un orificio en su parte central, el cual permite que entre el aire para circulación.

Moto ventilador. Se utilizó un motor-ventilador eléctrico de 12 V, 10 A, con aspas de 6" de diámetro exterior y 4.5" diámetro interior con 32 álabes curvados hacia atrás de 3" de largo.

Tabla 3
Lista de materiales para la fabricación de la canasta

ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	Base para la canasta	Lámina de acero al carbón calibre 14
2	Malla de 16 orificios por pulgada cuadrada	Acero al carbón
3	20 soportes verticales de $\frac{3}{16}$ " x 9 cm de largo	Varilla lisa de acero al carbón de $\frac{3}{16}$ "
4	Aro circular de 33 cm de diámetro	Varilla lisa de acero al carbón de $\frac{3}{16}$ "
5	Aro circular de 18 cm de diámetro	Varilla lisa de acero al carbón de $\frac{3}{16}$ "
6	4 patas para la canasta con forma de perfiles en C	Lámina de acero al carbón calibre 14
7	16 pernos de cabeza ranurada de $\frac{1}{8}$ " x $\frac{3}{4}$ " con sus respectivas tuercas	Acero al carbón
8	Empaque de 6 mm de espesor y 12 cm de diámetro	Corcho

Sistema eléctrico. Los elementos requeridos para el sistema eléctrico se presentan en la tabla 4.

Tabla 4
Lista de materiales para el sistema eléctrico

ITEM	DESCRIPCIÓN
1	Transformador eléctrico de 150W, 120V a 12V
2	Enchufe de dos patas
3	Fusible de 10 A con su portafusible
4	Rectificador de corriente de 10A
5	Condensador de 10000mF, 50 Vcc
6	Resistencia eléctrica de 150W

7	Interruptor de encendido
8	2 mt de cable dúplex 2x16 AWG 600V 75°C
9	Disipador de calor para el rectificador
10	Resistencia eléctrica «fogón» con selector de temperatura

5. EXPERIMENTACIÓN Y AJUSTES

Una vez construido el secador de yuca conforme al diseño realizado, se llevó a cabo la etapa de prueba y experimentación con el fin de conocer su comportamiento durante el proceso de secado, para después mejorar su diseño y funcionamiento.

Prueba 1. El equipo fue probado bajo dos condiciones diferentes de carga: sin yuca y con yuca. En esta prueba, la fuente de calor del secador fueron 2 bombillos de 40W. Se buscaba principalmente observar el funcionamiento del equipo y la variación de la temperatura de la estructura del secador y del aire de secado. No se registró la variación de la humedad del aire con respecto al tiempo. La cantidad inicial de yuca (antes del pelado, trozado y lavado) fue de 2 libras.

Para la prueba sin yuca se taparon los orificios de la parte superior de la tapa. Al cabo de aproximadamente media hora el aire alcanzó una temperatura de 40°C. Se notaron fugas entre la tapa y la carcasa, las cuales fueron corregidas. Luego de esto se pudo alcanzar una temperatura de 45°C en el aire que recirculaba y 40°C en la carcasa; finalmente se destaparon los orificios y las temperaturas cayeron a 44 y 39°C respectivamente.

Para la prueba con yuca se procedió de la siguiente manera: se peló la yuca, se lavó y se cortó en formas irregulares. Las características corresponden a las de 10 pedazos tomados al azar, las cuales se presentan en la tabla 5.

Tabla 5
Características de los pedazos de la *prueba 1*

N° de la muestra	L1 (cm)	L2 (cm)	L3 (cm)
1	3.5	2.5	1.5
2	3.0	3.0	2.0
3	3.0	2.5	2.5
4	2.0	1.5	1.5

5	3.5	2.0	1.5
6	3.5	2.0	2.0
7	3.0	3.5	1.5
8	2.0	2.0	2.0
9	2.0	2.0	1.5
10	2.0	2.5	2.0
Promedio	2.75	2.35	1.4

Estos 10 pedazos tenían una masa inicial de 93.1 gr. En total, el secador se cargó con 705.8 gr. de yuca (aproximadamente un 25% de su capacidad), incluyendo estos 10 pedazos. Se encendió el equipo y se dejó funcionando durante una hora, y no se presentó ningún inconveniente. La temperatura del aire y de la pared del secador fueron medidas en intervalos de 10 minutos, y se obtuvieron los resultados presentados en las tablas 6 y 7.

Tabla 6
Variación de la temperatura para la *prueba 1*

Tiempo (min)	Temp. lámina (°C)	Temp. aire (°C)
0	35.0	30.0
10	35.0	37.0
20	35.0	37.0
30	35.0	37.5
40	36.0	37.8
50	36.0	38.0
60	36.0	38.5

* A los 30 minutos se deja escapar aire hasta el final de la prueba.

Tabla 7
Variación de la humedad en la *prueba 1*

Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Deshidratación (gr)	Red. Masa (%)	Humedad inicial	Humedad final
705.8	586.86	118.94	16.85	62%	54.30%

Al cabo de media hora de estar funcionando el equipo se destaparon los orificios de la parte superior de la tapa, con el fin de dejar escapar el aire húmedo y la reposición de aire «nuevo»; no se presentaron cambios en la temperatura.

Finalmente, luego de una hora de funcionamiento se apagó el equipo, se sacó la yuca y se pesó. Las observaciones acerca de esta prueba son las siguientes:

- Fue importante –con respecto al valor final de la temperatura alcanzada– evitar las fugas entre la tapa y la carcasa.
- En cambio, fue poco relevante en las dos pruebas realizadas que los orificios de la tapa estuvieran abiertos o cerrados.
- En las dos pruebas se observó que el rectificador del sistema eléctrico por lo que se hace necesario la utilización de un disipador de calor.
- En la prueba con yuca, la cantidad de yuca utilizada no alcanzó a llenar toda la canasta, debido a lo cual el aire no fue forzado a pasar todo a través del producto sino que parte pudo circular por encima de éste. Si se restringe esta condición, cabe esperar que existe una cantidad de yuca óptima para el proceso de secado en el modelo.

Prueba 2. Esta prueba fue realizada con yuca, y la fuente de calor del secador fueron nuevamente 2 bombillos de 40W. Para esta prueba, teniendo en cuenta lo observado en la prueba 1, se contaba con un disipador de calor para el rectificador y se evitaron las fugas utilizando cinta.

El objetivo principal de esta experiencia era observar el comportamiento del proceso con una mayor cantidad de yuca en pedazos diferentes, la capacidad de los bombillos como fuente de calor y la variación de la temperatura de la estructura del secador y del aire de secado. En esta prueba no se registró la variación de la humedad del aire con el tiempo y su duración fue de una hora, con intervalos de medición de 10 minutos. La cantidad inicial (antes del pelado, trozado y limpieza) fue de 6 libras, la cual al momento de ser colocada en el secador (ya en pedazos limpios) ocupó alrededor del 60% de su capacidad. Cabe destacar que esta yuca fue cortada en pedazos en forma de discos (forma diferente de los de la prueba 1), de los cuales se escogieron nuevamente 10 muestras, cuyas características se presentan en la tabla 8.

Tabla 8
Características de los pedazos de la *prueba 2*

N° de la muestra	«Diámetro» (cm)	«Espesor» (cm)
1	3.5	1.5
2	4.5	2.0
3	5.0	2.0
4	3.0	2.0
5	4.5	2.5
6	4.0	2.0
7	3.5	2.0
8	3.5	3.5
9	2.5	2.5
10	4.0	2.0
Promedio	3.8	2.2

Luego de 40 minutos de estar funcionando el equipo se destaparon los orificios de la parte superior de la tapa durante 5 minutos, con el fin de dejar escapar el aire húmedo y la reposición de aire «nuevo», y no se presentaron cambios significativos en la temperatura. Finalmente, luego de una hora de funcionamiento se apagó el equipo, se sacó la yuca y se pesó. Los resultados se presentan en las tablas 9 y 10.

Tabla 9
Variación de la temperatura para la *prueba 2*

Tiempo (min)	Temp. lámina (°C)	Temp. aire (°C)
0	30.0	29.5
10	32.0	34.0
20	33.0	35.5
30	33.0	36.0
40	33.0	36.0
50	33.5	36.0
60	34.0	36.5

* A los 40 min se deja escapar aire durante 5 minutos.

Tabla 10
Variación de la humedad en la *prueba 2*

Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Deshidratación (gr)	Red. Masa (%)	Humedad inicial	Humedad final
1806.27	1650	156.27	8.65	62.00%	58.40%

Comentarios acerca de esta prueba:

- Se recomienda cambiar los bombillos por una resistencia eléctrica que permita alcanzar temperaturas mayores al cabo de un menor tiempo comparado con los dos bombillos de 40W.
- El secado de la yuca disminuyó con respecto a la prueba anterior, lo cual se puede deber principalmente a la forma y dimensión de los pedazos utilizados en esta experiencia (discos de considerable tamaño y espesor).
- Aunque se incrementó la cantidad de yuca con respecto a la prueba 1, al no llenarse completamente la canasta del secador es de esperarse nuevamente que la circulación del aire se produjera principalmente por la parte superior de la canasta (aquella donde no hay yuca), ya que es en esta zona donde el aire encuentra menor resistencia para su circulación. Se recomienda la utilización de una barrera que impida al aire impulsado por el ventilador dirigirse hacia zonas donde no hay presencia de yuca.
- Nuevamente se observa la poca influencia de la apertura de los orificios de la tapa sobre la variación de la temperatura del aire.
- El disipador de calor disminuyó ampliamente el calentamiento del rectificador, y se recomienda su utilización para las pruebas futuras del equipo.

Prueba 3. Esta prueba fue realizada con yuca, y teniendo en cuenta lo observado en la prueba 2 con respecto a la fuente de calor del secador, los bombillos fueron reemplazados por una resistencia eléctrica (tipo espiral). Nuevamente se controlaron las fugas utilizando cinta y se utilizó el disipador de calor para el rectificador.

De igual manera, con el fin de forzar la mayor cantidad de aire circulante caliente que debe entrar en contacto con la yuca, se implementó una barrera, la cual se sostiene del aro de la malla exterior de la canasta. Esta barrera consiste en una tela de 10 cm de alto, a la cual se le ha dado forma cilíndrica

con la ayuda de dos aros metálicos situados en la parte superior e inferior. En esta prueba se utilizó yuca presecada de la prueba 2 en combinación con yuca «nueva», y se llenó el secador hasta el máximo de su capacidad. La yuca nueva fue cortada inicialmente en discos, tal y como se encontraba la yuca presecada, y luego ambas fueron partidas en 4 pedazos «triangulares» lo más similares posibles. Entre los objetivos de esta experiencia se encontraban: observar el comportamiento del proceso a total capacidad del secador y con otra forma de trozado; percibir la capacidad de calentamiento de la resistencia eléctrica y su influencia sobre la humedad, que sería medida en esta prueba, y la temperatura del aire (se usó un higrómetro y dos termómetros); constatar la utilidad de la barrera implementada, e identificar aquellos lugares o posiciones en el secador que favorecen en mayor grado el secado de las raíces de yuca. Para conseguir este último objetivo se establecieron 9 zonas, representativas del proceso de secado, en la canasta que contiene la yuca (figura 1). Durante el llenado de la canasta, en cada una de estas posiciones fue colocado un pedazo de yuca fresca, y se registró su masa antes y después de ser realizada la prueba. Para identificar con facilidad de estos pedazos se utilizó alfileres de diferentes colores.

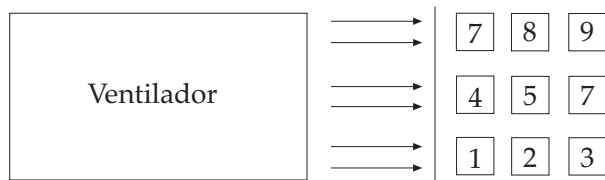


Figura 1. Zonas en la canasta para monitoreo de secado

Con respecto a la medición de humedad, el higrómetro fue colocado dentro de un recipiente cerrado que tenía una abertura a donde llegaba una manguera de $\frac{1}{4}$ pulgadas conectada a la toma de salida del secador. Sin embargo, luego de presentada la saturación del aire (humedad 100%) no se pudo seguir utilizando el higrómetro, debido a que por la presencia en este recipiente de vapor de agua condensado, la lectura siempre sería la misma (100%); es por esta razón que la humedad no se encuentra registrada para todos los valores del tiempo.

Tabla 11Variación de la temperatura para la *prueba 3*

Tiempo (min)	Temp. lámina (°C)	Temp. aire (°C)	Hum. aire (%)
0	31.0	29.0	87.3
5	33.0	39.5	91.5
10	35.0	45.5	98.0
15	36.5	47.5	99.5
20	38.0	49.0	100.0
25	38.0	50.0	98.5
30	38.0	50.5	100.0
35	38.0	51.0	100.0
40	37.5	47.5	-
45	39.0	51.0	-
50	38.0	47.0	-
55	37.0	46.0	-
60	37.0	45.8	-

A los 10 min se deja escapar aire durante 3 minutos.

A los 35 min se deja escapar aire durante 5 minutos.

A los 45 min se deja escapar aire durante 15 minutos.

En relación con la apertura de los orificios situados en la tapa para dejar escapar el aire una vez alcanzara humedades relativas elevadas y reemplazarlo por aire «nuevo», se decidió aprovechar adicionalmente las fugas laterales que presentaba el secador (el borde donde se unen la tapa y la carcasa). De esta manera, cuando era necesario dejar escapar este aire, paralelo a la apertura de los orificios de la tapa, se retiraba la cinta para enmascarar utilizada para evitar las fugas mencionadas. La duración de esta experiencia fue de una hora, y se redujeron los intervalos de medición a 5 minutos. Los resultados de la misma se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 12
Variación de la humedad en la *prueba 3*

	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Deshidratación (gr)	Red. Masa (%)	Humedad inicial	Humedad final
m1 (nueva)	7.9	5.7	2.2	27.85	62	47.33
m2 (nueva)	8.6	7	1.6	18.60	62	53.31
m3 (nueva)	10.8	9.6	1.2	11.11	62	57.25
m4 (nueva)	9.8	6.2	3.6	36.73	62	39.94
m5 (nueva)	6.1	4.5	1.6	26.23	62	48.49
m6 (nueva)	6.6	5.2	1.4	21.21	62	51.77
m7 (nueva)	6.4	3.5	2.9	45.31	62	30.51
m8 (nueva)	8.4	5.3	3.1	36.90	62	39.77
m9 (nueva)	8.7	6	2.7	31.03	62	44.90
yuca presecada	1130	886	244	21.59	58.4	46.94
yuca nueva	1855	1431	424	22.86	62	50.74
yuca total	2985	2317	668	22.38	62	-

Sobre esta prueba se pueden hacer las siguientes observaciones:

- La resistencia eléctrica mejoró considerablemente el proceso de secado, lo cual se puede observar en los resultados presentados en la tabla 12.
- La barrera implementada, el llenado de la canasta y la nueva forma de los pedazos de yuca, fueron de gran utilidad para el proceso de secado de las raíces de la misma, ya que se aprovechó en mayor y mejor manera el aire de circulación.
- Se hace necesario mejorar la medición de la humedad del aire.
- Se identificaron las zonas con mayor susceptibilidad al proceso de deshidratación en el secador, así como aquellas en las que la reducción de masa se hace muy pequeña en comparación con las otras (zona inferior: 1, 2 y 3). Con el fin de lograr un mayor contacto entre el aire y esta zona inferior de yuca, se recomienda colocar un suplemento para disminuir el espacio existente entre la base de la canasta y el extremo inferior del ventilador. Este suplemento serviría como barrera, y evitaría la devolución del aire impulsado por el ventilador a través del espacio actualmente existente.

Prueba 4. En términos generales, esta prueba es muy similar a la anterior en aspectos como: cantidad de yuca utilizada, forma de los pedazos de yuca, dispositivo de calentamiento del aire, control de fugas, tela cilíndrica como

barrera, escape del aire, duración, intervalos de medición y determinación de zonas favorables y menos favorables para el secado. Entre las diferencias existentes se destacan las siguientes:

- La canasta fue llenada en su totalidad usando yuca fresca (no había yuca previamente secada).
- La temperatura del aire de circulación fue medida utilizando una termocupla.
- El higrómetro fue utilizado solamente en el momento de medir la humedad, es decir, cada 5 minutos, y ya no se encontraba dentro de un recipiente. Ahora, éste era tomado y colocado manualmente en un punto de escape de aire (fuga lateral que se destapaba momentáneamente) con aproximadamente 30 segundos antes de cumplirse el tiempo de medición, luego de los cuales era expuesto nuevamente al contacto con el aire ambiental.
- Se adicionó un empaque como suplemento, el cual permitió disminuir las fugas de aire a través del espacio existente entre la parte inferior del ventilador y la base de la canasta. Los resultados de esta prueba pueden ser observados en las tablas 13 y 14.

Tabla 13
Variación de la temperatura para la *prueba 4*

Tiempo (min)	Temp. lámina (°C)	Temp. aire (°C)	Hum. aire (%)
0	28.0	28.0	94.0
5	31.0	43.0	96.0
10	36.0	48.0	98.0
15	39.0	53.0	100.0
20	38.0	52.0	99.0
25	38.0	51.0	96.0
30	38.0	53.0	98.0
35	39.0	54.0	100.0
40	39.0	53.0	97.0
45	39.0	53.0	94.0
50	39.0	54.0	93.0
55	39.0	56.0	97.0
60	40.0	57.0	98.5

A los 15 min se deja escapar aire durante 10 minutos.
A los 35 min se deja escapar aire durante 15 minutos.

Tabla 14
Variación de la humedad en la *prueba 4*

	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Deshidratación (gr)	Red. Masa (%)	Humedad inicial	Humedad final
m1	6.6	4.8	1.8	27.27	62	47.75
m2	5.8	4.6	1.2	20.69	62	52.09
m3	6.2	5.1	1.1	17.74	62	53.80
m4	5.3	3.4	1.9	35.85	62	40.76
m5	6.7	4.7	2	29.85	62	45.83
m6	6.9	5.2	1.7	24.64	62	49.58
m7	6.7	4.1	2.6	38.81	62	37.90
m8	6.5	4	2.5	38.46	62	38.25
m9	6.55	4.4	2.15	32.82	62	43.43
yuca total	3054.85	2350.3	704.55	23.06	62	50.61

Respecto a esta prueba se pueden hacer las siguientes observaciones:

- En general, y comparando con la prueba anterior, se puede decir que mejoró el proceso de secado, y se obtuvo un incremento en la reducción de humedad.
- La medición de humedad puede realizarse sin ningún inconveniente.
- El suplemento ayudó a incrementar el secado de la zona inferior de la canasta de yuca.

6. PROCEDIMIENTO GUÍA DE OPERACIÓN RECOMENDADO

Con base en lo descrito, lo cual es resultado del proceso de prueba y experimentación llevado a cabo, se presenta a continuación un Procedimiento guía de operación recomendado para el secador de yuca, el cual en la medida de lo posible debe seguirse para la realización futuras pruebas con este equipo:

1. Pelar la yuca.
2. Lavar con agua o limpiar con algún trapo o papel las raíces de yuca peladas.
3. Cortar la yuca en discos, procurando que éstos no tengan más de 1 cm de espesor.

4. Partir los discos en 4 partes similares.
5. Determinar / pesar la cantidad inicial de yuca.
6. Introducir la yuca en la canasta del secador.
7. Sostener la tela de forma cilíndrica utilizando el aro exterior de la canasta
8. Tapar el secador, ajustando los pernos que unen la tapa con la carcasa.
9. Colocar el termómetro medidor de la temperatura de la lámina usando cinta para enmascarar o algún otro método adecuado.
10. Colocar el termómetro o termocupla medidor de la temperatura del aire de circulación interior del secador. Para esto se puede utilizar alguno de los orificios presentes en la tapa del secador.
11. Tapar cualquier fuga que se pueda presentar. Para esto puede usarse cinta para enmascarar.
12. Tomar las medidas de temperatura y humedad ambiental.
13. Encender el secador utilizando el interruptor.
14. Seleccionar y registrar el nivel de calentamiento con el selector de la resistencia.
15. Registrar cada 5 minutos (o de acuerdo al tiempo de medición establecido) humedad y temperatura del aire de secado y temperatura de la lámina del secador. Para la medición de la humedad acercar el higrómetro, aproximadamente 30 segundos antes al tiempo de medición, a una fuga lateral que se destapa momentáneamente, y dejarlo estabilizar y registrar este valor.
16. Dejar escapar aire de secado cuando la humedad relativa alcance valores cercanos al 100%. Para esto se destapan los orificios superiores de la tapa y las fugas (que estaban tapadas con cinta para enmascarar) presentes entre la tapa y la carcasa.
17. Cerrar los escapes de aire cuando la humedad disminuya con respecto al valor escogido.

18. Apagar el interruptor, el cual desenergiza tanto al ventilador como a la resistencia, una vez terminada la prueba.

19. Determinar / pesar la cantidad final de yuca.

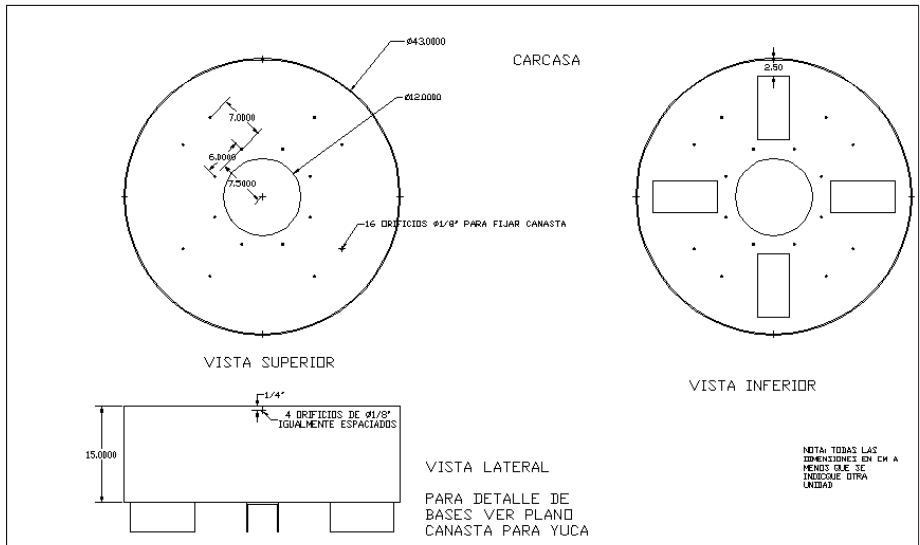
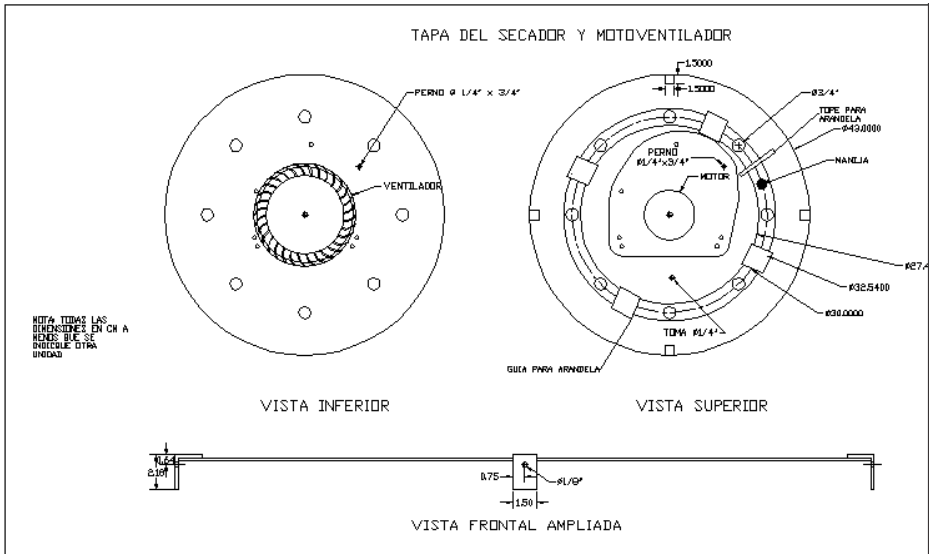
20. Dejar las condiciones del recinto en las condiciones iniciales.

Se hace necesaria la utilización de herramientas y utensilios adecuados para cada uno de los pasos anteriores, así como el uso de elementos de protección y seguridad, con el fin de prevenir y evitar cualquier accidente. Cabe destacar que no se descarta nunca la posibilidad de introducir modificaciones a este procedimiento que se reflejen en mejoras en el proceso de secado de yuca, las cuales deben ser resultado de la constante y continuada experimentación.

CONCLUSIONES

- Se construyó un modelo de secador radial que opera con energía eléctrica y es usado para el secado de la yuca.
- La teoría es importante en la etapa del diseño conceptual y prediseño, pero la parte de fabricación constituye un paso más allá. Esta es un valor agregado que complementa la parte teórica de la investigación.
- Entre los factores que inciden en el proceso del secado se se pueden enumerar los siguientes: tamaño y forma de los pedazos de la yuca, temperatura y humedad relativa del aire que recircula, contenido inicial de yuca, velocidad del aire en el secador. De los anteriores factores se controlaron los siguientes como variables: el tamaño y forma de la yuca, temperatura del aire que recircula y humedad relativa del aire.
- Fue un acierto escoger pocas variables para controlar en el proceso de secado, debido a la complejidad de realizarlo.
- Se realizó un diseño tentativo, el cual después de discutido fue modificado, aprobado y construido.
- Se llevó a cabo un procedimiento modelo que se debía seguir en la realización de la prueba, el cual indica los parámetros variables y constantes que se deben medir durante la prueba.

- Dada la utilidad de la yuca para el procesamiento de raciones alimenticias para animales, es sumamente importante secar la yuca para cumplir con los estándares de calidad requeridos para tal efecto, lo que a su vez permite que el producto tenga mayor duración y mayores oportunidades de comercialización.
- Es importante evitar, en lo posible, cualquier tipo de fuga en el secador para que se alcancen temperaturas mayores en el aire, lo cual permite un tiempo menor de secado; se entiende como fugas, escapes no deseados de aire hacia el exterior de la carcasa.
- El tener abiertos o cerrados los orificios practicados en la tapa del secador para el escape del aire mostró tener poca influencia sobre la temperatura final alcanzada.
- El tamaño y la forma de la yuca tienen una alta influencia en el tiempo de secado. Pedazos de yuca de gran tamaño requieren de mayor tiempo para secarse y además ocupan mayor volumen, lo cual disminuye la capacidad del secador. Pedazos muy pequeños no deben secarse, ya que éstos se apelmazan y aumentan el tiempo de secado y la posibilidad de que no se mantengan dentro de la canasta dispuesta para poner la yuca. También es importante, al momento de definir la forma de los pedazos, tener en cuenta que se evite la menor cantidad de pérdida de yuca y hacerlo lo más práctico posible; por esta razón se escogió la forma de sectores circulares.
- Con base en lo plasmado en el marco teórico se encontró que existen dos etapas en el secado de la yuca. En la primera, la velocidad del aire es el factor más importante, y es en la que se presenta la mayor eliminación de la humedad en la yuca (desde 60 o más a 20%); en la segunda, cuando la pérdida de humedad se presenta en forma lenta, el factor más importante es la temperatura del aire. Por los resultados obtenidos se observa que en ninguna de las pruebas se completó en su totalidad la primera etapa, lo cual indica que es posible seguir disminuyendo la humedad utilizando este secador.
- El tiempo de apertura de los orificios para el escape de aire viene determinado por el contenido de humedad del aire que se recircula. De igual manera, el tiempo de secado será función del porcentaje de humedad de la yuca. La primera debe ser monitoreada continuamente mediante el uso del higrómetro, y la segunda según el peso de varios pedazos de yuca previamente destinados para verificar la pérdida de peso, que se relaciona directamente con la reducción de la humedad en la yuca.



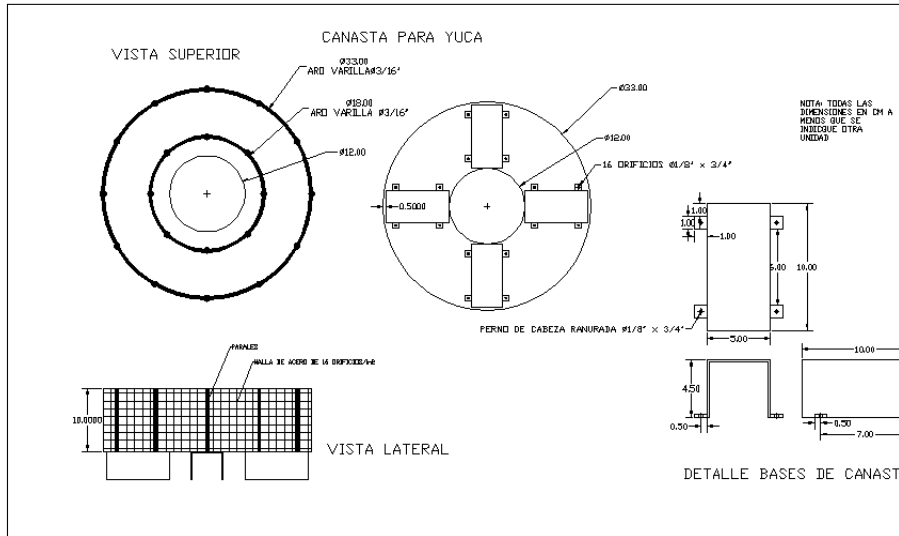


Figura 4. Canasta del secador

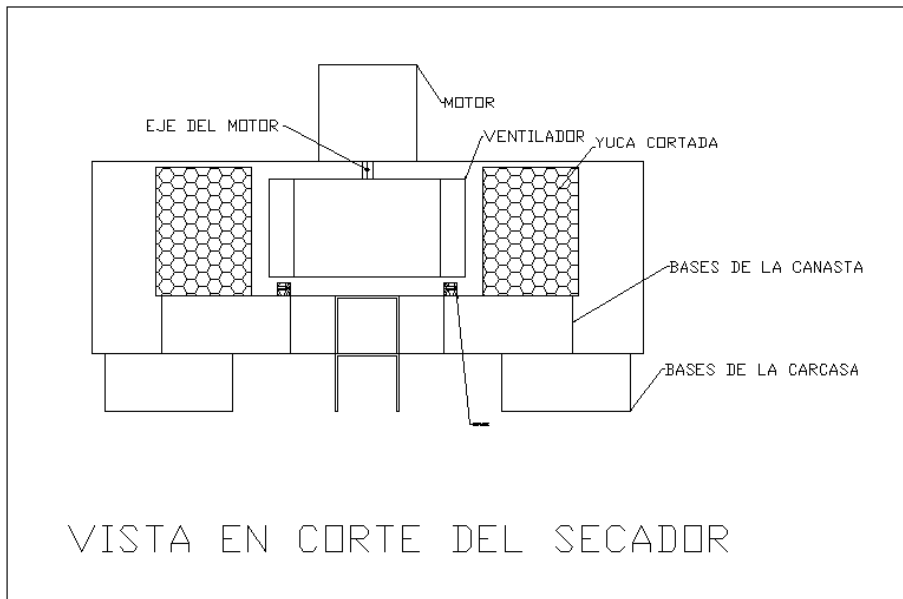


Figura 5. Malla del secador