



Informe Técnico

Desarrollo de un deshidratador híbrido para la producción de materia prima de suplementos alimenticios

Autores

*Isadora Martínez Arellano
Ma. Soledad Córdova Aguilar
Miguel Ángel Bazán Ramírez
Daniel Atzin Mojica Vite*

Ciudad de México marzo del 2021.

Desarrollo de un deshidratador híbrido para la producción de materia prima de suplementos alimenticios

*Martínez Arellano Isadora, Bazán Ramírez Miguel Ángel,
Mojica Vite Daniel Atzin, Córdova Aguilar Ma. Soledad.*

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Depto. Instrumentación Científica e Industrial, Grupo Ingeniería de Proceso.

Resumen

La producción de harinas para formular suplementos alimenticios requiere la deshidratación de la materia prima de origen vegetal. Por tanto, el desarrollo de un prototipo de deshidratación solar híbrido permitió la obtención de materia prima de origen vegetal deshidratada para posteriormente molerla y tamizarla. El trabajo está dividido en el diseño, manufactura, construcción e implementación enfocados al sistema de deshidratación solar híbrido. De esta manera la materia prima se mantiene libre de microorganismos debido a la humedad baja cumpliendo con la NOM- 247-SSAI-2008. La deshidratación se lleva a cabo por medio de convección natural y asistida a través de un sistema de control que permite la manipulación de un ventilador con resistencia colocados en la parte inferior del equipo. El sistema consta de tres partes esenciales: el colector solar que permite la captación de radiación solar, la cámara de secado y la salida del aire con mayor humedad, el equipo se encuentra aislado con lana de roca para evitar la pérdida de calor y aumentar la eficiencia del prototipo.

Índice

Resumen	1
Nomenclatura	4
Introducción.....	5
1 Antecedentes.....	6
1.1 Diferencia entre secado y deshidratación	6
1.2 Clasificación de deshidratadores	7
2. Definición del problema.....	8
3. Entorno actual	8
4. Relevancia y limitaciones	9
5. Relación con otras áreas	9
6. Método	9
7. Objetivos y resultados esperados.....	10
8. Descripción de los sistemas	10
8.1 Deshidratador Solar Híbrido.....	10
8.2 Colector	11
8.3 Cámara de deshidratado	11
8.4 Resistencias y ventilador	12
8.5 Control y monitoreo.....	13
9. Caracterización del proceso de deshidratado y operación del equipo.....	14
9.1 Análisis de productos.....	15
9.1.1 Dimensiones	15
9.1.2 Masa	15

9.1.3 Humedad.....	15
9.1.4 Actividad de agua.....	15
9.2 Parámetros de operación del equipo.....	15
9.2.1 Flujo de aire.....	15
9.2.2 Temperatura y humedad.....	15
9.2.3 Eficiencia del sistema.....	15
10. Resultados.....	17
10.1 Prototipo de un equipo híbrido de deshidratado de alimentos.....	17
10.2 Eficiencia.....	18
10.3 Registro de temperatura.....	19
10.4 Dimensiones del alimento y características morfológicas.....	21
10.4.1 Garbanzo.....	21
10.4.2 Haba.....	21
10.4.3 Frijol.....	21
10.5 Humedad y a_w	22
10.6 Difusividad efectiva.....	23
11 Conclusiones.....	24
Referencias Bibliográficas.....	25

Nomenclatura

Símbolo	Significado
<i>aw</i>	Actividad de agua
AC	Corriente alterna
MDF	Fibropanel de densidad media

Introducción

La deshidratación de alimentos es un proceso antiguo que el humano ha utilizado para conservar sus alimentos, la energía solar presenta gran potencial en los procesos de obtención de calor, que pueden ser aprovechados para el secado y la conservación de alimentos. Consiste en la eliminación de la mayor parte de agua de un alimento mediante el secado a partir de un flujo de aire calentado con radiación solar. Permite alargar la vida de los alimentos, conservando sus propiedades además de facilitar el almacenaje, transporte y manipulación de estos (Ingeniería sin fronteras, 2016). En la actualidad enfrentamos distintos retos en el sector salud, entre ellos están la desnutrición y la alimentación excesiva, por ello, las nuevas tendencias en el consumo de alimentos y los cambios en el estilo de vida se han enfocado en buscar productos más saludables, que además de su aporte nutricional tenga un efecto benéfico a la salud, como es el caso de las legumbres, fomentando su consumo (Delgado-Andrade *et al.*, 2016).

No obstante, la producción de alimentos secos tiene costos de producción elevados. Una alternativa es utilizar tecnologías emergentes como el secado solar y/o combinarla con energía eléctrica. La deshidratación puede hacerse utilizando diversos procedimientos, cada uno tiene sus ventajas y desventajas, difiriendo especialmente en el tiempo de secado. El método que se utilice depende en gran medida de la calidad del producto que se desee obtener, el tiempo, esfuerzo y capital que se quiere invertir. Los métodos varían desde la deshidratación directa al sol, hasta métodos de secado utilizando diferentes equipos: hornos caseros, secadoras eléctricas, de gas etc., especialmente diseñados para este fin (Cruz & Jimenez, 2016).

1 Antecedentes

1.1 Diferencia entre secado y deshidratación

Aunque ambos términos se aplican a la eliminación del agua de los alimentos, en la tecnología de los alimentos el término secado se refiere a la desecación natural, como la que se obtiene exponiendo el producto a la acción del sol, es un método simple y económico para preservar alimentos. El secado solar de alimentos puede ser llevado a cabo en casi cualquier lugar, tomando en cuenta la cantidad de radiación solar y la humedad relativa de la locación. La deshidratación designa el secado por medios artificiales, como la exposición del producto a una corriente de aire caliente controlada. La deshidratación implica el control sobre las condiciones climáticas dentro de una cámara de deshidratación o el control de un medio circundante mediante las variables de temperatura, humedad, velocidad del aire creando una atmosfera controlada para el secado de los productos. Los alimentos deshidratados en equipos diseñados para este fin pueden tener mejor calidad que los secados directamente al sol (Hernández, & Quinto, 2005).

1.2 Clasificación de deshidratadores

Los sistemas de deshidratación han evolucionado teniendo diferentes arreglos a lo largo de la historia, el desarrollo evoluciona conforme avanzan los conocimientos y la tecnología que ha desarrollado la humanidad entre los que se encuentran los siguientes: tienda, gabinete y túnel (Almada, M. *et al.* 2005; Figura 1).

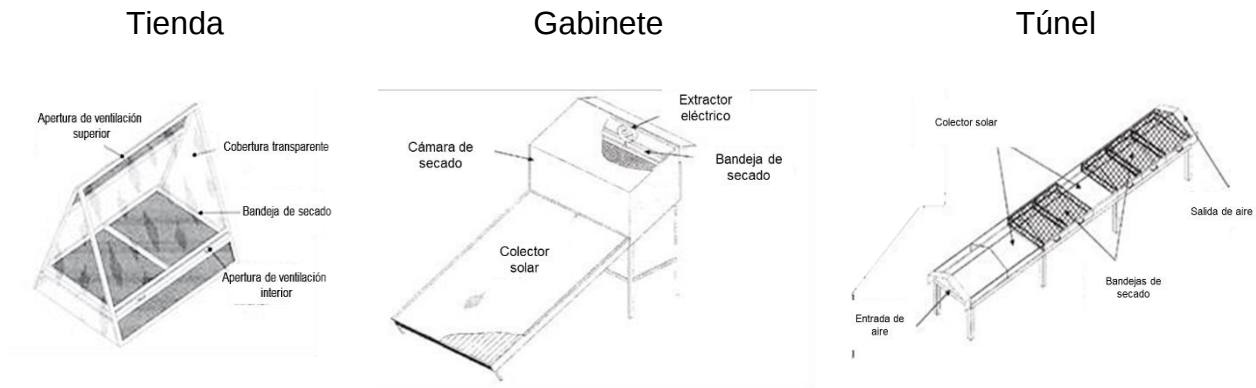


Figura 1. Tipos de deshidratadores

Ekechukwua O. y Norton B. (1999) consideran dos clasificaciones según el tipo de secado: deshidratadores activos “asistidos” y deshidratadores pasivos “naturales” o sin asistencia. Dependiendo del tipo de exposición de la materia a la radiación solar estos pueden ser: directos (materia prima expuesta directamente a la radiación solar), indirecto (radiación solar dirigida a un colector) y mixto (radiación dirigida al colector solar y materia prima directamente expuesta a la radiación), esta clasificación es mostrada en la figura 2. Dependerá del tiempo de secado, el capital que se desea invertir, la calidad del producto que se quiere obtener, la locación donde se quiera implementar el equipo etc.

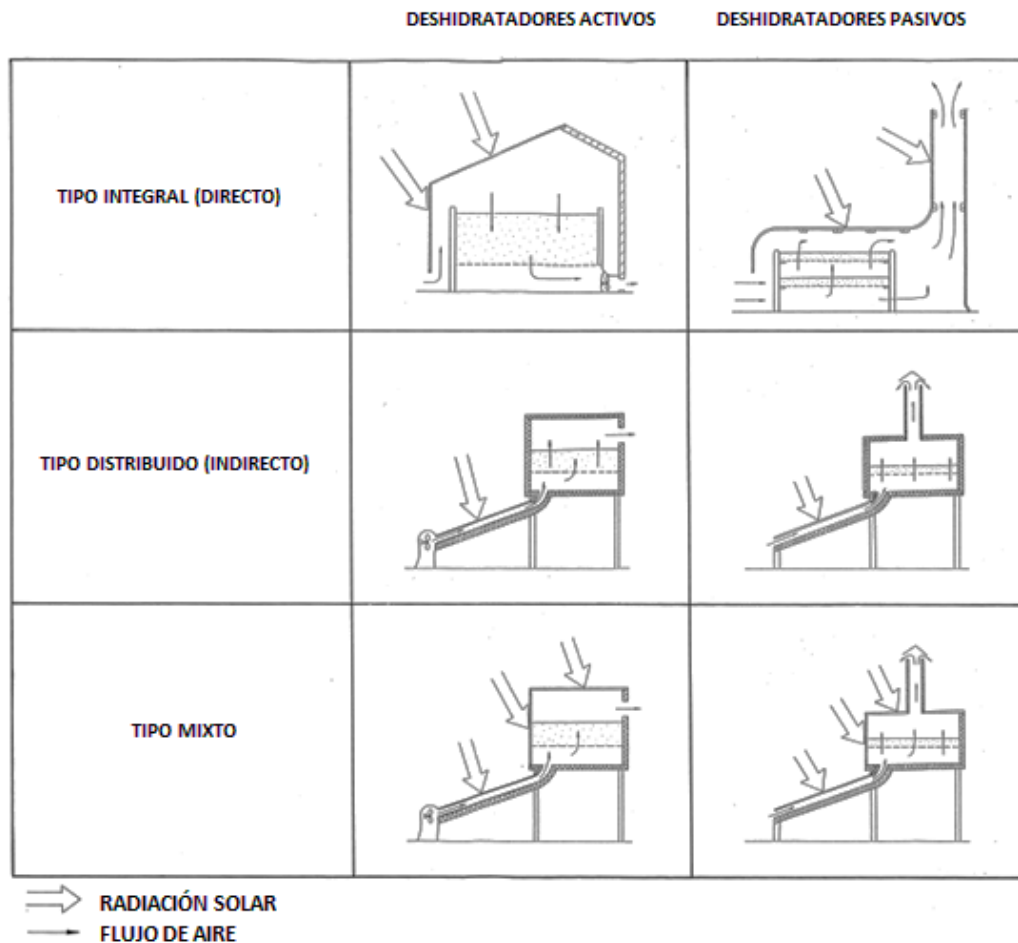


Figura 2. Diseños típicos de deshidratadores de energía solar (Traducción a partir de Ekechukwua O. y Norton B. 1999)

2. Definición del problema

Diseñar y construir un sistema de deshidratación híbrido para la deshidratación para preservar las propiedades físicas y nutrimentales de alimentos con temperaturas inferiores a los 60°C.

3. Entorno actual

El grupo de Ingeniería de Proceso lleva a cabo el desarrollo de suplementos alimenticios como una alternativa para complementar el régimen alimenticio cuando algún paciente presenta malnutrición. Los suplementos tienen una base de leguminosas y otros productos de origen vegetal, los cuales requieren un proceso previo para obtener el producto final. El primer paso consiste en someter a un tratamiento térmico a las

leguminosas, se continúa con el proceso de deshidratación y se finaliza con la molienda y el tamizado (Mojica *et al.* 2018).

En particular, la deshidratación de alimentos es la base para obtener la materia prima; harinas de legumbres, vegetales y semillas. Por lo que se requiere de equipos desarrollados con base en las necesidades del proceso y del usuario.

4. Relevancia y limitaciones

La relevancia del desarrollo del proyecto es el apoyo en la generación de infraestructura de manufactura propia para el grupo de Ingeniería de Proceso y que puede ser transferida a otras instituciones de la UNAM. Las limitaciones del equipo están relacionadas con las especificaciones del proceso de deshidratado de alimentos para obtener la materia prima de harinas con alto valor nutritivo y solubilidad.

5. Relación con otras áreas

Existe una gran relación con las áreas de desarrollo de suplementos alimenticios que es nutrición, diseño mecánico, sistemas electrónicos digitales, medición e instrumentación.

6. Método

El modelo empleado para la manufactura y desarrollo del equipo tiene como base la configuración de un deshidratador solar de tipo indirecto que suministra aire caliente por convección natural y un sistema de resistencias eléctricas, y un ventilador que proveen aire caliente a la cámara por convección forzada. Así, las láminas de alimentos no son expuestas a la radiación solar directa para permitir conservar sus características visuales y sus propiedades nutrimentales al controlar las condiciones de temperatura en la cámara de deshidratado por debajo de los 60°C. Para cubrir las necesidades de operación y del usuario, el equipo cuenta con un sistema electrónico para monitorear y controlar la temperatura de la cámara de deshidratación, el cual hace uso de la energía primaria de la radiación solar y en caso de tener condiciones de radiación solar desfavorables, un sistema secundario de resistencias eléctricas entra en uso. Para verificar que el equipo opera en las condiciones deseadas se determina la humedad en frijol, haba y garbanzo por medio del método en estufa de una termobalanza *Santorious* y *aw* en el *AQUA-Lab*.

7. Objetivos y resultados esperados

Con el equipo desarrollado se pueden deshidratar láminas de alimentos frescos en un espesor de 2 a 3 mm, en intervalos de temperatura deseados entre los 35 y 45 °C. La medición de temperatura tiene resolución de 1°C y la humedad de 1%.

8. Descripción de los sistemas

8.1 Deshidratador Solar Híbrido

El sistema fabricado permite la deshidratación de alimentos en rodajas de 3 mm de espesor promedio; manzanas, betabel, plátano, hongo, etc. EL volumen de trabajo depende de las propiedades de cada alimento y la disposición a lo largo de las charolas. La energía principal de operación es la solar, que permite operar en valores de temperatura de entre los 35 a 55 °C en la cámara de deshidratación por medio de convección natural. En condiciones de baja radiación solar, el banco de resistencias y ventilador se activan para generar una convección forzada y mantener las condiciones de temperatura de deshidratación en la cámara. El sistema híbrido permite la operación constante del deshidratador, 24 h continuas. Los valores de temperatura de deshidratado se establecen antes de iniciar el proceso y en caso de ser necesario, pueden modificarse durante el mismo. El sistema se opera por medio de una botonera y una pantalla LCD, se establecen valores de operación y se despliegan los valores en tiempo real durante todo el proceso.

El equipo del deshidratador híbrido está diseñado y compuesto por cuatro sistemas básicos: banco de resistencias y ventiladores, colector, cámara de deshidratación, y monitoreo y control (figura 3). A continuación, se describen los sistemas y se detallan elementos mecánicos y electrónicos.

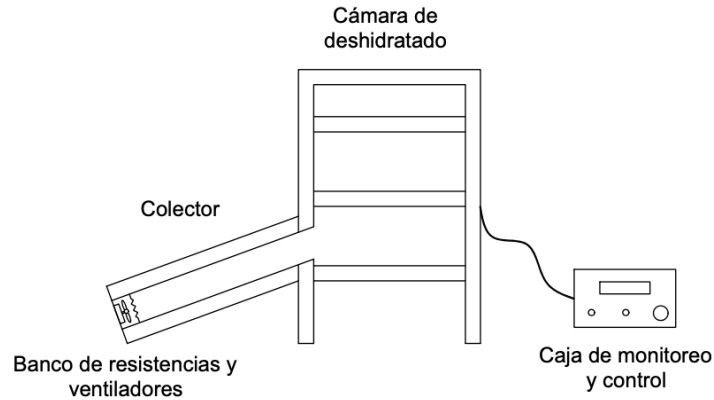


Figura 3. Esquema del deshidratador híbrido de alimentos.

8.2 Colector

El colector es una estructura de 80 cm x 50 cm x 23 cm, (figura 4), fabricado con perfil estructural de aluminio tipo Bosch, de sección cuadrada de 3 cm y ranuras de 0.6 cm. Las paredes laterales y el fondo tienen cubiertas de MDF de 0.6 cm de espesor, y al interior de cada pared se coloca una placa de lana mineral de 2.54 cm de espesor como aislamiento. La tapa del colector es de acrílico transparente de 0.6 cm de espesor. En la entrada del colector se encuentran el soporte del banco de resistencias y ventilador.

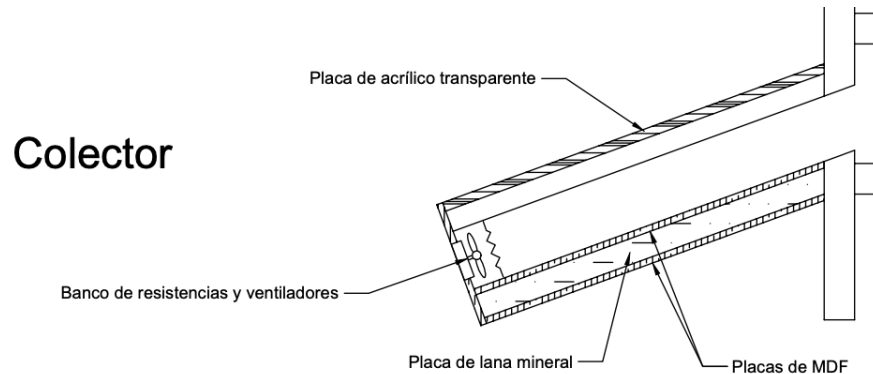


Figura 4 Esquema del colector.

8.3 Cámara de deshidratado

La cámara de deshidratado tiene dimensiones de 48 cm x 48 cm x 69 cm (largo, ancho, altura) y está fabricada con perfil estructural de aluminio tipo Bosch de sección cuadrada de 3 cm y ranuras de 0.6 cm (figura 5). Las paredes cuentan con cubiertas de MDF de 0.6 cm de espesor, al interior de las paredes se coloca una placa de lana de mineral como

aislante con un espesor de 2.54 cm. La tapa superior de la cámara cuenta con una serie de 30 ranuras de 0.6 cm x 10 cm (ancho y longitud) distribuidas en la periferia para permitir el flujo de aire al exterior. Tiene una capacidad para soportar 3 bandejas de 44 cm x 40 cm en disposición vertical, que son fabricadas de acero inoxidable grado alimenticio. La cámara tiene una puerta de acceso, construida con el perfil estructural de aluminio tipo Bosch, cubiertas de MDF y aislante al interior, está provista con dos mirillas rectangulares de 10 cm x 3 cm.

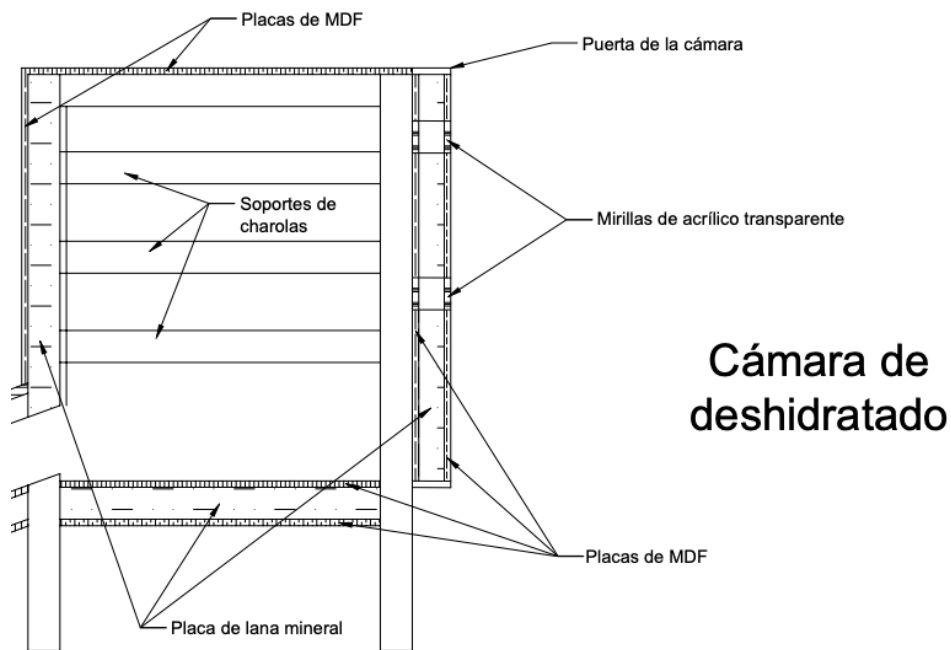


Figura 5. Esquema de la cámara de deshidratado.

8.4 Resistencias y ventilador

En la entrada del colector solar se instala un banco de resistencias eléctricas y un ventilador de la marca *Landia* modelo *DCH0737G* de corriente alterna (AC), con una tensión de alimentación de 127 V, una potencia eléctrica de 1250 W, una corriente máxima de 10 A y una frecuencia de 60 Hz. El ventilador es de velocidad variable y con 7,000 rpm máximas.

8.5 Control y monitoreo

Se diseñó e implementó un sistema electrónico de monitoreo de la temperatura de la cámara de deshidratación y un control para la operación, o activación, del sistema de ventilador y resistencias. El control es de tipo *on-off*, basado en la plataforma de un microcontrolador *ArduinoUNO®*, *ATMEGA328P* con una memoria tipo flash de 32 kB, una velocidad de reloj de 16 MHz. El sistema cuenta con un sensor de temperatura y humedad modelo *DHT11*, con un voltaje de alimentación de 3 a 5 V, con un intervalo de medición de 0 a 50 °C, precisión de ± 2.0 °C. El intervalo de humedad es del 20 a 90 %, precisión de ± 4 %. Se instala un módulo de relevadores, módulo Relay, *JQC-3F-T73* de 5 V de voltaje de operación y 20 mA de corriente de operación, permite una tolerancia de 250 VAC, 30 VDC y 10 A. El despliegue de los valores de operación es por medio de una pantalla *LCD* modelo *1602A*, con un voltaje de alimentación de 5 V, 16 caracteres y 2 líneas, con un tamaño de carácter de 0.5 cm x 0.3 cm., operación en modo de 8 bits, o de 4 bits.

La configuración propuesta permite el deshidratado de láminas de alimentos que son colocados en charolas en la cámara de deshidratado del equipo. La temperatura de operación de la cámara es de 35 a 45°C, donde el principal suministro de energía es solar, cuyo aire caliente en el colector es de 20 a 40°C y en situaciones de baja radiación solar, el suministro de energía es eléctrica aplicada al banco de resistencias y ventilador, para mantener la temperatura de la cámara de deshidratación en el intervalo deseado. En resumen, el usuario incrementa o disminuye la temperatura de operación de la cámara de deshidratado.

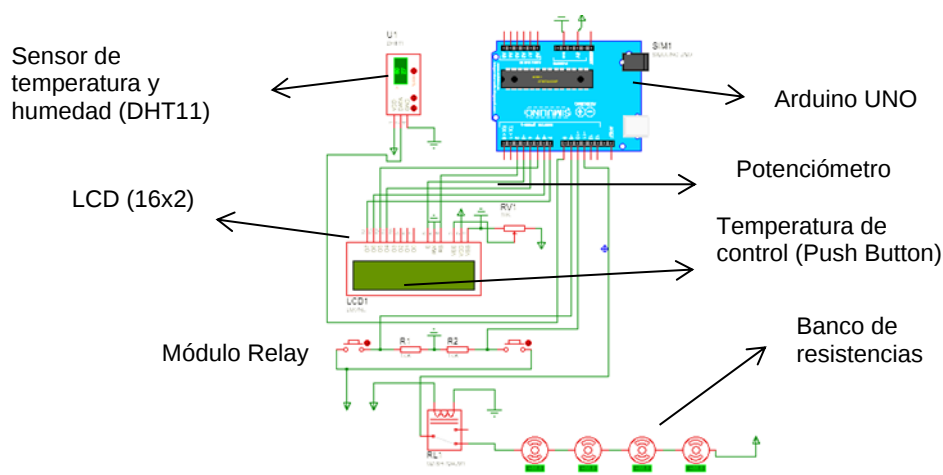


Figura 6. Circuito de Control de temperatura y humedad on-off (Mojica et al. 2018).

9. Caracterización del proceso de deshidratado y operación del equipo

El experimento se realizó en las instalaciones del ICAT (terracea tercer nivel) a la intemperie, se llevó a cabo en un lapso de 5 horas en horario de 11:30 a 16:30 horas. Los alimentos utilizados fueron haba, frijol y garbanzo. La radiación solar se obtiene de los registros de la estación meteorológica de Ciudad Universitaria UNAM, los datos se registraron en una tabla para su posterior análisis.

El tiempo de operación de los sistemas varía de acuerdo con: el alimento a deshidratar, el corte o reducción de partícula del alimento, la temperatura ambiente, la velocidad del aire (convección natural), la convección forzada, el área de entrada.

Las legumbres fueron sometidas al proceso de secado en tres equipos: deshidratador solar, deshidratador híbrido y deshidratador de charolas que es un equipo de 10 charolas (Industrial Avantco), los dos primeros fueron diseñados y manufacturados por el grupo de Ingeniería de Proceso en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT-UNAM). Se decidió comparar el deshidratador desarrollado con un deshidratador solar y de charolas, con el fin de comparar la eficiencia del equipo.

9.1 Análisis de productos

9.1.1 Dimensiones

Entre mayor sea el área expuesta al flujo de aire, el proceso de transferencia de calor y masa se dará de una manera más rápida, por lo que es de gran importante tomar en cuenta el espesor de las fracciones de materia prima para que el proceso sea más ágil y lograr de esta manera un deshidratado de calidad y con menor tiempo (Blanco y Valdecabres, 2016). Se tomaron las dimensiones del producto conforme avanza el proceso utilizando un pie de rey registrando tanto medida inicial como final.

9.1.2 Masa

La masa es una medición de la cantidad de materia en un objeto, la masa de un alimento es constante y no depende de su ubicación, para el experimento se tomaron los datos de masa inicial y a lo largo del proceso de deshidratado se toman nuevamente los valores para obtener y comprobar la disminución de la humedad en el producto y obtener la difusividad efectiva. Se utilizó una balanza analítica de laboratorio.

9.1.3 Humedad

El análisis de humedad de las muestras se realizó por medio de un analizador de humedad infrarrojo *MA37 Sartorius* colocando 5 g de producto.

9.1.4 Actividad de agua.

Se utilizó un medidor de actividad de agua (a_w) *AquaLab 4TE*, siguiendo la metodología de los sensores de punto de rocío.

9.2 Parámetros de operación del equipo

9.2.1 Flujo de aire.

Se utilizó un anemómetro digital *AIMO meter* de hélice externa para medir las velocidades del flujo de aire mostrado, el dato obtenido de velocidad en los prototipos permite realizar los cálculos del flujo másico de aire ($\dot{m} = \rho * V * A$), que proporciona las herramientas para obtener el calor suministrado y la eficiencia de los dispositivos.

9.2.2 Temperatura y humedad

Se registró la temperatura de la cámara de deshidratación.

9.2.3 Eficiencia del sistema

La eficiencia de los sistemas se estima siguiendo el modelo de Amer *et al* (2009).

a) Convección Natural

$$\frac{\dot{m}_{a,nat} \cdot C_{e,aire} \cdot (T_i - T_o)}{A_c \cdot I} \quad (1)$$

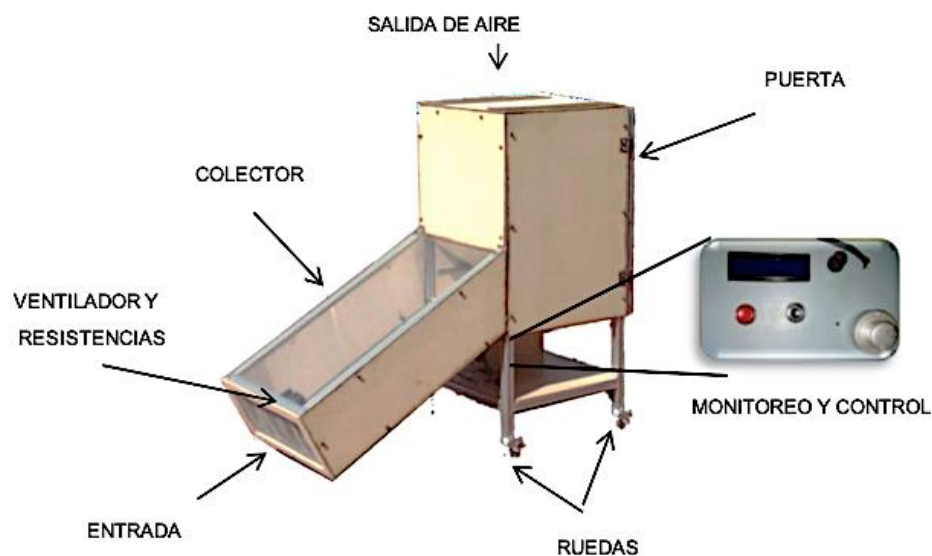
b) Convección Forzada

$$\frac{\dot{m}_{a,forz} \cdot C_{e,aire} \cdot (T_i - T_o)}{A_c \cdot I + Q_{sum}} \quad (2)$$

10. Resultados

10.1 Prototipo de un equipo híbrido de deshidratado de alimentos

El equipo se desarrolló, construyó e instaló en el laboratorio del grupo de Ingeniería de Proceso, el sistema cuenta con cuatro ruedas para permitir su desplazamiento hacia la terraza del ICAT. En la figura 7 se muestra el equipo y su instalación, así como los sistemas de colector, cámara de deshidratado y monitoreo y control.



a)



b)



c)

Figura 7. Prototipo construido e instalado. a) Sistemas principales del equipo. b) Colector y sistema de monitoreo y control. c) Cámara de deshidratado.

10.2 Eficiencia

En la Tabla 2 se observa que el deshidratador solar tuvo un 22.22% de eficiencia promedio obtenida del deshidratado de todas las legumbres, dato que está dentro del intervalo (10-50%), dependiendo del modo de funcionamiento y tipo de deshidratador (Roa y Ortega, 2011), no obstante, la eficiencia fue menor debido a que el deshidratado de las muestras no llegó a completarse en un solo día de, por lo que, éste es interrumpido durante la noche para continuar hasta la mañana del día siguiente y como consecuencia se tiene un enfriamiento y rehidratación lo que contribuye a disminuir la eficiencia del proceso y el aumento del tiempo total para tener el producto terminado.

El deshidratador solar híbrido presentó una eficiencia cuatro veces mayor que el deshidratador solar y un día de ganancia, debido al banco de resistencias, donde además de la energía solar se usa otra fuente auxiliar de energía brindando una buena alternativa para mejorar el proceso de deshidratado únicamente solar (Ekechukwua y Norton, 1999; Gudiño, 2016).

Cabe señalar que esta eficiencia refiere a las condiciones de operación en la cámara de deshidratación. Este 94.31% es un valor alto comparándolo con otros estudios sobre deshidratadores híbridos, Sierra y Pérez (2016) obtuvieron una eficiencia del 65.65% en la deshidratación de yuca, además señala que López (2011) alcanzó una eficiencia en el deshidratado de 60%, Boughali *et al.*, (2009) reporta una cinética de deshidratado realizada en un deshidratador híbrido solar-eléctrico para jitomate con una eficiencia de 31%, Amer *et al.*, (2009) con un deshidratador híbrido para bananas alcanzó un 37.4%.

En cuanto al deshidratador de charola presentó el doble de eficiencia que el de convección natural (deshidratador solar), pero está un 40% debajo del de convección forzada, esta eficiencia se obtiene dependiendo de la temperatura del horno, aunque el tiempo de secado es menor en comparación a los dos primeros. Perry y Green (2001) indican que la eficiencia térmica de un deshidratador de bandejas oscila entre 20 y 50% según la temperatura de secado utilizada y la humedad del aire.

El sistema híbrido tuvo un tiempo promedio de operación de 5.5 horas durante los experimentos, donde se utilizaron cuatro resistencias con un consumo de potencia de 1600 W, teniendo un consumo de energía de 35.20 kW·h en los días de experimentación, lo que representa un costo promedio de \$24.00 MXN, de acuerdo con la tarifa de consumo doméstico de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Tabla 2. Eficiencia de los equipos de secado.

Variable	Deshidratador Solar	Deshidratador solar híbrido	Deshidratador de charolas
Eficiencia (%)	22.22	94.31	58.49
Tiempo de secado aproximado	3 días	2 días	11-18 oras

10.3 Registro de temperatura

En la figura 10 se muestra el registro de temperaturas durante el proceso de deshidratación híbrido durante dos días de funcionamiento del equipo. En la figura 10a) el sistema tiene un precalentamiento antes de ingresar el producto a la cámara de secado, por lo que al inicio del proceso la temperatura fue de 43 °C siguiendo un comportamiento lineal hasta los 47 °C, manteniendo un intervalo de temperaturas entre 47 y 48 °C, en la figura 10b) se observó una temperatura inicial de 27 °C sin precalentamiento, cuando se activan las resistencias la temperatura aumentó a 43 °C, y se mantuvo a un valor constante de 48 °C, en la figura 10c) se tiene un precalentamiento del dispositivo con una temperatura de 38 °C, siguiendo un comportamiento lineal hasta una temperatura de 45 °C, y varía entre los 46 y 44 °C. Finalmente, en la figura 10d) se observó un incremento lineal desde una temperatura inicial de 26 °C hasta 47 °C, se mantuvo constante esta temperatura.

La diferencia que presenta la figura “c y d” respecto a las dos anteriores radica en el funcionamiento del control electrónico de temperatura, las fluctuaciones que se presentan las figuras se deben a la activación de las resistencias cada 10 minutos durante 5 minutos a lo largo del proceso, no se tenía el control automático para el experimento; sin embargo,

en las últimas figuras se cuenta con el control automático, donde se establece una temperatura de control, y al detectarse una temperatura por debajo de la establecida en el dispositivo se activarán las resistencias manteniendo así una temperatura constante a lo largo del experimento.

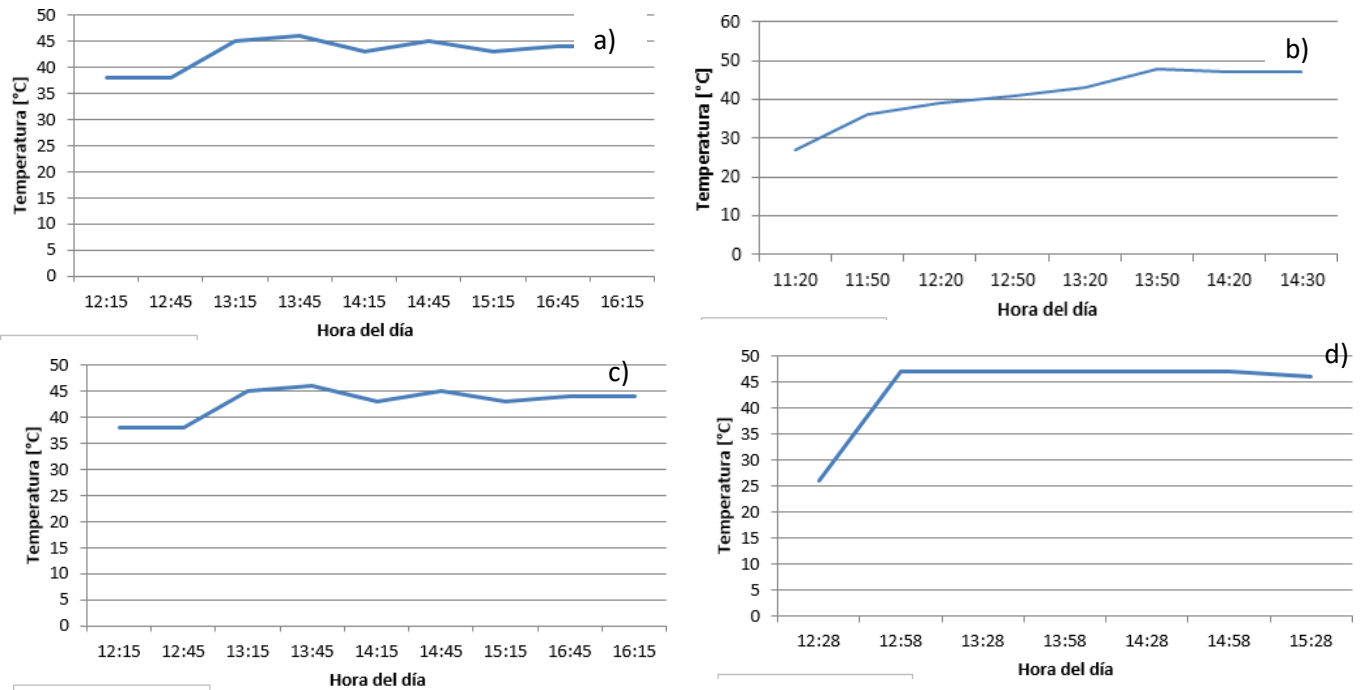


Figura 10. Registro de temperaturas del Deshidratador Asistido. a) día 1, b) día 2 sin control c) día 1 d) día 2 con control (Mojica et al. 2018)

10.4 Dimensiones del alimento y características morfológicas

10.4.1 Garbanzo

GARBANZO

Apariencia: Redondo irregular
Color: Tostado amarillo-crema claro
Tamaño: Medio

Crudo	Cocido	Seco
		
Largo: 12.1 ± 0.5 mm Ancho: 9.0 ± 0.2 mm Espesor: 9.1 ± 0.4 mm	Largo: 16.4 ± 0.1 mm Ancho: 11.6 ± 0.9 mm Espesor: 12.5 ± 0.3 mm	Largo: 9.7 ± 0.4 mm Ancho: 9.9 ± 0.6 mm Espesor: 9.9 ± 0.9 mm

10.4.2 Haba

HABA

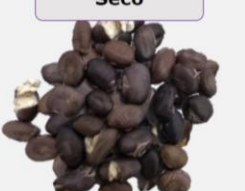
Apariencia: Redondo de riñón
Color: Tostado amarillo-verde claro
Tamaño: Grande

Crudo	Cocido	Seco
		
Largo: 25.6 ± 1.2 mm Ancho: 17.5 ± 2.2 mm Espesor: 6.2 ± 0.7 mm	Largo: 30.8 ± 2.9 mm Ancho: 20.6 ± 1.7 mm Espesor: 12.0 ± 1.0 mm	Largo: 24.5 ± 0.8 mm Ancho: 13.9 ± 1.1 mm Espesor: 5.9 ± 1.4 mm

10.4.3 Frijol

FRIJOL

Apariencia: Forma de riñón
Color: Negro
Tamaño: Medio

Crudo	Cocido	Seco
		
Largo: 8.9 ± 0.3 mm Ancho: 6.2 ± 0.3 mm Espesor: 4.8 ± 0.2 mm	Largo: 13.8 ± 0.7 mm Ancho: 8.6 ± 0.5 mm Espesor: 6.2 ± 0.2 mm	Largo: 8.1 ± 0.0 mm Ancho: 5.8 ± 0.1 mm Espesor: 4.5 ± 0.3 mm

10.5 Humedad y a_w

El valor de a_w (en el intervalo de 0.2 a 0.3) donde se considera la humedad de monocapa (W_0), representa el contenido de humedad donde se minimizan las reacciones bioquímicas (Ramírez-Miranda *et al.*, 2014). El a_w que favorece el crecimiento de mohos y levaduras es de aproximadamente 0.61 con el límite inferior para el crecimiento de mohos micotoxigénicos a 0.78 (Fontana, 1998) por lo que las legumbres en crudo y en harina presentan valores inferiores que impiden crecimiento microbiano. Mientras más cercano a 1.0 es el valor de a_w mayor será la inestabilidad del alimento, por tal motivo, durante el tratamiento de secado se llegó a valores menores de 0.5.

Las muestras crudas cumplen con lo establecido en la norma del CODEX STAN 171-1989 y la NMX-FF-038-SCFI-2013 para frijol, mientras que, para las muestras cocidas, se observó un aumento por la absorción de agua e hinchamiento de los cotiledones (Enjamio *et al.*, 2017), además de que las semillas son más tiernas y aromáticas. Para el caso de las harinas, se observan que todas estuvieron por debajo del límite máximo (15%). Estos contenidos de humedad son de acuerdo con la especificación de la NOM-247-SSAI-2008.

Tabla 3. Humedad y a_w de leguminosas crudas, cocidas y deshidratadas

Legumbre	Humedad (%)	a_w (24.94±0.15 °C)
Garbanzo		
Crudo	8.32±0.33	0.45±0.00
Cocido	47.97±1.64	0.98±0.01
Deshidratada	3.66±0.15	0.35±0.04
Haba		
Cruda	9.85±0.73	0.56±0.01
Cocida	54.52±2.64	0.98±0.01
Deshidratada	8.06±0.84	0.34±0.03
Frijol negro		
Crudo	11.37±0.40	0.61±0.00
Cocido	62.07±3.46	0.98±0.01
Deshidratada	6.51±0.36	0.31±0.00

10.6 Difusividad efectiva

En la Tabla 4, se puede observar que a mayor temperatura de deshidratado mayores son las velocidades, de esta manera, el aumento de la temperatura favoreció la transferencia de masa y como consecuencia el aumento de la difusividad efectiva (Giraldo-Zuniga *et al.*, 2010; Mabellini *et al.*, 2010; Perea-Flores *et al.*, 2012).

Tabla 4. Velocidad de deshidratado en legumbres por deshidratador solar, solar-híbrido y de charola.

Difusividad Específica (m ² /s)			
Muestra	Deshidratador Solar	Deshidratador híbrido	Deshidratador de charola
Garbanzo	1.24E-09	1.38E-09	1.63E-09
Haba	9.42E-10	1.35E-10	2.09E-09
Frijol negro	4.31E-10	7.20E-10	1.44E-09

La difusividad efectiva es una propiedad de transporte influenciada por la temperatura, frecuentemente se considera constante durante el procesado a una misma temperatura, aunque también existen otros factores que pueden influir en mayor o menor medida en ella, tales como su estructura, la composición y la humedad de las muestras, dado que cambia la microestructura del alimento durante la deshidratación, en algunos casos esto da lugar a que se observen cambios en la difusividad efectiva (Clemente, 2003), por tal motivo, las difusividades efectivas obtenidas tanto en el deshidratador solar e híbrido varían entre ellas, ya que, el deshidratado se realizó durante un periodo aproximado de las 12:00 p.m. a 5:00 p. m. para aprovechar las horas donde se presentó la mayor radiación solar. Sin embargo, el deshidratador de charolas no necesitó de la energía natural, por lo que las difusividades efectivas fueron mayores que las de los deshidratadores. Los valores obtenidos en este trabajo están dentro del orden de magnitud (10^{-9} a 10^{-11}) para los alimentos deshidratados (Saravacos & Maroulis, 2001; Bravo *et al.*, 2009; Perea-Flores *et al.*, 2012). Clemente (2003) cita algunos autores que han utilizado esta metodología para determinar la difusividad efectiva en distintos productos agroalimentarios: yogur (Kim y Bhowmik, 1995), crackers (Kim y Okos, 1999), pimiento (Ade-Omowaye *et al.*, 2002).

11 Conclusiones

- Se diseñó, construyó y caracterizó un prototipo, que opera en intervalo de temperatura y humedad determinadas.
- Se realizó el deshidratado de garbanzo, haba y frijol negro en los tres sistemas (deshidratador-solar, deshidratador-híbrido y un deshidratador de charola). Las características finales de las muestras son similares, la diferencia es el tiempo de operación para alcanzar la actividad acuosa deseada, siendo inferior a 0.5
- La eficiencia del sistema híbrido es cuatro veces mayor que el sistema de convección natural.
- Las muestras deshidratadas en el deshidratador de charolas fueron las primeras en secarse debido a que la temperatura fue mayor en comparación con el deshidratador solar e híbrido.

Referencias Bibliográficas

Ade-Omowaye, B.O., Rastogi, N.K., Angersbach, A. y Knorr D. 2002. **Osmotic dehydration of bell peppers: influence of high intensity electric field pulses and elevated temperature treatment**. Journal of Food Engineering 54: 35-43

Almada, M., Stella, M., Machaín-Singer, M., y Pulfer, J. 2005. Guía de uso de secadores para frutas, legumbres, hortalizas, plantas medicinales y carnes. Asunción, Paraguay.
<http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/ED-Guiasecaderosolar.pdf>

Amer, B.M.A., Hossain, M.A. y Gottschalk, K. 2009. “**Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana**”. Energy Conversion and Management. 51 (4): 813-820.

Blanco, L. y Valdecabres, L. 2016. “**Guía para el desarrollo de proyectos de secado solar en comunidades rurales**”. Energía Sin Fronteras.Universidad de Navarra. Recuperado en:
<https://energiasinfronteras.org/attachments/enlaces/GuiaSecadoV3.pdf>

Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., y Bech- ki, D. 2009. **Crop drying by indirect active hybrid solar- Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara**. Solar Energy, 83(12):2223-2232.

Bravo, J., Sanjuán, N., Ruales, J. y Mulet, A. 2009. **Modeling the dehydration of apple slices by deep fat frying**. Drying Technology: An International Journal, 27 (6), 782-786.

Clemente, P. G. 2003. **Efecto de la contracción en la cinética de secado de músculos de jamón**. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Tecnología de Alimentos. Valencia

CODEX STAN 171-1989 CODEX ALIMENTARIUS. Codex Standard 171-1989. NORMA PARA DETERMINADAS LEGUMBRES

Cruz G. K. y Jimenéz-Pérez, B. 2016. “**Estudio de los cambios durante la deshidratación de manzana Red Delicious en un secador solar y un secador de charolas**”. Universidad Nacional Autónoma de México, Cuautitlán Izcalli. (Tesis de licenciatura).

Delgado-Andrade, C.; Olías, R.; Jiménez-López, J. y Clemente, A. 2016. **Aspectos de las legumbres nutricionales y beneficiosos para la salud humana**. Arbor, 192 (779): a313

Ekechukwua O. V. y Norton B. 1999. **Review of Solar Energy Drying Systems II: an Overview of Solar Drying Technology**. Energy Conversion & Management 40, p. 615-655.

Enjamio, P. L., Rodríguez, A. P., Valero, G. T., Ruíz, M. E., Ávila, T. J. M. y Varela, M.G. 2017. **Informe sobre Legumbres, Nutrición y Salud**. [En línea] Disponible en: http://www.aecosan.msssi.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/noticias/2017/Informe_Legumbres_Nutricion_Salud.pdf

Fontana, A. 1998. **Water activity: why it is important for food safety**. Proceedings of the First NSF International Conference on Food Safety. pp. 177-185.

Giraldo-Zuniga, A. D., Arévalo-Pinedo, A., Ferreira, S. A., Ferreira, S. P., Valdes-Serra, J. C. y Pavlak, M. C. de M. 2010. **Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas**. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 30(1): 179-182.

Gudiño A. D. 2016. **Estudio del comportamiento térmico de un secador solar híbrido**. En XL Semana Nacional de Energía Solar. Puebla, México: Asociación Nacional de Energía Solar. <https://rei.iteso.mx/handle/11117/5320>

Hernández, J. y Quinto, P. 2005. **Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso científica**. Científica 9(2): 63-71

Ingeniería sin fronteras, 2016. **Ingeniería sin Fronteras-Deshidratadores Solares**. (2016). "Tecnologías Apropriadas para la Transformación Agropecuaria". Recuperado de: <https://esf-cat.org/wp-content/uploads/2017/06/Manual-Tecnologia-para-la-Transformacion-Agropecuaria-Deshidratador-Solar-ESF-1.pdf>

Kim, M.H y Okos, M.R. 1990. **Some physical, mechanical, and transport properties of crackers related to the checking phenomenon**. Journal of Food Engineering 40, 189–198.

Kim, S. y Bhowmik, R. 1995. **Effective moisture diffusivity of plain yogurt undergoing microwave vacuum drying**. Journal of Food Engineering. 24 (1):137-148.

López, E. 2011. **Caracterización y evaluación de la eficiencia térmica y de**

secado en un deshidratador híbrido (solar - gas). Tesis de maestría. Instituto politécnico nacional, Santa cruz Xoxocotlán, Oaxaca.

Mabellini, A., Vullioud, M. B., Márquez, C. A. y De Michelis, A. 2010. **Kinetic drying experimental data and mathematical model for sweet cherries (Pronus avium).** Journal of Food Process Engineering, 33(6), 1115-1128.

Mojica, D, Velázquez, E., Bazán, M.A, Córdova-Aguilar, M.S y Martínez-Arellano, I. 2018. **Desarrollo de un deshidratador híbrido para la producción de suplementos alimenticios y carbón activado.** SOMI Congreso de instrumentación sn_SOMI33_094.

NMX-FF-038-SCFI-2013. PRODUCTOS ALIMENTICIOS NO INDUSTRIALIZADOS PARA CONSUMO HUMANO - FABACEAS – FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) - ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA (CANCELA A LA NMX-FF-038-SCFI- 2002).

NORMA Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008, Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba.

Perea-Flores, M. J., Garibay-Flebes, V., Chanona-Pérez, J. J., Calderón-Domínguez, G., Méndez-Méndez, J. V., Palacios-González, E. y Gutiérrez-López, G. F. 2012. **Mathematical modelling of castor oil sedes (*Ricinus communis*) drying kinetics in fluidized bed at high temperatures.** Industrial and Products, 38, 64-71.

Perry, R. H. and Green, D. W. 2001. Perry's Chemical Engineers' Handbook, Seventh Edition, Editorial McGraw Hill, USA, Section 12.

Ramírez-Miranda, M., Cruz y Victoria, M.T., Vizcarra-Mendoza, M.G., Anaya-Sosa. M. 2014. **Determinación de las Isotermas de sorción y las propiedades termodinámicas de harina de maíz nixtamalizada.** Revista Mexicana de Ingeniería Química. 13 (1): 165-178.

Roa Marín G. L. y Ortega Torres D. B. 2011. **Diseño y Construcción de un Secador Solar por Convección de Aire Caliente Automatizado de Pequeña Escala, para el Secado de café.** Universidad Nacional de Loja. Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional de Loja.

Saravacos, G. D. y Maroulis, Z. B. 2001. **Transport properties of foods**, Marcel and Dekker Inc., New York, United States of America.

Sierra, M.J. y Pérez, Omar A. 2016. **Evaluación y Optimización de Secador Híbrido para Yuca**. Información tecnológica, 27(2): 77-86
m