

Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales

Design and building of solar dryer equipment for tropical fruits

Luis Eduardo García^{1*}, Manuel Felipe Mejía^{2*}, Diana Julieth Mejía³, Carlos Andrés Valencia⁴.

¹Ingeniero Mecánico, M.Sc., Profesor Investigador, Universidad de América *luis.garcia@profesores.uamerica.edu.co

²Ingeniero Mecánico, M.Sc., Profesor Investigador, Universidad de América, *manuel.mejia@profesores.uamerica.edu.co

³Ingeniero Mecánico, Universidad de América

⁴Ingeniero Mecánico, Universidad de América

Fecha de recepción del artículo: 12/09/2012 Fecha de aceptación del artículo: 10/12/2012

Resumen

El agotamiento de recursos fósiles y las implicaciones ambientales asociadas a su uso han originado interés en recursos renovables. Dentro de éstos, la energía solar presenta gran potencial en los procesos de obtención de energía y calor, específicamente, en el desarrollo de procesos de deshidratación de frutos. Este artículo describe el diseño y construcción de un equipo de deshidratación solar de flujo inducido. Los instrumentos obtenidos como resultado de este estudio permiten el desarrollo del proceso de deshidratación en frutos tropicales de diferentes características físicas y organolépticas. En primer lugar, el estudio se centra en la selección del punto de implementación del equipo y la selección de la disposición constructiva del mismo. Posteriormente, se realiza el diseño, dimensionamiento y construcción de los materiales. Finalmente, se realizan pruebas de deshidratación; los resultados se comparan con datos obtenidos en equipos de deshidratación tradicionales y con datos de modelos matemáticos empleados en dichos procesos. Los resultados evidencian diferencias de un 20 % en los tiempos de procesamiento, al emplear energía solar en comparación con energía obtenida de recursos fósiles; de la misma forma, se establece que el modelo de Page modificado es el que mejor se ajusta a los datos obtenidos del proceso de deshidratación desarrollado en este estudio. Las inno-

vaciones de diseño desarrolladas en esta investigación permiten la obtención de frutos deshidratados de manera homogénea y la reducción de emisiones de CO₂.

Palabras Claves

Energías renovables, energía solar, deshidratación de alimentos, transferencia de calor y masa, modelado matemático de deshidratación.

Abstract

The depletion of fossil resources and environmental implications associated with its use has led to interest in the use of renewable resources. Among these, solar energy has great potential in the process of obtaining energy and heat. Specifically, in the development of fruit dehydration processes. This paper describes the design and construction of a solar dehydration equipment induced flow. The equipment obtained as a result of this study allows for the development of the dehydration process in tropical fruits of different physical and organoleptic characteristics. First, the study focused on the selection of the equipment deployment point and selecting the constructive disposition. Subsequently, it was focused on the design, dimensioning and construction of the equipment. Finally, dehydration tests were performed; the results are compared with the results of traditional dehydration

equipment and with data obtained from the use of mathematical models used for simulating the process. The results provide evidence of differences of 20 % in processing times using solar energy compared to energy derived from fossil fuel. In the same way, it is established that the modified Page model is the one that best fits the data obtained from the dehydration process developed in this study. Design innovations developed in this study allow obtaining dehydrated fruits evenly and reducing CO₂.

Keywords

Renewable energy, solar energy, food dehydration, heat and mass transfer, mathematical modeling of dehydration.

1. Introducción

La aplicación de procesos de deshidratación de alimentos ha sido útil para su conservación, reducción del peso y disminución de espacio de almacenamiento [2], ya que es un método que permite la eliminación de cierto contenido de humedad, alargando su vida útil y manteniendo gran parte de sus propiedades [1]. A lo largo del tiempo se han modificado dichos procesos con la implementación de nuevas tecnologías que amplían la variedad de productos y presentaciones en el mercado de los mismos. En un principio, se empleaban sistemas abiertos de secado al sol, los cuales han sido reemplazados por sistemas mecanizados que obtienen calor de calderas y que, mediante el uso de ventiladores, fuerzan el paso del aire a través del producto de interés, reduciendo los tiempos de procesamiento y obteniendo una mejor calidad del producto. Pero estos equipos son costosos y requieren cantidades considerables de combustible o electricidad para operar [1].

Actualmente, existen diversas alternativas para realizar el proceso de deshidratación de alimentos, dentro de las cuales se considera el deshidratador solar. Los equipos empleados para este fin presentan mayor eficiencia que el secado al sol y menores costos de operación que los deshidratadores mecanizados. Los deshidratadores solares son una opción viable y económica que contribuye a la reducción de emisiones nocivas al ambiente [1].

Diversos diseños de calentadores indirectos de aire han sido propuestos y discutidos en la literatura. El desempeño de estos equipos ha demostrado ser superior en velocidad y calidad de deshidratación a otros tipos de deshidratadores solares. En este tipo de equipos, el colector solar es el componente más importante; cualquier tipo de mejora obtenida en este aspecto incrementará el rendimiento térmico del sistema de deshidratación. Es por esta razón que cualquier esfuerzo encaminado en esta dirección es considerado de gran interés. De esta forma se logra acelerar el proceso de deshidratación y se excluye la necesidad de emplear sistemas auxiliares de respaldo para proveer calor en periodos de baja radiación [2].

Este artículo describe el diseño y construcción de un equipo de deshidratación solar indirecto de flujo inducido, y a su vez, plantea el diseño de los diferentes sistemas que lo componen, tales como: colector solar, cámara de secado y sistema de ventilación. Para comenzar, se realiza la selección del punto de implementación del sistema de deshidratación que se basa en la disponibilidad del recurso solar y la selección de la materia prima a emplear, teniendo en cuenta las propiedades físico-químicas de interés de cada uno de ellos. Posteriormente, se da paso a la fase de diseño y construcción del equipo en las que se consideran todas las variables analizadas y, después, se realizan las pruebas experimentales necesarias que midan el desempeño del mismo. Finalmente, se analizan comparativamente las condiciones reales del proceso con referencia a simulaciones del mismo, para así lograr una interpretación eficaz de su comportamiento.

2. Metodología

El mercado frutícola abarca gran parte de la ejecución de procesos de deshidratación, puesto que existen gran variedad de frutos cuya presentación puede modificarse con gran facilidad, pero su transformación depende de las características del fruto y de las condiciones medioambientales en las que se esté realizando la deshidratación [16]; de esta manera, es necesario establecer las diferentes variables que van a intervenir en el proceso, tales como temperatura, cantidad y velocidad del flujo de aire,

humedad relativa, entre otras, y su influencia en el mismo. Se ha establecido que incrementos en la temperatura del flujo de aire empleado reducen los tiempos de procesamiento [16]. De la misma forma, también se considera la presencia de agua en el fruto, ya que ésta determina el proceso de descomposición y brinda parámetros indicadores para el control de agentes patógenos [17].

A continuación se describe cuál fue el protocolo de ejecución implementado durante el desarrollo de este estudio. En primera instancia, se procede a la selección del punto de implementación, selección de la disposición constructiva del equipo y dimensionamiento del mismo. Posteriormente, se procede a realizar pruebas de funcionamiento del equipo diseñado y construido y se comparan los resultados con los obtenidos de un equipo de deshidratación convencional basado en el uso de energía obtenida de recursos fósiles.

2.1 Punto de implementación

Los criterios empleados para seleccionar el sitio de implementación del equipo están centrados en las cantidades de producción de frutos tropicales y los valores de radiación presentes en dichas zonas de producción agroindustrial. El punto de implementación seleccionado para el desarrollo de este proyecto fue Cundinamarca, específicamente la sabana de Bogotá, cuya radiación promedio es de 3 a 5 kWh/m², de acuerdo al atlas de radiación solar de Colombia [15]. Esta radiación es apropiada para llevar a cabo el proceso de deshidratación, ya que en dicha zona se presenta una alta producción agroindustrial originada por la presencia de épocas de fuertes lluvias y épocas de intensa radiación solar, presentando así a la deshidratación como una alternativa viable para dar un valor agregado a los frutos, alargar su vida útil y reducir posibles problemas de sobreproducción que se presenten.

2.2 Equipo de deshidratación

El estudio previo para analizar las diferentes disposiciones constructivas de los equipos de deshidra-

tación, permitió establecer a través del método de criterios ponderados cuál era la disposición a emplear en este estudio. Como resultado de este proceso se estableció que el tipo de equipo a emplear era un deshidratador activo de tipo distribuido.

Este ejemplar de equipos emplea la energía solar y otras fuentes convencionales de energía que se caracterizan por no generar un alto costo de consumo energético, a pesar de requerirse mayores tiempos de secado al depender de las condiciones atmosféricas para ejecutar el proceso. En este modelo se presentan de manera simultánea mecanismos de transferencia de calor y masa, los cuales deben ser controlados para garantizar tanto las tasas óptimas de deshidratación como una buena calidad de producto. En la Figura 1, se aprecia la disposición constructiva del equipo de deshidratación desarrollado en este artículo.

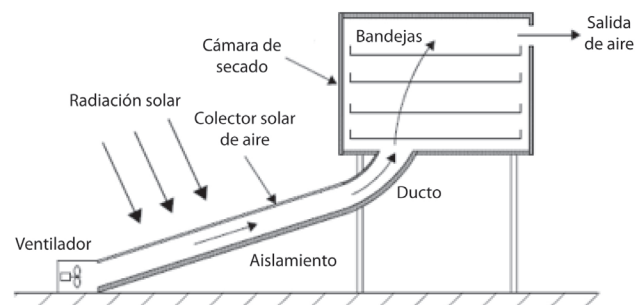


Figura 1. Disposición constructiva de un deshidratador activo de tipo distribuido.

Como se aprecia en la Figura 1, el equipo desarrollado se compone principalmente de sistema de ventilación, colector solar y cámara de secado. Para el proceso de diseño del equipo y desarrollo del proceso de deshidratación bajo las condiciones deseadas se consideraron dos tipos de variables que influyen en el proceso, éstas se dividen en psicométricas e higroscópicas. A continuación se hace la descripción del proceso de deshidratación considerado para el diseño del equipo.

1. Se presenta la radiación proveniente del sol hacia el equipo, cuya energía es aprovechada acor-

de a los requerimientos del proceso y el producto a deshidratar.

2. Convección desde la superficie captadora de calor proveniente de la radiación solar hacia el flujo de aire inducido dentro del sistema.
3. Convección entre el aire caliente y el producto a deshidratar en el interior del equipo.
4. Transferencia de calor (conducción) desde la superficie del producto a deshidratar hasta su interior.
5. Transferencia de masa desde el interior del producto a deshidratar hasta la superficie.
6. Transferencia de masa desde la superficie del fruto y el aire circundante.

Adicionalmente, se dan otros procesos de transferencia de calor y masa, pero tienen una influencia indirecta y en menor proporción en el proceso.

2.2.1 Componentes del deshidratador solar

La correcta selección de las características, materiales, dimensionamiento, etc., que deben tener cada uno de los componentes del equipo de deshidratación, permite reducir en alta proporción el contenido de humedad que poseen los productos a deshidratar en un proceso continuo con bajas pérdidas térmicas, económicas y con equipo de fácil construcción. A continuación se realiza una descripción de cada parte del equipo y la importancia que tienen en el proceso.

Con el fin de seleccionar los componentes apropiados, en este estudio se empleó el sistema de criterios ponderados, analizando las diferentes opciones probables para cada componente.

2.2.1.1 Colector solar de placa plana

Un colector solar de placa plana es un equipo diseñado para captar la radiación solar y convertirla en forma de calor, para transferirla por procesos de convección a fluidos como el aire que circula por este sistema de forma natural o forzada; es aplicado principalmente en el sector agrícola en procesos de deshidratación por ser un equipo rentable, eficiente y de bajo costo.

Los componentes principales de un colector solar y los principios de funcionamiento son:

Cubierta transparente: Es un material que permite la entrada de la radiación solar y minimiza las pérdidas de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente, además ofrece protección y resistencia mecánica hacia las agresiones externas; su funcionamiento se basa en el principio del efecto invernadero. De esta manera, el material empleado para la cubierta debe poseer alta transmitancia y baja reflectancia, generando así que la mayor parte de la radiación incidente sea transferida por convección al aire.

Placa absorbadora: El material empleado para dicho elemento debe ser capaz de absorber la radiación solar y transformarla eficientemente en energía térmica para transferirla en forma de calor al fluido de trabajo. Dentro de los parámetros a considerar están: alta absorción, bajo nivel de emisividad, buena conductividad térmica y alta durabilidad [11].

Se han realizado diversas investigaciones con el fin de aumentar la transferencia de calor entre la placa absorbadora y el fluido de trabajo, logrando favorecer la eficiencia energética. Entre éstas, se fijaron deflectores de geometría determinada [5], ondulaciones y/o porosidades en el material de dicha placa; logrando así un aumento en el área de contacto entre el fluido y la placa, para generar turbulencia en el aire e incrementar la temperatura de salida del colector.

Otra de las características importantes a tener en cuenta en el diseño del colector, es la ubicación de la placa absorbadora y la disposición del flujo del aire [11]. La disposición empleada en este estudio es el paso del aire por la parte inferior de la placa absorbadora, con el fin de aumentar la eficiencia y disminuir las pérdidas que se puedan generar por el paso del fluido entre la cubierta y el absorbador.

Aislamiento del colector: Es el material utilizado en zonas del captador que no son transparentes (lateral e inferior), cuya función es reducir las pérdidas de ca-

lor al exterior. Para ello deben tener un buen coeficiente de aislamiento o baja conductividad, resistir las altas temperaturas sin deteriorarse, soportar la humedad, poseer baja degradación y evitar que éste desprenda vapores al descomponerse por el calor.

Carcasa del colector. Su función es contener y proteger todos los elementos del colector aportando rigidez y resistencia estructural al conjunto, para así ser fijado sobre un soporte que le de inclinación y orientación al sistema; además, debe ser construida de un material que posea resistencia a las condiciones ambientales, aplicar geometrías que no permitan la acumulación de agua, implementar orificios en dicha carcasa para permitir su aireación y evacuación del condensado en zonas que no generen pérdidas por calor o la entrada de contaminantes.

En la Tabla 1, se ilustran los materiales seleccionados para el colector solar de placa plana.

Tabla 1. Componentes seleccionados del colector solar.

Característica	Selección
Cubierta transparente	Vidrio templado
Placa absorbedora	Hierro galvanizado (recubrimiento de pintura negra)
Aislamiento del colector	Fibra de vidrio
Carcasa del colector	Hierro galvanizado

2.2.1.2 Cámara de secado

La cámara de secado es un sistema que permite la ejecución de procesos de transferencia de masa y calor para la obtención de alimentos deshidratados. Su diseño varía de acuerdo a la cantidad de alimentos, al sentido del flujo del aire y al gusto del fabricante.

Los componentes principales de la cámara de secado y los principios de funcionamiento son:

Carcasa de la cámara de secado: Al igual que en el colector, es una estructura externa que le brinda rigidez

a la cámara, por tal razón se debe emplear un material que soporte las condiciones a la intemperie y posea alta resistencia para soportar altas cargas.

Cámara interna. Es un componente expuesto a cambios de temperatura y presión, en contacto directo con los alimentos a deshidratar. Por esta razón se emplea un material que posee alta resistencia a la corrosión y es adecuado para el manejo de alimentos.

Aislamiento de la cámara de secado: Es un material que recubre todas las paredes de la cámara, reduciendo las pérdidas térmicas; se debe caracterizar por poseer baja conductividad y degradación para lograr un alto tiempo de servicio.

Bandejas: Son los elementos de soporte de los alimentos, cuya cantidad varía de acuerdo a la capacidad de la cámara y a su dimensionamiento. El material empleado debe poseer resistencia a altas cargas y a la corrosión, ya que se encuentra en contacto directo con los alimentos; además, debe permitir el contacto entre el aire caliente y el producto a secar.

En la Tabla 2, se ilustran los materiales seleccionados para el colector solar de placa plana.

Tabla 2. Componentes seleccionados de la cámara de secado.

Característica	Selección
Carcasa de la cámara de secado	Hierro galvanizado
Cámara interna	Hierro galvanizado (recubrimiento de pintura negra)
Aislamiento de la cámara de secado	Fibra de vidrio
Bandejas	Malla expandida de aluminio

2.2.1.3 Sistema de ventilación

Es uno de los componentes principales en los equipos de secado con convección forzada, el cual tie-

ne la capacidad de suministrar determinado flujo de aire dependiendo de las condiciones requeridas para el proceso (alimento a secar, tiempo de secado, cantidad de alimento, etc.). Se clasifican de acuerdo al tipo de ventilador empleado, pueden ser ventiladores axiales y ventiladores radiales o centrífugos. Por sus características, en este equipo se seleccionó un ventilador centrífugo.

2.3 Dimensionamiento del equipo de deshidratación

El deshidratado de alimentos es un proceso psicométrico, en el que requiere establecer las propiedades ambientales donde va a funcionar el equipo. Para el caso de la humedad y la temperatura ambiente de Bogotá, se realizaron mediciones con el sensor USB Data logger EXTECH RHT10, durante aproximadamente 1 mes cada 10 segundos. Posteriormente, se promediaron los valores almacenados en las horas donde hay sol en el lapso de tiempo comprendido entre 6 am a 6 pm. Finalmente, se realizaron análisis comparativos con los valores reportados por el IDEAM para el mes de medición, con el fin de validar los resultados obtenidos. Dicho promedio fue de 46 % para la humedad relativa y de 23 °C para la temperatura.

Para determinar las otras condiciones ambientales de Bogotá (temperatura de bulbo húmedo, humedad absoluta, entalpía y volumen específico), con la temperatura y humedad relativa previamente medidas, se empleó la carta psicrométrica, partiendo de estas dos condiciones. Para el caso de esta investigación se empleó la presión atmosférica de Bogotá (560 mm. de Hg).

Estas propiedades fueron determinadas previamente mediante la realización de una prueba piloto en un equipo similar que emplea como fuente de energía resistencias eléctricas. Como resultado de estas acciones se establecieron las condiciones de operación necesarias del equipo en los puntos críticos del proceso, las cuales fueron condiciones del aire a la entrada del colector (punto 1), entrada de la cámara de secado (punto 2) y salida de la cámara

de secado (punto 3). En la Tabla 3, se ilustran los resultados obtenidos de este proceso.

Tabla 3. Condiciones de operación del proceso.

Propiedad	Punto 1	Punto 2	Punto 3
Temperatura del aire (°C)	23	55	37
Humedad relativa (%)	46	8,19	33,65
Humedad absoluta (g de vapor/ kg aire seco)	10,99	10,99	18,19
Entalpía (kJ/kg)	51,15	84,01	84,01
Volumen específico (m ³ /kg)	1,15	1,28	1,22
Temp. de bulbo húmedo (°C)	14,81	23	22,86
Temp. de rocío (°C)	10,77	10,77	18,38

Para el dimensionamiento del equipo de deshidratación es necesario establecer la capacidad del mismo. Ésta se estableció como 10 kg de producto a procesar. Con base en este valor, a continuación se describe el proceso de dimensionamiento del equipo.

2.3.1 Colector solar de placa plana

El área del colector es directamente proporcional a la demanda energética para realizar el proceso de deshidratado e inversamente proporcional a la radiación solar incidente y la eficiencia. La ecuación 1 permite establecer el área requerida del colector [9].

$$A_c = \frac{Q_u}{I n} \quad (1)$$

Dónde:

A_c : Área del colector.

Q_u : Calor útil.

I : Radiación solar global (4,939 kWh/m² día).

n : Eficiencia (80 %).

El valor del área del colector es 1,17 m². En la Figura 2, se ilustra la forma constructiva del colector diseñado y construido en este estudio.

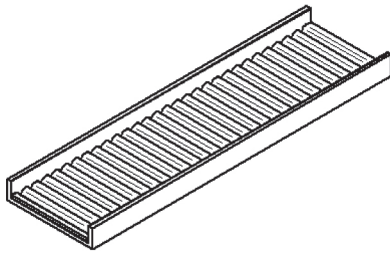


Figura 2. Disposición constructiva del colector desarrollado en este estudio.

2.3.2 Cámara de secado

Cámara interna: Para el diseño de la cámara de secado es necesario establecer las condiciones de su estructura interna, donde serán alojadas las bandejas con una carga de 10 kg. Inicialmente se determina el volumen que ocuparán los 10 kg de producto a procesar. La ecuación 2 permite establecer el volumen de la cámara de secado [9].

$$V_{tp} = \frac{M_t}{\rho_{ap}} \quad (2)$$

Dónde:

V_{tp} : Volumen total de producto a procesar.

M_t : Masa total producto a procesar.

ρ_{ap} : Densidad aparente producto a procesar.

Con el propósito de evitar aplastamiento y considerar un espacio adecuado entre cada bandeja, el volumen de la cámara interna es de 0,054 m³. Las dimensiones de la cámara interna de la cámara de secado son 0,52 m de ancho, 0,315 m de alto y 0,33 m de profundidad. En la Figura 3, se ilustra la forma constructiva de la cámara de secado diseñada y construida en este estudio.

Bandejas: Para determinar las dimensiones que va a tener cada una de las bandejas y la cantidad necesaria de éstas para contener apropiadamente los productos a deshidratar, se debe analizar: el volumen, el área transversal y la cantidad de producto a procesar.

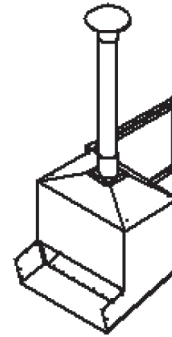


Figura 3. Disposición constructiva de la cámara interna desarrollada en este estudio.

Como resultado de estas labores se estableció que las dimensiones para la superficie de área en la que será ubicado el producto a procesar son 0,33 m de largo y 0,47 m de ancho. De la misma forma se determinó que el número de bandejas apropiado a emplear en la cámara de secado es 5, esto con el fin de garantizar una distancia de 63 mm de separación entre éstas, con el fin de facilitar el flujo de aire, evitar el aplastamiento y permitir el procesamiento de productos de diferentes tamaños.

Adicionalmente, con el fin de garantizar el paso de aire sin ninguna restricción entre bandejas, cada una cuenta con una abertura de 2 cm, esto con el fin de optimizar la transferencia de calor por convección del aire caliente hacia el producto a procesar. La Figura 4 ilustra la forma constructiva de las bandejas diseñadas y construidas en este estudio.

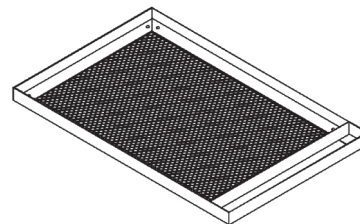


Figura 4. Disposición constructiva de las bandejas desarrolladas en este estudio.

2.3.3 Sistema de ventilación

Con base en los parámetros establecidos para la realización del proceso se determinó que el caudal

requerido de aire es de 40.45 *cfm*, de esta forma se seleccionó el equipo de ventilación a emplear. Con el fin de controlar la dirección y uniformidad del aire que ingresa al equipo se implementó un sistema de deflectores en el ducto de conexión entre el ventilador y el colector solar. Adicionalmente, éste se encuentra acoplado a un variador de potencia con el fin de obtener el caudal específico requerido.



Figura 5. Disposición constructiva del ducto de conexión entre ventilador y colector solar con la ubicación de los deflectores.

En la Figura 6, se muestra la disposición constructiva del equipo diseñado y construido en este estudio. Se estableció que la implementación de un mecanismo que permita la variación del ángulo de inclinación del colector no es una inversión justificable, ya que con el uso de un ángulo promedio de 15°, el cual es el apropiado para la región de implementación, se logrará captar la mayor cantidad de radiación incidente para aprovechar en el proceso.

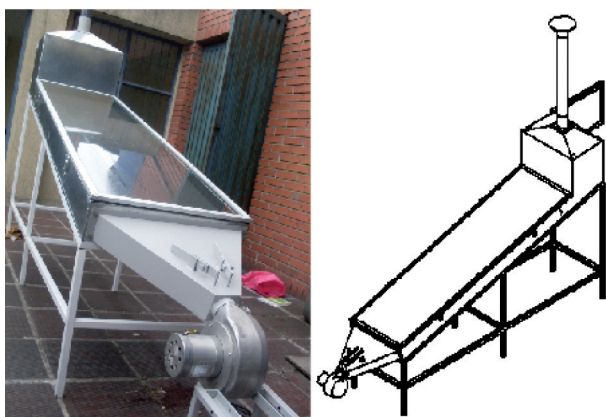


Figura 6. Disposición constructiva del equipo de deshidratación desarrollado en este estudio.

3. Desarrollo experimental

Con el fin de verificar la correcta operación del equipo se procedió a realizar una prueba de deshidratación. Las materias primas consideradas para dicha prueba fueron mango, fresa y uchuva (*Physalis peruviana*), las cuales presentan grandes cantidades de producción en la zona de implementación seleccionada. Para efectos de la prueba se seleccionó a la uchuva (*Physalis peruviana*) por su potencial de mercado en el exterior como fruto tropical. Cabe destacar que no se empleó ningún tipo de pretratamiento y tampoco se consideró para el análisis tasas de rehidratación del producto.

El proceso con el deshidratador solar se realizó en las horas donde había más radiación solar (9 am a 5 pm). La humedad establecida en la uchuva (*Physalis peruviana*) al inicio de la prueba fue de 80 % bh, la humedad final esperada fue de 12 % bh y la masa procesada fue de 10 kg distribuidos en 5 bandejas (ver Figura 7).

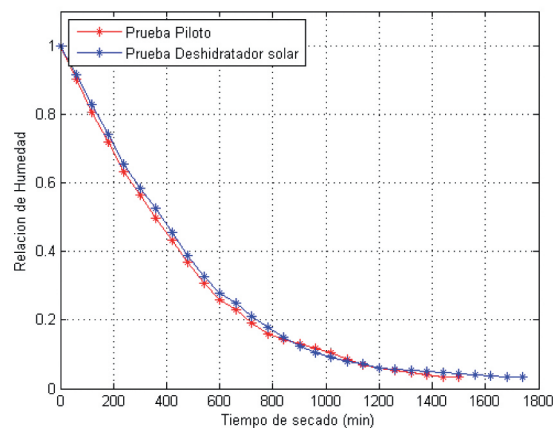


Figura 7. Curvas de secado obtenidas de manera experimental, 55 °C y 3 m/s.

De la misma forma, se llevó a cabo una prueba de deshidratación en un equipo convencional proporcionado por la empresa Ingesecc Ltda, el cual emplea como fuente de energía para la deshidratación una resistencia eléctrica de 10 kW.

Para efectos de la comparación se realizaron ambos experimentos bajo las mismas condiciones de humedad inicial y final, y la cantidad de producto a procesar. En ambos casos se emplea un ventilador centrífugo de alabes inclinados, equipado con un motor de 1 Hp a 220 V/60Hz y 1670 RPM para forzar el ingreso de aire al colector (ver Figura 6). La velocidad del flujo de aire fue de 3 m/s y la temperatura de operación fue de 55 °C.

El tiempo de duración de la prueba en el deshidratador solar fue de 30 horas, por lo cual se hicieron necesarios aproximadamente 4 días, al cabo de los cuales la uchuva (*Physalis peruviana*) llegó a un contenido de humedad del 12 % bh. En el caso del equipo convencional, el tiempo empleado en la prueba piloto fue de 25 horas. En la Figura 7, se pueden apreciar las curvas de secado obtenidas de manera experimental durante las pruebas llevadas a cabo en este estudio.

Se puede apreciar un comportamiento similar durante el proceso; sin embargo, desde las horas iniciales del mismo se da una diferencia notable que se ve reflejada en inferiores valores de humedad durante la prueba piloto, en comparación con los valores obtenidos en el deshidratador solar; esto originado por mayores velocidades de secado durante la prueba. También se observa cómo, a partir del minuto 900, la curva de secado solar tiende a estabilizarse dando origen a velocidades de secado más lentas.



Figura 8. Uchuva (*Physalis peruviana*) a las 30 horas de procesamiento.

De la misma forma, se puede apreciar que durante el desarrollo de la prueba en el deshidratador solar no se presentan picos de rehidratación originados por la suspensión del proceso. Las 5 horas de diferencia de éste en el equipo desarrollado, en comparación a la prueba piloto, se deben a las fluctuaciones de temperatura a lo largo del mismo, originadas por cambios en la radiación solar y/o nubosidad. En la Figura 8, se muestran las condiciones de la uchuva (*Physalis peruviana*) al final del proceso de deshidratación solar.

4. Modelado matemático

Con el fin de caracterizar el proceso de deshidratación llevado a cabo en este estudio, las curvas de secado obtenidas de forma experimental fueron ajustadas con diferentes ecuaciones de relación de humedad reportadas en la literatura. Los coeficientes empleados fueron tomados de estudios experimentales previos realizados por otros autores en procesos llevados a cabo con la uchuva (*Physalis peruviana*) [18]. En la tabla 4, se pueden apreciar los modelos considerados en este estudio y los valores de correlación y chi-cuadrado obtenidos en cada caso.

Nombre del modelo	Modelo	R ²	χ ²
Newton	$MR = \exp(-k_d t)$	0.982	0.0110
Page modificado	$MR = \exp(-k_d t)^{n_3}$	0.998	0.0015
Henderson Pabis modificado	$MR = n_8 \exp(-k_d t) + n_9 \exp(-k_{10} t) + n_{10} \exp(-k_{11} t)$	0.996	0.0044

Tabla 4. Modelos matemáticos usados por varios autores en el estudio de procesos de deshidratación [18], (R², χ²) Valores de correlación y chi-cuadrado obtenidos en este estudio.

El coeficiente de correlación y el valor de chi-cuadrado se tomaron como los principales criterios para seleccionar el modelo que mejor se ajusta a los valores experimentales obtenidos. Se puede apreciar que en todos los casos el coeficiente de

correlación (R^2) fue superior al límite aceptable de 0.95 y los valores de chi-cuadrado (χ^2) variaron entre 0.0015 y 0.0110 siendo bajos, tal y como se esperaba, lo cual indica un buen ajuste de los modelos empleados. El modelo de Page modificado resultó ser el modelo que mejor describe el proceso de deshidratación para la uchuva (*Physalis peruviana*) realizado en este proyecto.

En la Figura 9, se ilustran las curvas de secado obtenidas de manera experimental y teórica.

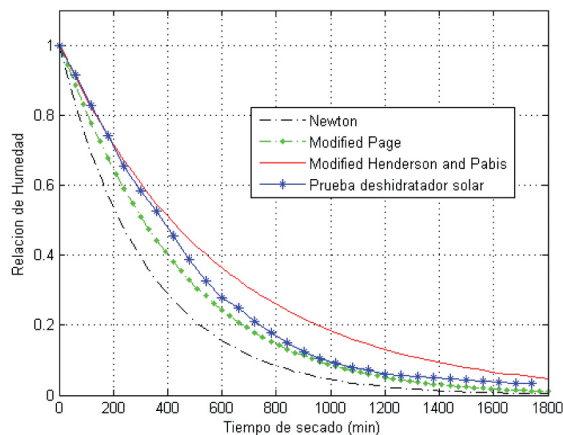


Figura 9. Comparación de curvas de secado obtenidas de manera experimental y teórica, 55 °C y 3 m/s.

Adicionalmente, con el fin de determinar la difusividad efectiva durante el desarrollo del proceso, se emplea la segunda ley de difusión de Fick [19]. Mediante la solución general de dicha ley con valores constantes de temperatura y humedad difusiva, utilizando el método de pendientes y los valores experimentales obtenidos en este estudio, se estableció un valor de $4.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para la difusividad efectiva obtenida.

5. Conclusiones

El equipo diseñado en este estudio, si bien presenta tiempos similares de procesamiento a los obtenidos en equipos convencionales con diferencias de 5 horas más de procesamiento y, como consecuencia de esto, un gasto adicional de 3.73 kWh (20 %) adi-

cional en el gasto energético por uso del sistema de ventilación, permite un ahorro de 250 kWh al no requerir del uso del sistema de calentamiento de resistencia eléctrica del equipo convencional empleado en la prueba piloto, evitando de esta forma la emisión de 238.75 kg de CO_2 , 2.95 kg de SO_2 y 1.08 kg de NO_x (Estimaciones basadas en producción de energía en plantas termoeléctricas a carbón).

Las diferencias en tiempo de secado se deben principalmente a la variación en la radiación solar. Para lidiar con esto y optimizar el recurso energético, en este proyecto se llevaron a cabo implementaciones de diseño como:

- La implementación de aletas de direccionamiento en el ducto de conexión entre el ventilador empleado y el colector solar, para permitir optimizar la entrada del aire al equipo de deshidratación.
- La implementación de lámina ondulada en la fabricación de la lámina absorbidora en el colector, permite generar turbulencia al interior del mismo, incrementando los coeficientes de transferencia de calor por convección y mejorando la eficiencia del proceso; esto se ve reflejado en reducción de hasta 22 % en los tiempos requeridos para alcanzar el estado estable en la operación del equipo para un valor específico de radiación solar.
- La implementación de las aberturas laterales en las bandejas garantiza que el flujo de aire sea paralelo sobre las mismas y el producto a deshidratar.
- La implementación de lámina perforada en la fabricación de las bandejas permite obtener un producto deshidratado con mejores características de aspecto y homogeneidad al final del proceso, debido a que se garantiza el flujo de aire caliente por la parte superior e inferior del producto a procesar; y no sólo por la parte superior, como ocurría en las bandejas de lámina sin perforar.

Todos los modelos matemáticos analizados podrían ser usados para describir el proceso de deshi-

dratación llevado a cabo en el equipo desarrollado en este estudio. Sin embargo, basados en la evaluación de parámetros estadísticos, el modelo Page modificado dio el valor más alto de coeficiente de correlación y menor de chi-cuadrado; por lo tanto, es considerado el que mejor explicaba el proceso de deshidratación desarrollado en este estudio. El modelo en mención puede entonces ser empleado para estimar las condiciones óptimas de deshidratación (temperatura y tiempo) requeridas para alcanzar un contenido final de humedad en el procesamiento de uchuva (*Physalis peruviana*).

6. Referencias

1. A. Sharma, C.R. Chen y Nguyen Vu Lan. "Solar energy drying systems: A review". *Renewable and sustainable energy reviews*, vol 13 (2009), pp. 1185 – 1210.
2. A. A. El-Sebaï y S.M. Shalaby. "Solar drying of agricultural products: A review". *Renewable and sustainable energy review*, vol 16 (2012), pp. 37-43.
3. A. Cerda y S. Byron. "Diseño y construcción de un deshidratador rectangular de inducción para la obtención de pasa de uvilla con capacidad de 300 kg/día para la empresa Equinox Business Limited," M.Sc. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército, 2005.
4. B. J. Ruiz y V. Rodríguez-Padilla. "Renewable energy sources in the Colombian energy policy analysis and perspectives". *Energy policy*, vol 34, 2006, pp. 3684–3690.
5. B. Romdhane, "The air solar collectors: Comparative study, introduction of baffles to favor the heat transfer". *Solar Energy*, vol 81, No. 1, 2007, pp. 139-149.
6. C. Geankoplis. *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México, Editorial Continental, S.A, 1998.
7. F. Rodríguez. *Ingeniería de la industria alimentaria (III). Conservación de alimentos por reducción de su actividad de agua. Secado*. Capítulo 5, 2002.
8. H. Váquiro. "Contribución al estudio y optimización del secado intermitente: aplicación al secado de mango". Tesis doctoral, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos. España. 2009.
9. I. Puertas. "Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos". Tesis doctoral, Badajoz: Universidad de Extremadura, España. 2005.
10. J. Kreider et al. *Solar energy handbook. Fundamentals of solar radiation*, Chapter 2. New York, McGraw Hill. 1981.
11. O. V. Ekechukwu. "Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory". *Energy Conversion & Management*, vol 40, No 6. (1999), pp. 593-613.
12. O. V. Ekechukwu. "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology". *Energy Conversion and Management*, vol 40, No 6. (1999), pp. 615-655.
13. O. V. Ekechukwu. "Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications". *Energy Conversion and Management*, vol 40, No 6. (1999), pp. 657-667.
14. S. A. Kalogirou. "Environmental benefits of domestic solar energy systems". *Energy Conversion and Management*, vol 45, No 18-19 (2004), pp. 3075-3092.
15. UPME. IDEAM. *Atlas de radiación Solar de Colombia*, 2005.
16. V. Belessiotis y E. Delyannis. "Solar Drying". *Solar Energy*, vol 85, Progress in solar energy 1, 2011, pp. 1665-1691.
17. Ali Motaveli, Saeid Minaei y Mohammad Hadi Khoshtagaza. "Evaluation of energy consumption in different drying methods". *Energy conversion and management*, vol 52, (2011), pp. 1192 - 1199.
18. Vega-Galvez, et. Al. "Mathematical modeling of thin-layer drying kinetics of Cape Gooseberry (*Physalis Peruvian L.*)". *Journal of food processing and preservation*, (2012).
19. I. Doymaz. "Convective drying kinetics of strawberry". *Journal Chemical engineering and processing*, vol 47 (2008), pp. 914–919.