

Evaluación experimental del secado de yuca variedad venezolana por medio de un sistema híbrido de calentamiento de aire

Experimental evaluation of venezuelan cassava drying by using a hybrid air heating system

Pedro José Miranda Lugo¹ Keimer Alonso Martínez Padilla² Ramiro Torres Gallo^{3*}
Jorge Mario Mendoza Fandiño² Rafael David Gómez Vasquez⁴

Recibido 25 de abril de 2016, aceptado 27 de marzo de 2017
Received: April 25, 2016 Accepted: March 27, 2017

RESUMEN

Se realizó el secado de 5 kg de yuca variedad venezolana por medio de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, con el objetivo de evaluar el secado de yuca variedad venezolana por medio de un sistema híbrido de calentamiento de aire. El secado de la yuca se llevó a cabo en tres modos de operación: solar, híbrido y combustión de biomasa. Para las pruebas en modo solar se estableció una temperatura de secado de 50 °C, el tiempo de secado en este modo de operación fue de 19 h y 15 min, distribuido en seis días, sabiendo que el contenido de humedad inicial (h_i) de la yuca variedad venezolana era de 62% y se llevó a una humedad final (h_f) del 12%. La velocidad de secado fue de 0,147 kg de agua. h^{-1} , el tiempo de secado de la yuca en los modos híbridos y combustión de biomasa fue aproximadamente igual, 16 h 50 min, distribuidos en tres días. Para estos modos de operación la temperatura de secado establecida fue de 70 °C. La velocidad de secado para el modo híbrido y de combustión de biomasa fue 0,170 kg de agua. h^{-1} . Sin embargo, el modo híbrido presentó un consumo de cascarilla de arroz de 4,5 kg/ kg de yuca húmeda, mientras que en el modo combustión de biomasa fue de 7,56 kg/ kg de yuca húmeda. La eficiencia de los colectores fue de 43,91%, del sistema híbrido en modo solar de 28,57% y en el sistema híbrido en modo combustión de biomasa la eficiencia térmica del quemador y del sistema fue de 28,18%.

Palabras clave: Secado de yuca, velocidad de secado, tiempo de secado, sistema híbrido de calentamiento de aire.

ABSTRACT

Drying of 5 kg of Cassava Venezuelan variety was performed using a hybrid system of heating air by biomass combustion and solar radiation. Cassava drying was carried out in three modes of operation: solar, hybrid and biomass combustion. For testing solar mode a drying temperature was 50 °C, drying time in this mode of operation was 19 h and 12 min, distributed in 6 days, knowing the initial moisture content (h_i) of Venezuelan cassava variety was 62% and brought to a final moisture content (h_f) of 12%. The drying rate was 0.147 kg agua. h^{-1} , the drying time of Cassava in hybrid mode and biomass

¹ Industrial Multiphase Flow Laboratory (LEMI), Mechanical Engineering Department, São Carlos School of Engineering, Universidade de São Paulo (USP), Av. Trab. São-Carlense, 400, São Carlos, SP, Brazil. E-mail: pjosemiranda@usp.br

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Córdoba, Carrera 6 N° 76-103, Montería, Colombia. E-mail: kealmapa@gmail.com; jorgemmf@gmail.com

³ Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad del Atlántico, Km 7 Antigua vía Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia. E-mail: ramirotorres@mail.uniatlantico.edu.co

⁴ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana, Carrera 6 N° 97^a-99, Montería, Colombia. E-mail: rafaeldavid11@gmail.com

* Autor de correspondencia.

combustion was approximately equal to 16 h and 50 min, spread over three days. For these operating modes set the drying temperature was 70°C. The drying rate for the hybrid mode and biomass combustion was 0,170 kg/ kg of Cassava. However, the hybrid mode presented rice husk consumption 4.5 kg/ kg of wet Cassava, while the biomass combustion mode was 7, 56 kg/ kg of Cassava.

Keywords: Drying of cassava, drying rate, drying time, hybrid system of heating air.

INTRODUCCIÓN

El secado es un proceso esencial en la preservación de productos agrícolas y en la industria [1]. El consumo de energía en tales industrias es elevado y depende tanto del material a secar y la tecnología utilizada en el proceso [2]. Este es un proceso mediante el que se elimina o reduce el porcentaje de humedad de una sustancia o materia por medio de la evaporación del agua localizada en la superficie de la misma. Es un método que permite alargar la vida útil de los alimentos, pues muchas enzimas y microorganismos que causan cambios químicos en los mismos, no pueden crecer y desarrollarse en ausencia de agua [3]. Además, este trae una reducción en peso y volumen, minimizando costos de empaque, almacenamiento y transporte [4].

El secado de la yuca es el proceso mediante el que se elimina la mayor parte del agua contenida en las raíces de la planta, para así obtener un producto seco (con un 12-14% de humedad) que se pueda almacenar por un período largo de tiempo. Los métodos de secado más utilizados en la Costa Atlántica son: el secado natural en piso (SNP) y el sistema combinado (natural y artificial). El secado de yuca (en trozos) en pisos de concreto es una tecnología desarrollada en Tailandia, la que el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT, por sus siglas en ingles), en los años 60, adoptó en Colombia [5].

Las desventajas del SNP, también llamado secado solar o al aire abierto es el método más común para el secado de productos agrícolas. Algunos de los inconvenientes con este método incluye higiene inaceptable asociado con los productos, dependencia del tiempo, especialmente los efectos de las lluvias, inconvenientes en operación ya que los productos no pueden ser secados durante la noche y necesitan ser recogidos y redistribuidos, además, no se puede predecir la duración del tiempo de secado y la velocidad del secado al aire abierto es lenta [6], [7].

Muchos investigadores han implementado técnicas de secado que permitan realizar el secado de productos agrícolas de una forma más eficiente y a un bajo costo. Algunas de las principales técnicas empleadas para el secado son: secado natural (al aire abierto), secadores solares, combustión de biomasa, entre otras [8], [9].

Ayensu [10] estudió la deshidratación de alimentos con un secador solar con flujo de calor por convección, se empleó para secar cultivos alimentarios (yuca, pimienta, okro, cacahuets, etc.). El colector solar podía transferir 118 W.m⁻² de energía térmica para el secado. Los intercambios térmicos dentro de la secadora se determinaron a partir de un diagrama psicométrico. El aire ambiente a 32 °C y 80% de humedad relativa (HR) puede ser calentado a 45 °C o 40%. Los cultivos se secaron a un contenido de humedad final de <14% y se conservaron durante un período de un año sin deterioro.

Tarigan y Tekasakul [11] desarrollaron un secador solar integrado con un quemador de biomasa y ladrillos para almacenar calor. A partir de una serie de pruebas experimentales del sistema, se encontró que la capacidad de la secadora se encontraba entre 60-65 kg de cacahuets con cáscara. En el secador se encontró que la eficiencia del componente solar es del 23%. Mientras que la eficiencia del quemador fue del 40%.

Madhlopa, Ngwalo [12] diseñaron y construyeron un secador solar de convección natural con una masa térmica integrada y quemador auxiliar de aserrín, el secador se puso a prueba en tres modos de operación de secado, en doce lotes de piña fresca, los modos de operación fueron: solar, biomasa y solar-biomasa. Los resultados muestran que el modo de energía solar de la operación fue más lento (5 días) en el secado de las muestras, con el modo de biomasa-solar es más rápida (3 días), bajo la meteorología reinante (condiciones que eran generalmente desfavorable entre enero y julio). Las muestras fueron secadas

correctamente incluso en condiciones de lluvia, con el contenido de humedad al pasar de 66,9% a 11% (en base seca) cuando el secador se hizo funcionar en el modo biomasa-solar.

Kirirat, Prateepchaikul *et al.* [13] diseñaron un secador solar con respaldo de almacenamiento de energía térmica de la combustión de madera el que fue probado con *Rhinacanthus nasutus*, un tipo de hierba tailandesa. En este trabajo, se utilizó un colector solar 4x5 m para absorber la radiación solar para el calentamiento del aire entrante durante el día, mientras que un quemador de la biomasa se utilizó para suministrar calor cuando la energía solar no era posible. El calor de la combustión de leña se acumula en el sistema de almacenamiento térmico de ladrillos, y se utiliza para calentar el aire entrante. Los resultados mostraron que la hierba se secó de manera uniforme y la temperatura en el interior de la cámara de secado se podría mantener por encima de 50 °C durante más de 10 horas. La eficiencia térmica cuando se utiliza la energía solar fue de 10,5%, pero el valor era menor que 1% cuando se utiliza el calor de la combustión de biomasa.

El Centro para el Desarrollo Rural y la Tecnología en Nueva Delhi junto con el Instituto Indio de Tecnología, llevaron a cabo una investigación acerca del rendimiento de un sistema híbrido de energía solar y biomasa empleado para secado la planta medicinal, *Cúrcuma longa* L originaria del continente asiático [18]. El sistema es capaz de generar un adecuado y continuo flujo de aire caliente a temperatura entre 55 y 60 °C. El análisis cuantitativo mostró que el secado al sol abierto tomó 11 días para secar los rizomas, mientras que el secador híbrido solo necesitó 1,5 días y produce productos de mejor calidad. La eficiencia de todo el sistema fue 28,57%.

Hace algunos años en Colombia han empleado sistemas híbridos para el secado de sus cultivos agrícolas y flora. En el año 2012 investigadores de la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Kassel en Alemania diseñaron un secador tipo túnel solar-biomasa para secado de *Mentha Spicata*. Este sistema se diseñó teniendo en cuenta el problema de las diferentes condiciones climáticas. El secador fue diseñado para 24 horas de operación, la energía térmica fue obtenida de la radiación solar durante el día y de la biomasa durante la noche, el área

total del colector solar fue de 16 m² y el área de secado de 20 m². La capacidad del secador es de 2 a 5 Kg.m⁻² dependiendo del producto a secar. El secador opera en una granja cerca de Bogotá, Colombia. La radiación media varía entre 300 y 900 W.m⁻² entre las 9:00 A. M. y las 5:00 p. M. Cáscaras de café se utilizaron como fuente de biomasa. El consumo de energía de la secadora es de 240 W cuando se trabaja con el sistema solar y 260 W cuando funciona con biomasa [14].

En el departamento de Córdoba la Universidad Pontificia Bolivariana en conjunto de otras entidades diseñó y construyó un secador solar-híbrido para el secado de cascara y pulpa de naranja, la que al ser mezclada con maíz y soya produce un concentrado para animales a menor costo, con una tecnología limpia que no aumenta el efecto invernadero [15] (Universidad Pontificia Bolivariana (UPB)). El secador solar híbrido es un sistema diseñado para la captación, almacenamiento y aprovechamiento de la energía solar. Funciona con energía solar, aunque tiene el recurso de hacerlo también con gas propano para los casos extremos en que se acumulen muchos días sin la suficiente energía solar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de la humedad de la yuca: se determinó el porcentaje de humedad inicial de la yuca variedad venezolana, según el método AOAC 925.10 [16], por secado en estufa a 105 °C durante un tiempo de 8 horas como se nota en la Figura 1.

Curvas de tiempo de secado de la yuca, determinadas en el laboratorio: se realizaron las curvas de tiempo de secado a 50 y 70 °C, las que fueron las temperaturas usadas durante la fase experimental. Se tomaron 10 muestras de yuca variedad venezolana previamente pesadas, se introdujeron en una estufa marca Kasai ® y cada 15 minutos fueron retiradas y pesadas en una balanza digital ajustada. Una vez que la pérdida de masa de las muestras fue disminuyendo, el tiempo para sacar y pesar la muestra se aumentó a 30 minutos y posteriormente 1 hora. Este procedimiento se realizó hasta que las muestras alcanzaron un porcentaje de humedad del 12% como se nota en la Figura 2. Finalmente, con los datos de masa y tiempo obtenidos se graficó la humedad en base seca vs. tiempo para cada una de las temperaturas de secado.



Figura 1. Equipo de secado y balanza analítica para determinar humedad de la yuca.

Fuente: Autores (2015). Registro fotográfico.

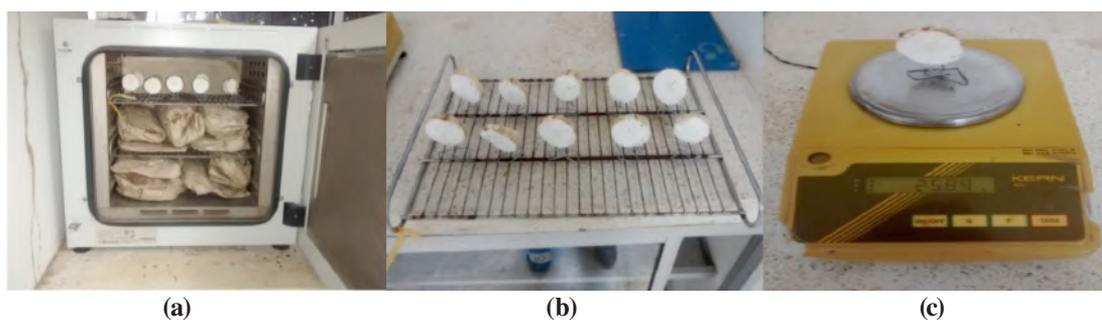


Figura 2. (a) Estufa, (b) Parilla con yuca, (c) Balanza.

Fuente: Autores (2015). Registro fotográfico.

Secado de yuca en modo de operación solar, híbrido y combustión de biomasa: las pruebas experimentales se realizaron con 5 kg de yuca variedad venezolana durante los meses de mayo y junio del año 2015. El sistema se operó de tres modos diferentes: solar, con combustión de biomasa e híbrido. El secado de la yuca en modo solar e híbrido se llevó a cabo entre las 10:00 A.M. y las 4:00 P.M., mientras que con combustión de biomasa las pruebas se realizaron en horas del día en las que la radiación solar era mínima o nula, entre 7:00 P.M. y 1:00 A.M.

La primera fase experimental se desarrolló en modo solar, para este caso no fue necesario utilizar el quemador de combustible sólido, así que se tuvo una conexión ventilador-colectores solares-secador como se puede observar en la Figura 3, además se definió la temperatura óptima del aire de secado como 50 °C. El secado de la yuca se llevó a cabo durante horas del día en que la temperatura del aire estuvo por encima de 45 °C, es decir, que para dar inicio al secado de la yuca era esencial que la temperatura del aire que llegaba al secador fuera mayor de 45 °C y una vez que se encontrara por

debajo de este valor el secado se detenía y la yuca era guardada en bolsas Ziploc para no permitir que absorbiera humedad del ambiente. Con lo anterior se mantuvo constante la temperatura del aire durante un mayor tiempo y de esta forma se garantizó un secado a temperatura homogénea, a las horas de operación se les denominó horas solares.



Figura 3. Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo solar.

Fuente: Autores (2015). Registro fotográfico.

La segunda fase experimental se realizó con el modo híbrido, en este caso el sistema estuvo compuesto por ventilador-colectores solares-quemador de cascarilla de arroz-secador según Figura 4. La temperatura del aire de secado se fijó como 70 °C. Para dar inicio al secado de la yuca, la primera ignición en el quemador se hizo de manera manual y posteriormente se proporcionó combustible controladamente de tal forma que la temperatura en el interior del secador se mantuviera alrededor de 70 °C. El suministro de la cascarilla también se hizo de forma manual con ayuda de unas bolsas Ziploc previamente pesadas con el fin de conocer la cantidad de cascarilla de arroz que se empleó durante todo el proceso.

La última fase de experimentación fue con el modo de combustión de biomasa, en el que se tuvo la misma configuración de los componentes que en el modo híbrido como se observa en la Figura 5, para este

modo de operación también se definió la temperatura del aire de secado en 70 °C, el combustible que se empleó fue cascarilla de arroz y la ignición inicial junto con el suministro de combustible se realizó manualmente.

Como parámetro de validación del sistema híbrido, se tomó el tiempo de secado de cada uno de los modos de operación del sistema y se comparó con el tiempo de secado obtenido en el laboratorio para temperaturas de 50 °C y 70 °C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentaje de humedad inicial por medio de una estufa de flujo estático en el laboratorio: El porcentaje de humedad inicial de la yuca variedad venezolana fue de $61,88\% \pm 1,03$ como se observa en las Tablas 1 a) y b).



Figura 4. Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo híbrido.

Fuente: Autores (2015). Registro fotográfico.



Figura 5. Sistema híbrido de calentamiento de aire en modo combustión de biomasa.

Fuente: Autores (2015). Registro fotográfico.

Tabla 1. a) Porcentaje de humedad inicial de la yuca variedad venezolana.

Hora	M1	M2	M3	M4	M5
09:45 A.M.	3,01	3,04	3,07	3,04	3,03
05:45 P.M.	1,14	1,21	1,16	1,12	1,11
%Hi	62,13	60,20	62,21	63,16	63,37
%Hi (promedio)	61,88				

Fuente: Autores (2015).

Tabla 1. b) Porcentaje de humedad inicial de la Yuca variedad Venezolana.

Hora	M6	M7	M8	M9	M10
09:45 A.M.	3,03	3,00	3,02	3,01	3,05
05:45 P.M.	1,18	1,13	1,19	1,16	1,15
%Hi	61,06	62,33	60,60	61,46	62,30
%Hi (promedio)	61,88				

Fuente: Autores (2015).

Y el tiempo promedio de secado requerido para llevar la yuca a un porcentaje de humedad del 12% a una temperatura de secado de 50 °C fue de $21,36 \text{ h} \pm 4,71 \text{ h}$. Como se nota en las Tablas 2 a) y b), los tiempos de secado de las muestras (M1, M2 y M7) se consideraron puntos estadísticamente no válidos para el análisis de los resultados.

Tabla 2. a) Masa final en (g) y tiempo de secado (min) de las muestras de yuca variedad venezolana a 50 °C.

%hi= 62%	M1	M2	M3	M4	M5
%hf= 12%					
Mi (g)	42,18	33,15	24,75	32,32	36,14
Mf (g)	18,21	14,31	10,69	13,96	15,61
Tsecado(h)	6,00	7,75	24,08	24,08	24,08
Tprom (h)	17,20				

Fuente: Autores (2015).

Tabla 2. b) Masa final en (g) y tiempo de secado (min) de las muestras de yuca variedad venezolana a 50 °C.

%hi= 62%	M6	M7	M8	M9	M10
%hf= 12%					
Mi (g)	33,78	47,70	34,38	35,01	26,21
Mf (g)	14,59	20,60	14,85	15,12	11,32
Tsecado(min)	24,08	10,83	24,08	13,08	16,08
Tprom (min)	17,63				

Fuente: Autores (2015).

La curva de tiempo de secado a 50 °C evidenció una velocidad de secado constante (rapidez de evaporación constante) hasta las 3 h, y una curva decreciente que se considera como el secado superficial no saturado donde la velocidad de evaporación del agua decrece con el tiempo hasta un valor asintótico en el que la película superficial del líquido se ha evaporado completamente como se nota en las Tablas 3 a) y b), y en la Figura 6.

Tabla 3. a) Masa final en (g) y tiempo de secado (min) de las muestras de yuca venezolana a 70 °C.

%hi= 62%	M1	M2	M3	M4	M5
%hf= 12%					
Mi (g)	23,42	22,00	17,90	24,01	31,50
Mf (g)	10,11	9,50	7,73	10,37	13,60
Tsecado(min)	985	955	975	970	960
Tprom (min)	971,5				

Fuente: Autores (2015).

Por su parte, la curva obtenida a temperatura de secado de 70 °C presentó una velocidad de secado

Tabla 3. b) Masa final en (g) y tiempo de secado (min) de las muestras de yuca venezolana a 70 °C.

%hi= 62%	M6	M7	M8	M9	M10
%hf= 12%					
Mi (g)	27,20	33,60	27,55	35,87	29,28
Mf (g)	11,75	14,51	11,90	15,49	12,64
Tsecado(h)	16,50	16,75	16,25	15,67	16,00
Tprom (h)	16,19				

Fuente: Autores (2015).

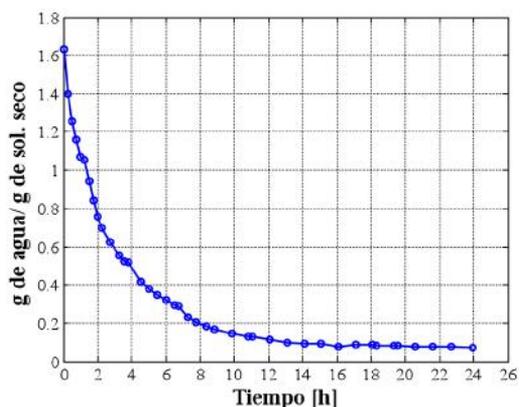


Figura 6. Curva de tiempo de secado a 50 °C con estufa de flujo estático.

Fuente: Autores (2015).

constante de aproximadamente 5 h y un período de velocidad de secado decreciente de casi 18 h, logrando tener un secado homogéneo, como se observa en la Figura 7.

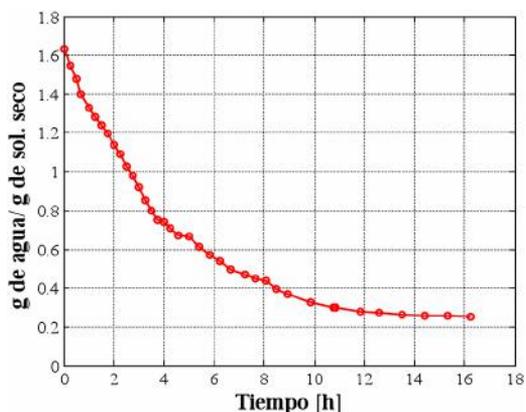


Figura 7. Curva de tiempo de secado a 70 °C con estufa de flujo estático.

Fuente: Autores (2015).

Secado de yuca con operación del equipo en modo solar:

El secado en este modo de operación se realizó en 6 días, para 5 kg de yuca variedad venezolana cuyo contenido de humedad inicial (hi) era de 62% y se llevó a una humedad final (hf) del 12%. En el tiempo de secado fue de 19 h y 15 min solares. La cantidad de agua retirada fue de 2,84 kg, obteniéndose una velocidad de secado de 0,147 kg de agua.h⁻¹. La temperatura en el interior del secador durante el secado, osciló entre 40 °C y 61 °C con un promedio de 47 ± 3,44 °C, teniendo una eficiencia de los colectores alrededor del 43,91%, el cual fue un valor mayor que el obtenido por [11] en el secado de cacahuates con cáscaras (23%) y por el componente solar con eficiencia térmica de 22% estudiado por [17]. Los días de secado necesarios por este modo de operación, concuerdan con los 5 días requeridos por [12] para el secado de piña fresca y es un menor tiempo respecto a los 11 días necesarios para el secado al sol abierto de plantas medicinales originarias del continente asiático realizado por [18].

La curva de tiempo de secado obtenida para este modo de operación fue una línea casi recta con pendiente negativa como se observa en la Figura 8 a 50 °C, solo cuenta con uno de los dos periodos de velocidades de secado comunes en los productos agrícolas, el período de velocidad de secado constante; el período de velocidad de secado decreciente no se alcanzó una vez que el contenido de humedad de la yuca llegó al 12%. El tiempo de secado tuvo un aumento de 1 h y 50 min en comparación al tiempo

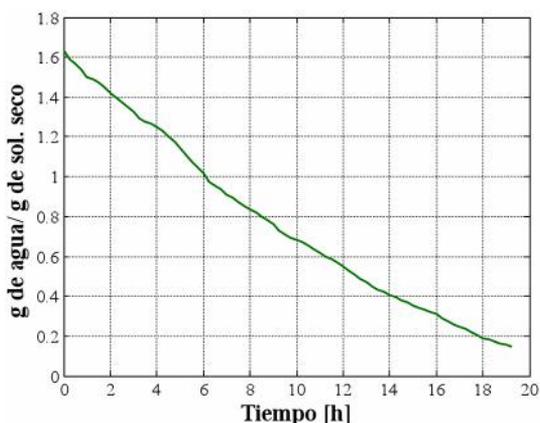


Figura 8. Curva de tiempo de secado modo solar. Fuente: Autores (2015).

que se alcanzó en el laboratorio (aproximadamente 17 h y 25 min).

La yuca después del secado presentó una textura y apariencia agradable al ojo humano ya que se mantuvo limpia en comparación con la yuca secada con los otros modos de operación del equipo.

Secado de yuca con operación del equipo en modo híbrido:

Para este modo de operación se secaron 5 kg de yuca variedad venezolana con una humedad inicial del 62%, picada en trozos distribuidos en un área de 0,15 m², hasta llevarla a una humedad del 12%. El tiempo de secado fue de 16 horas y 45 minutos distribuidos en 3 días de funcionamiento del sistema híbrido, obteniendo una velocidad de secado de 0,169 kg.h⁻¹ y un consumo de cascarilla de arroz de 4,5 kg/ kg de yuca húmeda. La temperatura del aire al interior del secador varió entre 36 °C y 97 °C con un promedio de 57 ± 11,55 °C, teniendo una eficiencia del componente solar de 43,91% y una eficiencia térmica del quemador de alrededor del 36,72%, para tener una eficiencia del sistema de 16,12%. La eficiencia del quemador fue próxima a la obtenida por [12] en su secado de cacahuates con cáscaras (40%) y mayor que la eficiencia térmica del quemador (27%) usado por [17]. Por otra parte, los días de secado requeridos en este modo de operación fue mayor que los 1,5 días requeridos para el secado realizado por [18] con un secador híbrido capaz de generar un flujo continuo de aire caliente a temperatura entre 55 °C y 60 °C con una eficiencia de todo el sistema de 28,57%.

La curva de tiempo de secado muestra la pérdida de masa conforme pasa el tiempo, obteniendo aproximadamente una línea recta con pendiente negativa como se nota en la Figura 9 a 70°C, solo presentó el período de velocidad de secado constante; el período de velocidad de secado decreciente no se alcanzó, a pesar de llevar el contenido de humedad de la yuca hasta el 12%.

La textura de la yuca obtenida después del secado fue agradable. Sin embargo, se observó un color amarillento en comparación a la yuca obtenida en el modo solar, esto debido al aumento de temperatura en el aire de secado.

Secado de yuca con operación del equipo en modo combustión de biomasa:

El tiempo de

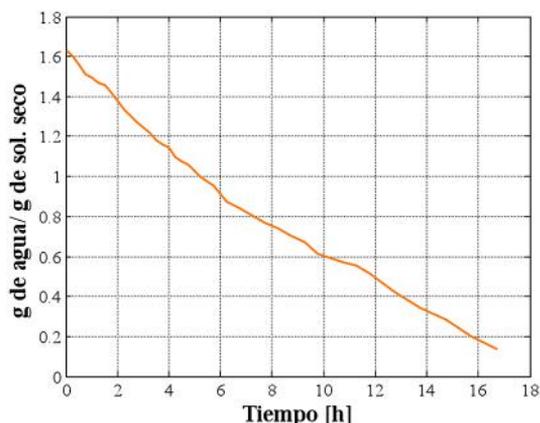


Figura 9. Curva de tiempo de secado modo híbrido. Fuente: Autores (2015).

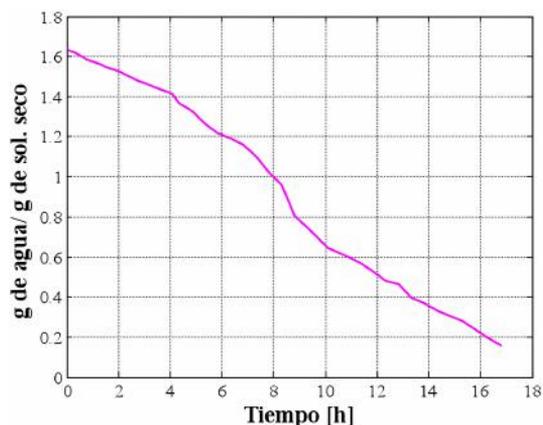


Figura 10. Curva de tiempo de secado modo combustión de biomasa. Fuente: Autores (2015).

secado obtenido para este modo fue de 16 h y 50 min distribuidos en 3 días de funcionamiento del sistema, aproximadamente igual al tiempo de secado que se tuvo con el modo híbrido (16 horas y 45 minutos), teniendo de esta forma velocidades de secado equivalentes ($0,169 \text{ kg de agua.h}^{-1}$), ya que la temperatura de secado fue la misma en ambos casos. Las diferencias que presentaron estos dos modos de operación fue el consumo de combustible, siendo mayor el del modo combustión de biomasa el que presentó un consumo de 7,56 kg de cascarilla de arroz/ kg de yuca humedad. El flujo de combustible en modo híbrido fue de $1,34 \text{ kg de cascarilla.h}^{-1}$ y para el modo de combustión de biomasa fue de $2,24 \text{ kg de cascarilla.h}^{-1}$. En este caso, la temperatura del aire al interior del secador varió entre 27 °C y 98 °C con un promedio de $52 \pm 15,09 \text{ °C}$, con una eficiencia térmica del quemador y del sistema de 28,18%. Dicha eficiencia fue menor que la obtenida por [12] y aproximadamente igual a la eficiencia del sistema híbrido estudiado por [18].

La curva de tiempo de secado obtenida para este modo fue una línea irregular con pendiente negativa durante todo el tiempo de funcionamiento del sistema, lo que quiere decir que en el secado realizado solo estuvo presente el período de velocidad de secado constante. El tiempo de secado, comparado con el tiempo obtenido en el laboratorio a 70 °C como se observa en la Figura 10, presentó un aumento de 38 min, esto es un desfase aceptable teniendo en cuenta que la temperatura de secado presentó variaciones a lo largo del tiempo que tardó el proceso de secado.

El producto obtenido después del secado presentó en su superficie una suciedad propia de los gases de combustión generados durante el secado. Este resultado se comparó con la yuca secada anteriormente logrando percibir un color más oscuro para el producto obtenido en el modo combustión de biomasa, seguido por los modos híbridos y solar, respectivamente.

CONCLUSIONES

Bajo las mismas condiciones de flujo de aire el tiempo de secado de la yuca variedad venezolana, disminuye en un 32% cuando se aumenta su temperatura de secado de 50 °C a 70 °C .

Las curvas de tiempo de secado obtenidas en el laboratorio a 50 °C y 70 °C evidenciaron una velocidad de secado constante hasta 3 y 5 horas respectivamente, posterior a este tiempo las curvas presentaron una velocidad de secado decreciente.

El tiempo de secado para el modo solar fue de 19 h y 15 min, es decir, se aumentó el tiempo de secado en 1 h y 50 min en comparación al tiempo que se alcanzó en el laboratorio (aproximadamente 17 h y 25 min).

El tiempo de secado para los modos de operación híbrido y biomasa fueron aproximadamente iguales (16 h y 50 min), los que presentaron un aumento de 38 min comparado con el tiempo obtenido en el laboratorio a 70 °C (16 h y 12 min).

Las eficiencias de los colectores solares en los modos de operación solar e híbrido fueron aproximadamente iguales (43,91%). Mientras que para el quemador de cascarilla de arroz la eficiencia en los modos de operación híbrido y combustión de biomasa fueron de 28,18% y 36,72%, respectivamente.

Las temperaturas alcanzadas en el interior del secador en modo solar fueron menores ($47 \pm 3,44$ °C) que en los modos de combustión de biomasa e híbrido ($52 \pm 15,09$ °C y $57 \pm 11,55$ °C respectivamente); sin embargo, dicha temperatura presentó una mayor estabilidad durante el tiempo de secado en comparación las otras dos.

Las velocidades de secado obtenidas durante la experimentación fueron similares para el modo híbrido y de combustión de biomasa (0,170 y 0,169 kg de agua.h⁻¹, respectivamente) mientras que para el modo solar se tuvo una velocidad de secado menor (0,147 kg de agua.h⁻¹).

La yuca secada en modo solar tuvo una mejor apariencia que la yuca obtenida en los otros dos modos de operación, ya que presentó una mejor textura y menores suciedades en su superficie sin embargo, para este modo fueron necesarios más días de trabajo.

El modo de operación solar es el más económico puesto que no requiere uso de combustible; sin embargo; cuando el equipo operó en este modo fueron necesarias 19,25 horas solares que se reflejaron en 6 días de trabajo, mientras que con los otros dos modos se necesitó menos tiempo para el secado distribuidos en 3 días.

El secado de yuca variedad venezolana en modo híbrido es una mejor opción que en modo combustión de biomasa, ya que el tiempo de secado es aproximadamente igual presentando un menor consumo de cascarilla de arroz.

La eficiencia de los colectores fue de 43,91%, del sistema híbrido en modo solar de 28,57% y en el sistema híbrido en modo combustión de biomasa la eficiencia térmica del quemador y del sistema fue de 28,18%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad

Pontificia Bolivariana Montería, y al aporte de recursos del Convenio 753 de 2013 “Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe”, BPIN N° 2012000100026.

REFERENCIAS

- [1] G. Pirasteh, R. Saidur, S.M.A. Rahman and N.A. Rahim. “A review on development of solar drying applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 31, pp. 133-148. 2014. ISSN: 1364-0321 DOI: org/10.1016/j.rser.2013.11.052.
- [2] A.R. Celma and F. Cuadros. “Energy and exergy analyses of OMW solar drying process”. *Renewable Energy*. Vol. 34 N° 3, pp. 660-666. March, 2009. ISSN: 0960-1481. DOI: 10.1016/j.renene. 2008.05.019.
- [3] I. Montero. “Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos”. Tesis para optar al grado de doctor. Universidad de Extremadura. Escuela de Ingenierías Industriales, pp. 223-231. Fecha: Noviembre 2005. URL: <http://dehesa.unex.es/xmlui/handle/10662/393>
- [4] A.S. Mujumdar. *Handbook of industrial drying*. CRC Press. Fourth Ed. pp. 4-7 Boca Raton, Florida, USA. ISBN: 9781466596658. 2015.
- [5] A.M. Torregróza. “Determinación de la influencia de la temperatura y velocidad del aire sobre las cinéticas de secado de tres variedades de yuca procesadas en la planta instalada en la Vereda los Algarrobos”, pp. 45-87. 2013. Universidad de Córdoba. Facultad de Ingenierías. Maestría en Ciencias Agroalimentarias. Berastegui, Córdoba, Colombia. Fecha de consulta: 5/07/2016. URL: http://www.unicordoba.edu.co/oldfiles/6_DETERMINACION%20DE%20LA%20INFLUENCIA%20DE%20LA%20TEMPERATURA%20Y%20VELOCIDAD%20DEL%20AIRE%20SOBRE%20LAS%20CINETICAS%20DE%20SECA%20DE%20TRES%20VARIETADES%20DE%20YUCA%20PROCESADAS%20EN%20LA%20PLANTA%20INSTALADA%20EN%20LA%20VEREDA%20LOS%20ALGARROBOS.pdf

- [6] O.V. Ekechukwu. "Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory". *Energy Conversion and Management*. Vol. 40 N° 6, pp. 593-613. April 1999. ISSN: 0196-8904. DOI: [org/10.1016/S0196-8904\(98\)00092-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00092-2).
- [7] J. Fuentes, I. Hernández y F. Pérez. "Secado de yuca con energía solar y otras fuentes de calor por convección forzada". Universidad de Sucre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola. 2008.
- [8] A.A. El-Sebaili and S.M. Shalaby. "Solar drying of agricultural products: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 16 N° 1, pp. 37-43. January, 2012. ISSN: 1364-0321. DOI: [org/10.1016/j.rser.2011.07.134](https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134).
- [9] M. Kumar, S.K. Sansaniwal and P. Khatak. "Progress in solar dryers for drying various commodities". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 55, pp. 346-360. March, 2016. ISSN: 1364-032. DOI: [org/10.1016/j.rser.2015.10.158](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158).
- [10] A. Ayensu. "Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow". *Solar Energy*. Vol. 59 Issue: 4-6, pp. 121-126. April-June, 1997. ISSN: 0038-092X. DOI: [org/10.1016/S0038-092X\(96\)00130-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00130-2).
- [11] E. Tarigan and P. Tekasakul. "A mixed-mode natural convection solar dryer with biomass burner and heat storage back-up heater". Australia and New Zealand Solar Energy Society Annual Conference 2005, pp. 1-9. Dunedin. New Zealand. November 2005.
- [12] A. Madhlopa and G. Ngwalo. "Convective solar dryer with a wood waste backup heater for dehydration of food", pp. 1-28. Fecha 07/07/2016. URL: <http://www.eldis.org/vfile/upload/1/document/1009/Convective%20solar%20dryer.pdf>
- [13] P. Kirirat, G. Prateepchaikul, J. Navasut, N.N. Nakorn and P. Tekasakul. "Drying of *Rhinacanthus nasutus* (Linn.) Kurz. using a solar dryer incorporated with a backup thermal energy storage from wood combustion". *Songklanakarin J.Sci.Technol*. Vol. 28 N° 3, pp. 563-573. May, 2006. ISSN: 01253395.
- [14] S. Rincon, P. Cuervo and O. Hensel. "Drying of *Mentha spicata* in a Dual Solar-Biomass Tunnel Dryer in Colombia", pp. 1. 2012. Fecha 07/07/2016. URL: http://www.tropentag.de/2012/abstracts/links/Rincon_NdP0zd01.pdf
- [15] A.C. Uribe, Alimento para animales desde un secador solar. *Revista Universitaria Científica UPB*. 13(1). pp 12-1. Noviembre 2010. ISSN: 1692-0155.
- [16] AOAC. "Métodos de análisis de la asociación oficial de química analítica para determinar humedad, fibra, cenizas, grasa y proteína". Washington, USA, Chapter 32, pp. 1, 2, 5 y 14. 2003.
- [17] B. Bena and R.J. Fuller. "Natural convection solar dryer with biomass back-up heater". *Solar Energy*. Vol. 72 N° 1, pp. 75-83. January, 2002. ISSN: 0038-092X. DOI: [org/10.1016/S0038-092X\(01\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00095-0)
- [18] J. Prasad, V.K. Vijay, G.N. Tiwari and V.P.S. Sorayan. "Study on performance evaluation of hybrid drier for turmeric (*Curcuma longa* L.) drying at village scale". *Journal of Food Engineering*. Vol. 75 N° 4, pp. 497-502. 2006. ISSN: 0260-8774 DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2005.04.061](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.061).