

Evaluación del secado de la *Musa Paradisiaca* (plátano) utilizando el aparato de laboratorio SBAN

Evaluation of the drying of the Paradisiacal Muse (banana) using the laboratory apparatus SBAN

Lic. Mary Carmen Figueredo-Rondón^I ricardogonzalez@reduc.edu.cu,
Dr. Ricardo Roberto González-Gutiérrez^{II}

^IUniversidad Politécnica Territorial José Antonio Anzoátegui. El Tigre, Edo Anzoátegui. Venezuela;

^{II}Universidad de Camagüey Ignacio Agramonte Loynaz, Camagüey, Cuba

Resumen

En este trabajo se evalúa el secado de la *Musa Paradisiaca* (plátano) [1] utilizando el aparato de laboratorio SBAN ubicado en el Universidad Politécnica Territorial José Antonio Anzoátegui (UPTJAA), El Tigre, Edo. Anzoátegui, Venezuela. Se logró la puesta en marcha del secador de bandeja (SBAN) operando de manera discontinua mediante secado directo en un flujo axial desde el ambiente hasta 96°C y con un control de velocidad del aire caliente de 0m/s a 9,1m/s. El proceso de secado del plátano con un espesor de 0,002m, temperatura de 50°C a velocidad de 9,1m/s, en el primer periodo de secado presentó una pérdida de humedad de 0,516 kg de agua /kg de sólido seco en un tiempo anticrítico de 1,34h (4824s) hasta llegar al punto crítico de 0,558 kg de agua/kg de sólido seco, en el segundo periodo de secado de 1,667h(6001,2s) la velocidad decrece perdiendo un contenido de humedad de 0,473kg de agua /kg de sólido seco hasta alcanzar la humedad de equilibrio de 0,053 kg de agua/ kg de sólido seco. En la curva experimental de la velocidad en función de la humedad libre alcanza una humedad final de 6,3%. Estos estudios experimentales a escala de laboratorio permitieron seleccionar un equipo de secado modelo Re-g1 con capacidad de cada lote 60kg, fuente de energía 9 kW, número de bandejas 24 y de dimensiones 1,38m x1,2m x 2m para una planta piloto, con un costo de 2.145.922,75 Bolívares Fuertes.

Palabras clave: secado, plátano, aparato de laboratorio SBAN.

Abstract

This work evaluates the drying of the Paradisiacal Muse (banana) [1] using the laboratory apparatus SBAN located in the Territorial Polytechnic University José Antonio Anzoátegui (UPTJAA), The Tiger, Edo. Anzoátegui, Venezuela. The setting is achieved in march of the tray

dryer (SBAN) operating in a discontinuous way by means of direct drying in an axial flow from the atmosphere up to 96°C and with a control of speed of the hot air of 0 m/s at 9,1m/s. The process of drying of the banana with a thickness of 0,002m temperature of 50°C to speed of 9,1m/s, in the first period of drying presented a loss of humidity 0,516 kg of water/kg of dry solid at one time anticrítico of 1,34h (4824s) until arriving to the critical point of 0,558 kg of water/kg of dry solid in the second period of drying of 1,667h (6001,2s) the speed falls losing a content of humidity of 0,473 kg of water /kg of dry solid until reaching the humidity balance of 0,053 kg of water /kg of dry solid. In the experimental curve of the speed in function of the free humidity reaches a final humidity of 6, 3%. These experimental studies to laboratory scale allowed to select a team of model drying Re-g1 with capacity of each lot 60kg, energy source 9 kW, number of trays 24 and of dimensions 1,38mx1,2mx2m for a plant pilot, with a cost of 2.145.922,75 Strong Bolivars.

Keywords: drying, banana, laboratory apparatus SBAN.

Introducción

En el presente trabajo se evalúa la etapa de secado a través del estudio de proceso de secado del plátano utilizando el equipo secador de bandeja SBAN ubicado en el Laboratorio de Procesos de la Universidad Politécnica Territorial “José Antonio Anzoátegui”, El Tigre, Venezuela para posteriormente proponer un secador a escala industrial.

Existen varios tipos de secadores [2] que fueron estudiados en este trabajo. Este equipo de secado (SBAN) fue diseñado para estudiar problemas de mecánica de fluidos, química de superficies, estructuras de sólidos y balance de materia y energía [3], asociados con el comportamiento general del secado [4]. Además, brinda la posibilidad de estudiar los parámetros que influyen en el secado[5,6,7,8], como: obtención de curvas de secado, influencia de tamaño de partícula, influencia de la velocidad del aire, influencia de la temperatura del aire, utilización de cartas psicométricas, balance de masa, energía y por último test de secado de sólidos para uso industrial.

Fundamentación teórica

El secado de materiales sólidos [9] consiste generalmente en la separación del líquido de un sólido por evaporización. Este proceso es efectuado mediante métodos mecánicos, aunque se emplean métodos naturales, ya que son menos costosos y mucho más sencillo de emplear. El secado es un proceso de eliminación de humedad para obtener un producto sólido y seco. La humedad se presenta como una solución líquida dentro de la micro estructura del sólido.

Cuando un sólido húmedo es sometido a secado térmico, dos procesos ocurrirán simultáneamente:

Habrà transferencia de energía (comúnmente como calor) de los alrededores para evaporar la humedad de la superficie.

Habrà transferencia de la humedad interna hacia la superficie del sólido.

Ambos procesos son factores determinantes en la velocidad de secado del sólido. La transferencia de energía en forma de calor, de los alrededores hacia el sólido húmedo, puede ocurrir como resultado de convección, conducción y/o radiación y en algunos casos se puede presentar una combinación de estos efectos [10].

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Los métodos de investigación utilizados fueron; el documental y el experimental.

La investigación documental [11] es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas

Para cumplir con los objetivos planteados en esta investigación se requirió de la recopilación de material documental para desarrollar el tema y fue necesaria la documentación profunda de las características del equipo SBAN para su puesta en marcha.

El diseño de investigación experimental [12] es aquel según el cual el investigador manipula una variable experimental no comprobada, bajo condiciones estrictamente controladas. Su objetivo es describir de qué modo y causa se produce o puede producirse un fenómeno. Busca predecir el futuro, elaborar pronósticos que una vez confirmados, se convierten en leyes y generalizaciones tendentes a incrementar el cúmulo de conocimientos pedagógicos y el mejoramiento de la acción educativa

Esta investigación fue complementada con un diseño experimental que permitió, a través de ensayos experimentales, identificar las causas de inoperatividad del equipo SBAN, ya que hace varios años que este no funcionaba, la verificación de la puesta en marcha y la validación de su funcionamiento (Secador de Bandeja). Con el uso de arena se obtuvieron resultados satisfactorios [9] que permitieron realizar la evaluación del secado de plátano y la propuesta de un secador industrial.

Parte experimental

El equipo de secado SBAN [9,13] está formado básicamente por: Túnel de acero inoxidable, ventilador axial, resistencias de calentamiento, sistema de control, bandejas de secado, célula de carga, anemómetro y depósito generador de vapor.

El ventilador de flujo axial está situado a la entrada del túnel de secado, este introduce aire previamente humedecido proveniente del depósito generador de vapor en el túnel de secado. El anemómetro permite medir la velocidad del aire. Las resistencias, situadas a continuación del ventilador, previo a la entrada del túnel de secado, permiten el calentamiento del aire y la regulación de la temperatura.

El equipo dispone de tres higrómetros que nos permite determinar las exigencias de humedad y temperatura óptimas para el proceso de secado. Estos higrómetros están constituidos por dos sensores de temperatura, uno de

ellos envuelto en una funda absorbente (bulbo húmedo) y otro (bulbo seco) está directamente colocado en el túnel. Sus medidas junto con la utilización de un diagrama psicométrico permite conocer el grado de humedad, entalpia y otros parámetros [4].

En las bandejas de secado se colocan los sólidos mojados para su posterior desecación.

En la tabla 1 se muestran las características de la operación del equipo [14].

Tabla 1
Características de Operación del Secador de Bandejas

Equipo	SECADOR DE BANDEJAS
Tipo de operación	Operación discontinua por contacto directo
Tipo de calentamiento	Convección forzada
Voltaje de operación	220 V
Temperatura de operación	Temperatura ambiente
Presión de operación	$1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$

Dentro de los servicios requeridos está el suministro eléctrico monofásico 20V, 50Hz y 9 kW de dimensiones y peso son: Dimensiones del equipo 0,20mx0,32mx0,40m ,volumen del embarque de $1,5\text{m}^3$, peso neto de 190 kg, peso bruto es de 230 kg, el peso de las bandejas es de 0,3 kg y cuatro bandejas de 0,33mx0,25mx0,025m cada una.

Los componentes presentes son: célula de carga con *display*, sondas Pt100 con tres bulbos húmedos, depósito de vapor. El sistema mecánico de control de nivel de agua en el depósito se realiza mediante una boya que abre o cierra la entrada y válvula de seguridad. El depósito dispone de una tapa que no conviene abrir (sólo abrir en caso de reparación); dos válvulas, una de salida en la parte inferior y otra de entrada en la parte superior. La válvula de entrada es de flotador, de modo que esta corta el flujo de agua al depósito cuando este se llena. Si cuando comienza a producir vapor no hay nada conectado a esta válvula, conviene hacerlo como por ejemplo con un tapón suministrado o similar: Dos tomas superiores son las salidas de vapor que a través de unos tubos de goma llegarán al bastidor del equipo; panel de control de temperatura, peso y velocidad del ventilador.

Principios de funcionamiento [9,13]

El funcionamiento satisfactorio del secador de bandeja depende del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo en el material que se esté secando.

La circulación de aire comprende velocidades entre 0 y 9,1 m/s para mejorar el coeficiente de transferencia de calor en la superficie y evitar la formación de bolsas de aire estancada. El medio de calentamiento usual es vapor o aire caliente generado eléctricamente, trabajando con una temperatura máxima de 100 °C.

Este secador es de tipo bandejas estacionarias y se carga sobre bastidores fijo dentro del secador.

Existen sondas de temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo en varios puntos del secador y ésta se leen en el display del panel de control. Además en este panel también se controla la temperatura deseada, se controla la velocidad del ventilador y muestra el peso del material húmedo.

Para verificar la puesta en marcha se realizó un ensayo cualitativo de secado para observar el comportamiento del equipo y con estas condiciones se logró trazar el diagrama de flujo del proceso de secado en el secador de bandejas modelo SBAN que se puede observar en la figura 1.



Fig.1 Diagrama de flujo para el funcionamiento del secador de bandeja Edibon, Modelo SBAN.

Se garantizaron todos los elementos que necesitaba la instalación de secado y se realizó la puesta en marcha y su funcionamiento con la validación satisfactoria usando arena, reflejados en el trabajo investigativo [9].

Las ecuaciones de secado usadas son:

Considerando las ecuaciones (1) y (2) se calcula la humedad y la humedad libre del material para luego graficar contenido de humedad libre (X_{libre}) vs tiempo.

$$X = (W - W_c) / W_c \quad (1)$$

$$X_{\text{libre}} = X - X^* \quad (2)$$

Velocidad media de secado vs contenido de humedad media se obtiene utilizando la ecuación (3).

$$W = - (S \, dX) / A \, d\theta \quad (3)$$

El tiempo de secado se calcula utilizando la ecuación (4) para el período anticrítico y la ecuación (5) para el período postcrítico.

$$\Theta_a = S (X_i - X_c) / A W_c \quad (4)$$

$$\Theta_p = S (X_c - X_f) \ln(W_c / W_f) / A (W_c - W_f) \quad (5)$$

donde:

X: Humedad (kg de agua /kg de sólido seco),

W: Velocidad media de secado (kg/h.m²)

W_C: Velocidad crítica de secado (kg/h.m²)

X_{libre}: Humedad final (kg de agua /kg de sólido seco),

X*: Humedad de equilibrio (kg de agua /kg de sólido seco),

S: Masa de sólido seco (kg),

dX: Diferencial humedad (kg de agua /kg de sólido seco),

A Área de secado (m²)

dθ. Diferencial del tiempo de secado (h)

Θ_a: Tiempo de secado anticrítico (h)

Θ_p: Tiempo de secado postcrítico (h)

X_i: Humedad inicial (kg de agua /kg de sólido seco),

X_C: Humedad crítica (kg de agua /kg de sólido seco),

X_f: Humedad final (kg de agua /kg de sólido seco),

W_f Velocidad final de secado (kg/h.m²)

A continuación, se muestran los parámetros experimentales obtenidos en dicho proceso utilizando plátano.

Resultados y discusión

Determinación experimental del secado del plátano empleando el secadero SBAN [9,13]

Para estudiar el proceso de secado del plátano se utilizan materiales en estado fresco y en buenas condiciones obtenidas en la ciudad de El Tigre, Venezuela. Se considera trabajar con muestras de forma en rebanadas de un espesor de 0,002m. El procedimiento para determinar la pérdida de humedad durante el proceso de secado es el siguiente:

Las muestras de plátano a secar se cortan en forma de rebanadas con dimensiones 0,002mx0,039mx0,040m y se colocan en las cuatro bandejas de tal manera que solo queda expuesta a la corriente de aire caliente la superficie superior de la materia prima,

Se determina el área de la superficie expuesta de 0,4322 m².

Se pesan las bandejas vacías y luego se rellenan con rebanadas de plátano.

Se ajusta la potencia de las resistencias para conseguir una temperatura de aproximadamente 50°C a la salida, luego se conecta el ventilador regulando la velocidad a 1m/s.

Se introducen las bandejas en el equipo donde se obtiene el peso total de las muestras en el panel de control mostrando 0,223 kg.

Manteniendo la temperatura del bastidor (50°C) y la velocidad del ventilador constante se realizan las mediciones de las variables como la temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco y la masa total de los materiales en intervalos equidistantes de tiempo de 10min (600s).

Luego se trazan las gráficas contenido de humedad libre(X_{libre}) vs tiempo utilizando las ecuaciones (2), (4) y (5), La velocidad de secado versus contenido

de humedad para cada una de las velocidades empleadas se obtiene utilizando la ecuación (3). Ver figuras 2 y 3

Los datos experimentales del proceso de secado del plátano a 50°C, velocidad del aire 9,1m/s y los valores calculados para los demás puntos se indican en las últimas columnas de la tabla 2.

Tabla 2
Datos experimentales de secado del plátano a una temperatura de 50°C, velocidad de aire 9,1 m/s

Nº	Tiempo (h)	X (kg de agua/kg de sólido seco)	X _{libre} (kg de agua/kg de sólido seco)	W (kg/h.m ²)	Nº	Tiempo (h)	X (kg de agua/kg de sólido seco)	X _{libre} (kg de agua/kg de sólido seco)	W (kg/h.m ²)
1	0	1,3474	1,2947	0,18	11	0,82	0,7474	0,7474	0,14
2	0,07	1,3053	1,2526	0,18	12	0,9	0,6737	0,6737	0,13
3	0,15	1,2421	1,1895	0,17	13	0,98	0,6211	0,6211	0,13
4	0,23	1,2000	1,1474	0,17	14	1,07	0,5579	0,5579	0,12
5	0,32	1,1263	1,0737	0,16	15	1,15	0,5158	0,5158	0,12
6	0,4	1,0842	1,0316	0,16	16	1,23	0,4842	0,4842	0,11
7	0,48	1,0105	0,9579	0,16	17	1,32	0,4211	0,4211	0,11
8	0,57	0,9474	0,8947	0,15	18	1,40	0,3895	0,3895	0,10
9	0,65	0,9053	0,8526	0,15	19	1,48	0,3684	0,3684	0,10
10	0,73	0,8316	0,7789	0,14	20	1,57	0,3158	0,3158	0,09

Con estos datos experimentales y sus cálculos respectivos se representa la curva del plátano de la humedad libre frente al tiempo de secado en la figura 2 y la velocidad de secado versus humedad libre en la figura 3.

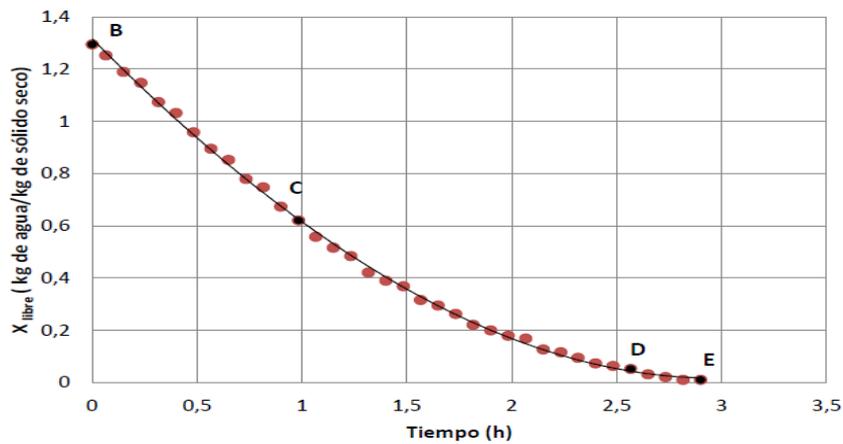


Fig. 2 Curva experimental para el proceso de secado de plátano a la $v=9,1\text{m/s}$.

La curva de secado de la figura 2 es obtenida a 50°C y velocidad del aire constante de $9,1\text{m/s}$. Durante el periodo BC presenta una pérdida de humedad $0,516\text{ kg de agua/kg de sólido seco}$ en un tiempo anticrítico de $1,34\text{h}$ (4824s) hasta llegar al punto crítico de $0,558\text{ kg de agua/kg de sólido seco}$. Luego en el periodo de secado de $1,667\text{h}$ ($6001,2\text{s}$) la velocidad decrece perdiendo un contenido de humedad de $0,473\text{ kg de agua /kg de sólido seco}$ hasta alcanzar la humedad de equilibrio de $0,053\text{ kg de agua kg de solido seco}$ en E.

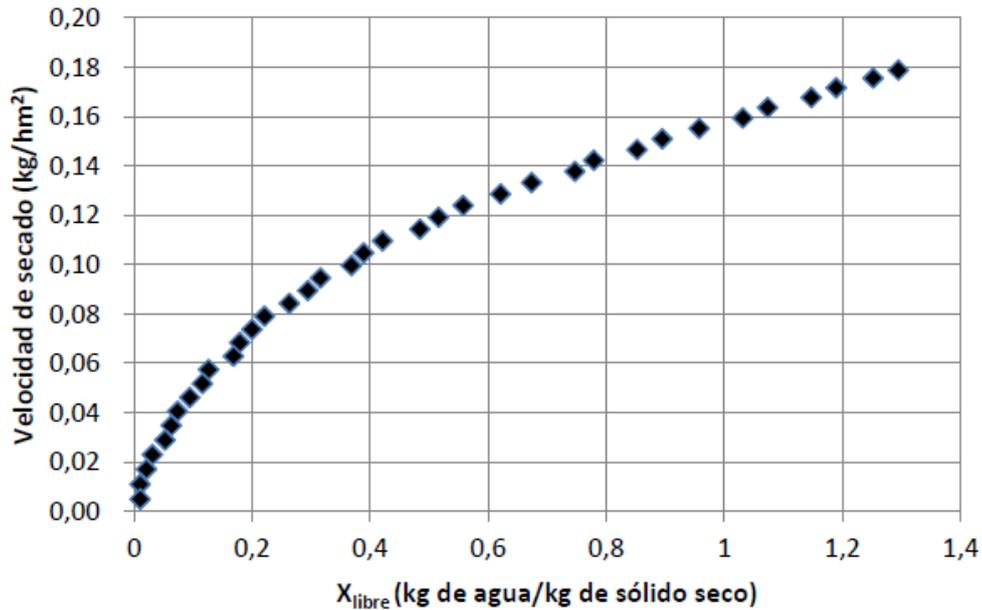


Fig.3 Velocidad de secado versus humedad libre del plátano para una velocidad de aire caliente de 1m/s.

Se puede apreciar que el plátano comienza a perder humedad desde el inicio de la operación del secado, es decir, no presenta el periodo A-B que es un periodo de latencia. Esto significa que el plátano, al ser introducido a la célula de carga, se encuentra a la temperatura requerida de 50°C. Luego se presentan dos periodos de velocidad decreciente llegando a una humedad final de 6,3 %. Los estudios realizados en el periodo anticrítico demuestran que las rodajas de plátano pierden mayor cantidad de humedad que en el periodo postcrítico.

Selección del secador a escala piloto

Para seleccionar el secador, se parte de un proceso de escalado [15] del laboratorio a planta piloto. Para este tipo de equipo se toma el factor de escala en un rango de 5 a 15.

En este trabajo se toma el valor mínimo y máximo de este criterio para seleccionar el equipo que comprenda este rango de criterio y garantice el proceso de secado más adecuado y al menor costo posible.

Partiendo de este criterio de escalado, y teniendo en cuenta los estudios a escala de laboratorio, se considera que el área de la superficie total de las bandejas del equipo SBAN es de $0,33\text{m}^2$. Con esta capacidad en área se deduce que debe seleccionarse un secador con una capacidad de área mínima de $1,65\text{m}^2$ y máxima de $4,95\text{m}^2$.

Se selecciona el equipo por internet. Este equipo trabaja con una capacidad en área mínima de $0,29\text{m}^2$ y máximo de $7,06\text{m}^2$, área que se distribuye en las 24 bandejas de dimensiones $0,64\text{m} \times 0,46\text{m} \times 0,045\text{m}$. Además, dicho equipo trabaja con aire caliente ajustable. Los materiales pueden ser secados de manera uniforme. La fuente de calefacción es la electricidad y vapor de agua, la temperatura permitida con este secador de frutas y vegetales está en un rango de 50°C - 140°C y el sistema de control es automático.

Se selecciona el secador modelo [16].Re-g1 con capacidad de cada lote 60kg, fuente de energía 9 kW número de bandejas 24 y las dimensiones del secador son: $1,38\text{m} \times 1,20\text{m} \times 2,00\text{m}$, con un costo de 2.145,922,75 Bolívares Fuertes.

Conclusiones

- 1. El proceso de secado del plátano a un espesor de 0,002m, temperatura de 50°C a velocidad de 9,1m/s, muestra una pérdida de humedad 0,516 kg de agua/kg de sólido seco en un tiempo anticrítico de 1,34h (4824s) hasta alcanzar la humedad de equilibrio de 0,053 kg de agua/kg de sólido seco .***
- 2. Los estudios experimentales de secado a escala de laboratorio establecieron los criterios para seleccionar un equipo de secador***

modelo Re-g1 con capacidad de cada lote 60kg, fuente de energía 9 kW, número de bandejas 24 y las dimensiones del secador es 1,38mx1,2mx2m, con un costo de 2.145.922,75 Bolívares Fuertes.

3. El equipo de secado de SBAN se puede utilizar para realizar investigaciones futuras y para fines docentes.

Bibliografía

1. CARRANZA, J; SÁNCHEZ, M. “Cinética de secado de musa paradisíaca. (Plátano) y Manihot Esculenta Crantz (yuca)”. Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la UNAP, Iquitos, Perú. 2002. p.20-25.
2. Universidad Politécnica de Cataluña. “Tipos de Secadores de sólidos”. Disponible en: <http://epsem.upc.edu/~assecadordesolids/catella/introduccio%20tipus.html>. Consulta: 05/02/2014.
3. BETANCOURT, R. “Transferencia Molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento”. Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. 2013. 424 p
4. Edibon, S. A. Catálogo del Equipo, Secador de Bandejas Modelo SBAN. Madrid, España. 2000. 36 p.
5. MAUPOEY, P., GRAU, A., BAVIERA, J. ; SOROLLA, A. “Introducción al Secado de Alimentos por aire caliente”. Editorial Verbo Divino. España: Universidad Politécnica de Valencia. 2013. 324 p.
6. MERINO, J. “Implementación de un equipo de secado para alimentos”. Trabajo de grado .Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil. Ecuador. 2006.
7. PERRY, R (Ed.); GREEN, D. (Ed); MALONEY, J. (Ed.). “Manual del Ingeniero Químico”. (6ta. Ed.) México, México: Editorial: Mc Graw Hill. Sección 20. 2003. 90p.
8. TREYBAL, R. “Operaciones de Transferencia de Masa”. (2da. ed.) Editorial MC Graw-Hill. España. 1998. 856 p.
9. FIGUEREDO, M. “Evaluación del secado de la Manihot Esculenta Crantz “yuca” en la producción de harina utilizando el equipo de laboratorio SBAN

ubicado en el UPTJAA”. Tesis de Maestría .Universidad Politécnica Territorial José Antonio Anzoátegui. El Tigre, Venezuela.2014.

10. PATIÑO, S. “Estudio experimental de las hidrodinámicas de un lecho fluidizado al vacío empleando vapor sobrecalentado” Tesis Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Derechos Reservados 2004.

11. ÁRIAS, F. Introducción a la metodología científica. Cuarta Edición: Editorial Episteme. Caracas, Venezuela. 2004. 128 p.

12. PALELLA, S; MARTINS, F. Metodología de la Investigación cuantitativa. Fondo Editorial de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador, Caracas. 2004. 156p.

13. ALZATE,M; DÍAZ,M; GAGO, I; HERNÁNDEZ,D; MONTAÑO,Y; RON,D “Activación del equipo de secado tipo bandeja marca Edibon, modelo SBAN ubicado en el laboratorio de procesos del instituto universitario de tecnología José Antonio Anzoátegui, sede El Tigre, Municipio Simón Rodríguez, estado Anzoátegui”. Trabajo de Grado Instituto Universitario José Antonio Anzoátegui, El Tigre, Venezuela. 2014.

14. Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda (UNEFM.): “Secado de sólidos”. Área de tecnología, Complejo Académico, Departamento de energética, Laboratorio de Operaciones unitarias. Disponible: <http://laboratorio de unitarias.files.wordpress.com/2013/06/practica-1-secado.pdf>.Consulta: 03/07/2014.

15. GONZÁLEZ, R. “Principios básicos de escalado”. Editorial Universitaria del Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba. Ciudad de Matanzas. Cuba. 2000. 66 p

16. Zhengzhou, R. “Secador Re-g1”Alibaba Group. Henan, China..Disponible: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/stainless-steel-fruit-drying-machine->

industrial-fruit-dryer-vegetable-drying-machine1915107362.html Consulta:
07/07/2014.

Símbolos del alfabeto griego utilizados.

Omega: ω , Omega mayúscula: Ω , Omega mayúscula: ω_c , Cita: θ . Cita mayúscula: Θ_a , Cita mayúscula: Θ_p Cita mayúscula.

