UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DESHIDRATADOR HÍBRIDO PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS: CONSTRUCCIÓN, EVALUACIÓN Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO

TESIS

Que como requisito parcial
para obtener el grado de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

Presenta:

M. I. ALBERTO MAURICIO SANTOS HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO
MEXICO
DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

Bajo la supervisión de: DR. ABRAHAM ROJANO AGUILAR

Chapingo, México. Febrero de 2017

DESHIDRATADOR HÍBRIDO PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS: CONSTRUCCIÓN, EVALUACIÓN Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO

Tesis realizada por el **M. I. Alberto Mauricio Santos Hernández** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____
DR. ABRAHAM ROJANO AGUILAR

ASESOR: _____
DR. AGUSTIN RUIZ GARCIA

ASESORA: _____
DRA. RAQUEL SALAZAR MORENO

LECTOR EXTERNO: _____
DR GILBERTO ÁNGEL NAVAS GÓMEZ

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS ---------- v

ÍNDICE DE FIGURAS ---------- vi

1. INTRODUCCIÓN GENERAL ---------- 1
1.1 Objetivo general ---------- 3
1.2 Objetivos particulares ---------- 3
1.3 Organización de la tesis ---------- 4

2. ESTADO DEL ARTE EN TECNOLOGÍA DE DESHIDRATADORES SOLARES HÍBRIDOS PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS ---------- 5
Resumen ---------- 5
2.1 Introducción ---------- 5
2.2 Deshidratadores solares ---------- 8
2.2.1 Directos ---------- 8
2.2.2 Indirectos ---------- 9
2.3 Deshidratadores solares híbridos ---------- 12
2.4 Discusión ---------- 15
2.5 Conclusiones ---------- 16
2.6 Literatura citada ---------- 17

3. CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN DESHIDRATADOR HÍBRIDO PORTÁTIL PARA PRODUCTOS AGRICOLAS ---------- 23
Resumen ---------- 23
3.1 Introducción ---------- 24
3.2 Materiales y métodos ---------- 25
3.2.1 Construcción del prototipo ---------- 28
3.2.2 Modelación matemática del proceso ---------- 29
3.2.3 Cinética de deshidratado ---------- 31
3.2.4 Propiedades termodinámicas ---------- 32
3.2.5 Consumo de energía ---------- 33
3.2.6 Eficiencia energética ---------- 34
3.2.7 Costo del prototipo ---------- 34

3.3 Resultados y discusión ----34
3.3.1 Construcción del prototipo ----34
3.3.2 Prueba de funcionamiento----42
3.3.3 Modelación matemática del proceso ----44
3.3.4 Cinética de deshidratado y propiedades termodinámicas----45
3.3.5 Costos del prototipo----45
3.4 Conclusiones ----46
3.5 Literatura citada ----47

4. MODELACIÓN MATEMÁTICA Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DURANTE EL DESHIDRATADO DE HOJAS DE STEVIA ----51
Resumen----51
4.1 Introducción----52
4.2 Materiales y métodos ----53
4.2.1 Descripción del experimento----53
4.2.2 Análisis estadístico ----54
4.2.3 Modelación matemática del proceso ----55
4.2.4 Cinética de deshidratado----57
4.2.5 Propiedades termodinámicas----60
4.3 Resultados y discusión ----61
4.3.1 Modelación matemática del proceso ----61
4.3.2 Cinética de deshidratado----69
4.3.3 Propiedades termodinámicas----72
4.4 Conclusiones ----73
4.5 Literatura citada ----75

5. CONCLUSIONES GENERALES ----80

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Contenido de humedad y temperatura máxima del deshidratado solar en productos agrícolas (Fudholi et al., 2010)---------- 7
Cuadro 2.2. Clasificación y desarrollo tecnológico de deshidratadores híbridos para productos agrícolas.----------14
Cuadro 3.1. Deshidratadores híbridos de tipo solar-eléctrico para productos agrícolas.----------25
Cuadro 3.2. Modelos evaluados para deshidratar hojas de lechuga.----------30
Cuadro 3.3. Control automático con base en las lecturas de temperatura, ON: ↑, OFF: ↓.----------41
Cuadro 3.4. Registro y control de temperatura de deshidratado en tiempo real. ----------42
Cuadro 3.5. Estadísticos de los modelos de deshidratado de hojas de lechuga. ----------44
Cuadro 4.1. Modelos evaluados para el deshidratado de Stevia. ----------55
Cuadro 4.2. Coeficientes y estadísticos de los modelos de deshidratado de Stevia.----------63
Cuadro 4.3. Constante k, y coeficientes del modelo Midilli a diferentes valores de temperatura (T).----------65
Cuadro 4.4. Correlación del contraste entre la razón de humedad experimental (MR_{exp}) con respecto a la razón de humedad ajustada (MR_{aj}).----------68
Cuadro 4.5. Regresión de los coeficientes de ln(MR) para diferentes temperaturas.----------70
Cuadro 4.6. Difusividad efectiva (D_{eff}) y su ecuación lineal para hojas de Stevia a diferentes tratamientos, °C.----------71
Cuadro 4.7. Propiedades termodinámicas del deshidratado de hojas de Stevia. ----------73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de un deshidratador solar híbrido (Fudholi et al., 2010). ----------12
Figura 3.1. Deshidratador construido y con el mecanismo de calefacción instalado.----------35
Figura 3.2. Distribución de componentes y sensores en la cámara de deshidratado. ----------36
Figura 3.3. Ensamblaje y secuencia de construcción de la cámara de deshidratado. ----------36
Figura 3.4. Cámara de deshidratado y paneles térmicos plegados.----------37
Figura 3.5. Condiciones climáticas y al interior durante la construcción del prototipo.----------38
Figura 3.6. Bandejas de aluminio y distribución en la cámara de deshidratado. ----------39
Figura 3.7. Circulación del aire al interior del equipo de deshidratado.------40
Figura 3.8. Diagrama de componentes y circuito del control de temperatura. ----------40
Figura 3.9. Representación gráfica del control de temperatura en tiempo real. ----------42
Figura 3.10. Hojas de lechuga. Izq. Hojas frescas. Der. Hojas deshidratadas. ----------43
Figura 3.11. Condiciones climáticas y de deshidratado durante el experimento. ----------43
Figura 3.12. Comparación entre la razón de humedad experimental (MR_{exp}) y estimada (MR_{est}) con respecto al tiempo (t) de deshidratado. ----------45
Figura 4.1. Hojas de Stevia antes y después de efectuar el proceso de deshidratado. ----------61

Figura 4.2. Comparación entre la razón de humedad experimental (MR_{exp}) y estimada (MR_{est}) con respecto al tiempo (t) de deshidratado. ----------61
Figura 4.3. Constante k con respecto a la temperatura (T) entre 40 y 80 °C. ----------66
Figura 4.4. Curva de deshidratado modelada con la ecuación 4.20. ---------68
Figura 4.5. Velocidad de dehidratado (DR) con respecto al tiempo (t) en hojas de Stevia a diferente temperatura, 40℃-80℃.----------69

DEDICATORIAS

A mi madre, por estar siempre conmigo y apoyarme cuando de ella he necesitado.

A mi padre, por los valores inculcados para lograr todo lo que me he propuesto.

A mis hermanos, fuente de inspiración que me han dado el ánimo para alcanzar mis metas.

A toda mi familia y seres queridos, por contar con ellos durante estos años.

A mis amigos, que siempre me acompañan y en mi confían.

Con afecto: Mau

AGRADECIMIENTOS

A México, por sus aportaciones para que la educación pública siga existiendo, formándonos para su servicio.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo económico otorgado durante el presente periodo

A la Universidad Autónoma Chapingo por brindarme la formación personal y profesional durante estos años.

A mis compañeros, profesores y al personal del Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la UACh, por dedicarme incondicionalmente su apoyo y experiencia.

A mi comité asesor de tesis por sus atenciones y apoyo durante la elaboración, análisis, y corrección del presente trabajo.

A todos, quienes de diferente manera colaboraron en la revisión y corrección de la tesis, así como en la ejecución de las actividades realizadas.

A Dios, por expresarme una vez más que por difícil que sea el camino siempre existe una esperanza de salir adelante.

Gracias por siempre: Mauricio

DATOS BIOGRÁFICOS

Nombre	Alberto Mauricio Santos Hernández
Fecha de Nacimiento	Enero 1986
Lugar de Nacimiento	Huauchinango, Puebla
No. Cartilla Militar	8639898
CURP	SAHA860123HPLNRL04
Profesión	Maestría en Ingeniería Agrícola y uso Integral del Agua
Cedula Profesional	7986109
Bachillerato	Preparatoria Agrícola - Universidad Autónoma Chapingo
Licenciatura	Ingeniería Mecánica Agrícola - Universidad Autónoma Chapingo
Maestría	Ingeniería Agrícola y uso Integral del Agua - Universidad Autónoma Chapingo
Áreas de Trabajo	Tecnología y uso de fuentes renovables de energía, diseño y simulación computacional, electrónica y construcción de máquinas agrícolas

DESHIDRATADOR HÍBRIDO PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS: CONSTRUCCIÓN, EVALUACIÓN Y MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL PROCESO
HYBRID DRYER FOR AGRICULTURAL PRODUCTS: CONSTRUCTION, EVALUATION AND MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS

Alberto Mauricio **Santos Hernández**[1], Abraham **Rojano Aguilar**[2]

RESUMEN GENERAL

El uso de fuentes alternas de energía para deshidratar alimentos es una opción viable para procesar dichos productos. Sin embargo, estas tecnologías dependen de la climatología del lugar y las características constructivas del equipo, por lo cual se requiere desarrollar dispositivos para controlar el proceso. En la primera etapa de la investigación se construyó y evaluó un deshidratador híbrido portátil, solar-eléctrico, para productos agrícolas, que aprovecha la radiación solar y la convección natural mediante un sistema de calentamiento indirecto del aire, que combina y recircula el calor generado por la radiación y por una calefacción eléctrica. El ingreso del aire es generado por un sistema de ventilación hacia la cámara de deshidratado, donde un control automático estabiliza la temperatura al calentar o enfriar el sistema. Para evaluar el prototipo se deshidrataron hojas de lechuga manteniendo una temperatura constante. Los datos experimentales se utilizaron para estimar el tiempo de deshidratado del producto con base en la modelación matemática del proceso. Con este equipo las hojas se deshidrataron en menor tiempo respecto al método tradicional. Al controlar la temperatura se obtuvo un deshidratado uniforme, independientemente de las variaciones de radiación durante el experimento. El prototipo está dirigido a pequeños y medianos productores, su costo es accesible comparado con otros equipos que cuestan hasta el triple del valor estimado. En el siguiente trabajo se estudió la cinética de deshidratado en hojas de *Stevia* para nueve condiciones de temperatura, determinando los valores de difusividad efectiva, el factor de Arrhenius y la energía de activación para efectuar el deshidratado. Para estimar el comportamiento del proceso los datos se ajustaron a 8 modelos de deshidratado, donde el modelo Midilli presentó el mejor ajuste estadístico. Finalmente, se obtuvieron los valores de entropía, entalpia y energía libre de Gibbs para deshidratar el producto.

Palabras clave: Deshidratado, fuentes alternas, energía solar, ajuste de modelos, propiedades termodinámicas.

ABSTRACT

The use of alternate sources of energy to dry foods is a viable option for processing such products. However, these technologies depend on the climatology of the place and the constructive characteristics of the equipment, for which it is necessary to develop devices to control the process. In the first stage of the research, a portable hybrid dryer, solar-electric, for agricultural products was constructed and evaluated, which uses solar radiation and natural convection by means of an indirect air heating system, which combines and recirculates the heat generated by the radiation and by electric heating. The air intake is generated by a ventilation system and directed towards the drying chamber, where an automatic control stabilizes the temperature by heating or cooling the system. To evaluate the prototype, lettuce leaves were dried maintaining a constant temperature. The experimental data were used to estimate the drying time of the product based on the mathematical modeling of the process. With this equipment the leaves were dried in less time with respect to the traditional method. By controlling the temperature, a uniform drying was obtained, regardless of the radiation variations during the experiment. The prototype is aimed at small- and medium-size producers; its cost is accessible compared to other equipment that costs up to triple the estimated value. In the following paper the drying kinetics in *Stevia* leaves were studied for nine temperature conditions, determining the values of effective diffusivity, Arrhenius factor and activation energy to make the drying. To estimate the behavior of the process, the drying data were fitted to 8 drying models, where the Midilli model presented the best statistical fit. Finally, entropy, enthalpy and Gibbs free energy values were obtained for drying the product.

Keywords: Drying, alternative sources, solar energy, model adjustment, thermodynamic properties.

[1] Tesista
[2] Director

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Existe una creciente demanda alimentaria y un desabasto notable a nivel global, que requiere el desarrollo de tecnologías de conservación de alimentos. Diferentes productos agrícolas son cosechados cuando alcanzan un determinado grado de maduración a los que se les aplican diversos métodos térmicos de conservación como congelación, enfriamiento o deshidratado.

En los países en desarrollo más del 80% de los alimentos es producido por pequeños productores quienes deshidratan los alimentos a cielo abierto obteniendo un producto de menor calidad debido a la contaminación, climatología, infestaciones y decoloración por incidencia directa de la luz solar (Karim y Hawlader, 2006; Murthy, 2009; Prasad *et al*., 2006).

La técnica de deshidratado es un antiguo método de conservación de alimentos, donde se desarrolla un proceso térmico de transferencia de calor y humedad, que permite largos periodos de almacenamiento y es posible acceder a ellos fuera de temporada de cosecha. Esta etapa es de gran importancia en el proceso de producción (Bennamoun y Belhamri, 2003). Además, se minimizan los requerimientos de embalaje y se reducen los costos de transportación.

El proceso es simple, seguro y fácil de implementar para conservar el producto del deterioro biológico producido por bacterias u hongos. Al incrementar la temperatura se reduce la duración del deshidratado, sin embargo, las condiciones climáticas de temperatura y humedad influyen en el desarrollo del proceso (Krokida y Maroulis, 2001; Mujumdar, 1995; Rojano Aguilar *et al*., 2011).

El deshidratado requiere de sistemas sustentables que utilicen fuentes renovables de energía para alcanzar dichos objetivos. En el caso de hierbas y plantas, los límites de temperatura de deshidratado son importantes y varían de acuerdo al principio activo o destino al cual se enviarán para su aprovechamiento.

El uso de deshidratadores solares híbridos se presenta como una alternativa ante este planteamiento, debido a que operan con diferentes fuentes de energía.

Diversos deshidratadores híbridos utilizan combustibles fósiles y energía eléctrica pero el precio es elevado en zonas rurales de los países en desarrollo (Prasad *et al*., 2006), por lo que se requiere de mecanismos de control que disminuyan el consumo eléctrico.

Por tal motivo se propone un deshidratador solar híbrido que combina la energía solar con la energía eléctrica para incrementar la temperatura en una cámara de deshidratado y evitar posibles pérdidas postcosecha por contaminación o deterioro biológico.

La cinética de deshidratado es un fenómeno complejo y requiere de modelos fiables para estimar el comportamiento del proceso. Los modelos deben ser lo suficientemente precisos y capaces de estimar la velocidad de pérdida del agua y puedan describir el comportamiento del proceso en cada producto bajo determinadas condiciones de deshidratado. Diversos autores han estudiado el proceso de deshidratado de los materiales alimenticios (frutas, vegetales, mariscos y otros productos agrícolas) y han propuesto diversos modelos matemáticos de deshidratado en capa fina o delgada, los cuales contribuyen a entender las características de deshidratado de los productos y a estimar los tiempos de deshidratado. Madamba *et al.* (1994) establecen que los modelos matemáticos se ocupan también para diseñar o modificar sistemas existentes de deshidratado, incluso para controlar el proceso.

Existen tres tipos de modelos: teóricos, semi-empíricos y empíricos. Los modelos teóricos, solo consideran la resistencia interna, la transferencia de calor y humedad entre el producto y el aire caliente. Los segundos se derivan de la simplificación del modelo difusivo de la Segunda Ley de Fick y los modelos empíricos se derivan de relaciones estadísticas y consideran sólo la resistencia externa a la transferencia de humedad entre el producto y el aire, y no dependen de la geometría y difusividad de masa.

Algunos modelos semi-empíricos utilizados para describir el proceso de deshidratado son: Page, Henderson y Pabís, Logarítmico y Midilli-Kucuk (V.T. Karathanos y Belessiotis, 1999; Midilli, Kucuk, y Yapar, 2002; Yaldiz, Ertekin, y Uzun, 2001).

El deshidratador híbrido, solar-eléctrico, propuesto, en conjunto con los métodos de modelación matemática, se presentan como resultado de una investigación de diversos equipos y métodos existentes para analizar el proceso.

Por su facilidad de operación, este equipo podrá implementarse para deshidratar diferentes productos como frutas, hierbas, vegetales y cárnicos, en zonas de pequeña y mediana producción en México, así como a nivel institucional para pruebas de campo.

1.1 Objetivo general

- Desarrollar un deshidratador híbrido para productos agrícolas principalmente granos, plantas medicinales, aromáticas y frutos, para atender a pequeños y medianos productores en diversas regiones de México donde la mayor parte de su superficie posee condiciones favorables de radiación solar.

1.2 Objetivos particulares

- Construir, evaluar y modelar matemáticamente un deshidratador híbrido, solar-eléctrico, para productos agrícolas con el fin de incrementar el aprovechamiento de la energía solar durante el proceso y reducir los costos de mantenimiento y operación.
- Estudiar la cinética de deshidratado y las propiedades termodinámicas de hojas de *Stevia* bajo diferentes condiciones de temperatura, así como modelar matemáticamente el proceso.

1.3 Organización de la tesis

El reporte de investigación se encuentra dividido en 3 capítulos, cada uno con diferente contenido y conclusiones.

En el ***Capítulo 2*** se describe el concepto de deshidratado y los tipos de deshidratadores solares, haciendo énfasis en los sistemas híbridos existentes de acuerdo a la revisión de literatura. La descripción de un deshidratador solar híbrido para productos agrícolas se muestra en el ***Capítulo 3*** destacando sus características constructivas y de funcionamiento en condiciones ambientales, curvas de operación, consumo energético y eficiencia del proceso al deshidratar unas muestras de hojas de lechuga. El ***Capítulo 4*** se refiere a la modelación matemática y determinación de las propiedades termodinámicas del proceso de deshidratado de hojas de *Stevia* efectuado en nueve condiciones de temperatura. Finalmente, las conclusiones generales del trabajo se presentan en el ***Capítulo 5***, agregando algunas recomendaciones para futuros trabajos relacionados con el proceso de deshidratado de productos agrícolas.

2. ESTADO DEL ARTE EN TECNOLOGÍA DE DESHIDRATADORES SOLARES HÍBRIDOS PARA PRODUCTOS AGRÍCOLAS

Resumen

Diversos métodos de deshidratado a mediana escala para productos agrícolas se presentan a continuación. Donde los resultados técnicos y económicos muestran la factibilidad del uso de los deshidratadores solares. El deshidratado de productos agrícolas requiere del uso de nuevas tecnologías que permitan ser una alternativa confiable de desarrollo industrial. Los mecanismos solares de deshidratado se logran mejorar al inducir fuentes externas de calefacción o ventilación forzada para mejorar o controlar las condiciones de deshidratado generadas por la radiación solar y convección del aire. A continuación, se muestra una revisión bibliográfica de los deshidratadores solares existentes.

2.1 Introducción

El deshidratado es la forma más común de preservar los alimentos y extender su vida en anaquel (Sarsavadia *et al*., 1999). El deshidratado natural o tradicional se ha llevado a cabo durante mucho tiempo en diversos países tropicales y subtropicales (Jairaj *et al*., 2009). México es un país que recibe en promedio 5 $kWh \cdot m^{-2}$ de energía solar al día (CONUEE, 2016), la cual puede aprovecharse térmica o eléctricamente mediante este tipo de tecnologías.

El deshidratado implica una transferencia de calor entre el producto y la fuente de energía y de masa del contenido de humedad del producto hacía su propia superficie y de ahí al ambiente que le rodea (Ekechukwu y Norton, 1999).

De acuerdo a Sharma *et al*. (2009), una de las principales ventajas de un sistema de deshidratado solar es que el proceso es más eficiente, ya que los alimentos se deshidratan rápidamente y se evitan pérdidas por deterioro después de la cosecha. Además, el proceso es higiénico, ya que al ser un ambiente

controlado se evitan pérdidas por contaminación, y al almacenarse se reduce la posibilidad de desarrollar hongos.

Otro factor de importancia es que los productos obtenidos son saludables, es decir, se retiene la mayoría de sus componentes nutricionales como vitaminas y minerales, además se obtienen productos con mejor sabor y apariencia, lo que incrementa su demanda y provee mejores ingresos a los productores.

Finalmente, el proceso de deshidratado es rentable económicamente, puesto que la energía solar es gratuita y renovable, a diferencia de los combustibles fósiles, incluso usando ambos tipos de energéticos, pero bajo condiciones controladas, se reduce el consumo energético lo que resulta en notables ahorros económicos.

El problema principal del deshidratado solar es que la temperatura del proceso depende de las condiciones climáticas del lugar (Gulandaz *et al*., 2015) y la variación en la intensidad de la radiación solar, debido a esto, la temperatura y la velocidad del aire de deshidratado cambian constantemente, lo que modifica la duración del proceso, generando pérdidas por contaminación microbiana y hongos al procesar el producto en mayor tiempo (Amer y Gottschalk, 2012). Es decir, las condiciones de deshidratado varían de acuerdo con la ubicación geográfica y la época del año en que se lleve a cabo el proceso.

Los deshidratadores híbridos presentan un menor consumo energético debido a que son auxiliados por un control de temperatura que garantizan mayor seguridad y fiabilidad del proceso a un menor costo. Al controlar el proceso se optimiza el uso de la energía y se incrementa la eficiencia del deshidratado en comparación con los sistemas de circulación natural (Weiss y Buchinger, 2012).

En el Cuadro 2.1 se muestran los requerimientos del contenido de humedad, temperatura y duración del proceso de deshidratado de diferentes productos agrícolas, para su posterior almacenamiento y conservación.

Cuadro 2.1. Contenido de humedad y temperatura máxima del deshidratado solar en productos agrícolas (Fudholi *et al*., 2010)

Producto	Contenido de humedad (%)		Temperatura máxima permitida (°C)	Tiempo de deshidratado (h)
	Inicial	Final		
Cebolla	85	6	55	48
Hojuelas de cebolla	80	10	55	24
Aros de cebolla	80	10	55	
Jitomate	95	7	60	36
Guisantes verdes	80	5	60	8–10
Uva	80	15–20		32–40
Manzana	82	11–14	65–70	24–26
Higo	70	20	70	32
Plátano	80	15	70	15
Mandioca	62	17		
Copra	30	5		
Tabaco	90	10		96
Café	65	11		288
Hojuelas de ajo	80	4		48
Chile	80	5		48
Jengibre	80	10		168
Repollo	80	4	65	48
Té	80	3		96
Pimiento	71	13		48
Cúrcuma	80	10		120
Papa en rebanadas	75	13	70	72

2.2 Deshidratadores solares

Los deshidratadores solares se clasifican en cuatro tipos acorde a su principio de funcionamiento: directo, indirecto (de circulación natural y circulación forzada), en modo mixto e híbridos (Fudholi *et al*., 2010).

2.2.1 Directos

En los deshidratadores directos la radiación solar pasa a través de una cubierta transparente de cristal e incide en el producto a deshidratar. La cubierta reduce las pérdidas por convección e incrementa la temperatura de deshidratado.

a) De gabinete

Es una pequeña caja negra usualmente fabricada en madera que mide de longitud el triple de su ancho, y tiene una cubierta de cristal. Cuenta con chimeneas en la parte superior e inferior de la cámara de deshidratado, en su interior cuenta con charolas de aluminio con malla metálica para colocar el producto a procesar. El aire ingresa a través de los agujeros en la parte inferior de la caja, pasa a través del producto calentado por la cubierta y sale en la parte superior de la cámara con la humedad extraída del producto (Panwar *et al*., 2012). La ventaja de estos equipos es que se reducen las pérdidas por contaminación por interferencia humana, animal e insectos (Jairaj *et al*., 2009).

b) De gradillas

Sus proporciones son 2:1 y cuentan con un espesor de 0.4 m, tienen forma de escalinata y están cubiertos a los lados por lámina aislada. La cubierta transparente es de lámina de policarbonato para crear un efecto invernadero. Por lo general tienen tres niveles y cuentan con una compuerta y chimenea de 0.1 por 0.4 m. La base del deshidratador y las paredes entre compartimientos tienen 4 entradas de aire de 8 cm para facilitar la circulación del aire por convección en los tres niveles hasta salir por la chimenea (Jairaj *et al*., 2009).

c) Techado de vidrio

Orientado en dirección S-N, posee una estructura tipo dos aguas. Cuenta con una apertura en la parte inferior del techado (Sharma *et al*., 2009). Las mesas de deshidratado y paredes son obscuras, además posee unos deflectores para controlar la temperatura de deshidratado. Nair y Bongirwar (1994) citado por (Jairaj *et al*., 2009) construyeron un prototipo para deshidratar uvas, donde la temperatura interna alcanzó el doble que la temperatura ambiente a mediodía.

2.2.2 Indirectos

Para evitar decolorar el producto en el deshidratado directo, se utilizan los deshidratadores solares indirectos (Mühlbauer, 1986). En estos sistemas, el producto no está en contacto con la radiación solar debido a que se encuentra aislado en una cámara anexa a los paneles solares térmicos. Existen dos tipos de deshidratadores indirectos: de ventilación natural y ventilación forzada. En los primeros el movimiento del aire se da por circulación natural. A diferencia de los equipos de ventilación forzada donde el aire ingresa hacia la cámara de deshidratado mediante un sistema de ventilación, eléctrico o mecánico.

a) De circulación natural

Convencional. Consta de un colector solar que calienta el aire y circula por convección natural hacia una cámara de deshidratado con charolas, donde está colocado el producto. Además de la cubierta de cristal, el colector posee una lámina absorbedora negra. La cámara de deshidratado tiene una cubierta transparente que protege el producto de agentes externos. El aire calentado ingresa a la cámara de deshidratado y circula a través del producto para extraer la humedad por una salida de aire situada en la parte superior del prototipo (Fudholi *et al*., 2010). Es un método de deshidratado efectivo, eficiente y económico (Eissen *et al*., 1985).

Indirecto con chimenea. Es un deshidratador pasivo, el colector solar se encuentra aislado con una capa de 8 cm para evitar pérdidas de calor. La cámara de deshidratado es de madera y tiene un tubo galvanizado de 0.1 por 0.5 m, en este caso la chimenea agiliza la remoción de humedad del producto (Fudholi *et al*., 2010). Las charolas son manipuladas a través de una compuerta ubicada en la parte trasera de la cámara.

Indirecto con chimenea y almacén de calor. La diferencia con el equipo anterior es que existe una capa aislante debajo del panel, de tierra o arena, la cual minimiza las pérdidas de calor en el panel solar (Sharma *et al*., 2009). Además, se coloca una capa de arena entre el absorbedor y la capa aislante para almacenar el calor generado después de las horas de sol.

b) Circulación forzada

Indirecto de frutas y vegetales. El aire es succionado desde 2 colectores solares de mediana (75 a 80 °C) y baja temperatura (55 a 60 °C) cubiertos con una placa de poliuretano para minimizar las pérdidas por conducción o convección. El aire circula a través de un ventilador eléctrico. La cámara de deshidratado se divide en tres partes: 2/3 son cámaras de media y baja temperatura y 1/3 es de servicio (Jairaj *et al*., 2009).

De invernadero. Actúa como colector solar, está conectado a una cámara de madera interna. El sistema de ventilación y la cubierta forman un colector que incrementa la temperatura hasta 20 °C sobre la temperatura ambiente (Jairaj *et al*., 2009). En este sistema no es viable recircular el aire de deshidratado (Fohr y Arnaud, 1992).

Domo geodésico. Posee una cubierta transparente externa y un absorbedor negro en forma de domo. El aire es inducido al interior por un ventilador durante las horas con mayor radiación donde al calentarse por el sistema absorbedor circula hacia la parte inferior y es forzado a moverse a través de las bandejas y hacia una chimenea situada en la parte superior de la estructura (Jairaj *et al*., 2009).

De túnel con colector integral. Es un sistema colocado en paralelo que es usado para deshidratar productos a mayor escala. El túnel mantiene una proporción de 2:1 respecto al colector solar. Ambos componentes cuentan con una cubierta transparente (Jairaj *et al*., 2009). El producto es colocado en bandejas al interior del túnel. El calor se genera por la absorción de la energía solar en el recolector y el túnel de deshidratado. El aire eleva su temperatura por la insolación y es inducido por un ventilador radial por todo el colector solar para ingresar al túnel de deshidratado.

A la entrada y salida del sistema se coloca una malla para evitar la infestación por insectos. Las entradas y salidas pueden cerrarse en días lluviosos (Lutz *et al*., 1987).

Colector solar de placa plana con obstáculos. Es un deshidratador con ventilación que opera en el modo de convección forzada. Cuenta con un panel solar, la cámara de deshidratado y un ventilador. Los obstáculos van sobre un aislante de poliestireno de 5 cm de espesor (Jairaj *et al*., 2009). La presencia de estos obstáculos ayuda a ingresar la máxima cantidad de calor hacia la cámara desde el absorbedor colocado entre la cubierta y el aislante, por lo tanto, aumenta la temperatura de deshidratado y se mejora la eficiencia del sistema al reducir el tiempo de procesamiento del producto (Abene *et al*., 2004).

Deshidratador solar de capa múltiple por lotes. Consta de un panel solar aislado donde el aire es succionado por debajo del absorbedor para evitar contaminar el aire por polvo en la superficie absorbedora. Tiene un ventilador centrífugo colocado a la entrada del deshidratador para succionar el aire del colector solar. El sistema de ventilación eléctrico puede controlarse mecánicamente (Jairaj *et al*., 2009).

El problema principal del deshidratado solar es que la temperatura del proceso depende de las condiciones climáticas del lugar (Gulandaz *et al*., 2015) y de la radiación solar, debido a que la temperatura es menor cuando se presentan días nublados. Es decir, las condiciones de deshidratado varían de acuerdo con la ubicación geográfica y la época del año en que se lleve a cabo el deshidratado.

es aquí donde se presentan los deshidratadores solares híbridos como una alternativa para resolver esta problemática.

2.3 Deshidratadores solares híbridos

Constan de una unidad de tratado solar y una cámara de deshidratado (Belessiotis y Delyannis, 2011) (Figura 2.1), las cuales pueden ocuparse por separado cuando no se encuentren en usó. Este tipo de deshidratadores son útiles para sistemas de producción de mediana y gran escala. Cuentan con un sistema de ventilación y un mecanismo auxiliar de calefacción que puede ser accionado mediante combustión de gas, biomasa o electricidad; además, tienen un de control de temperatura y velocidad del aire. Los ventiladores y calefacción están colocados a la entrada y salida del sistema. Al interior de la cámara se encuentran estantes o carros con charolas para manipular el producto.

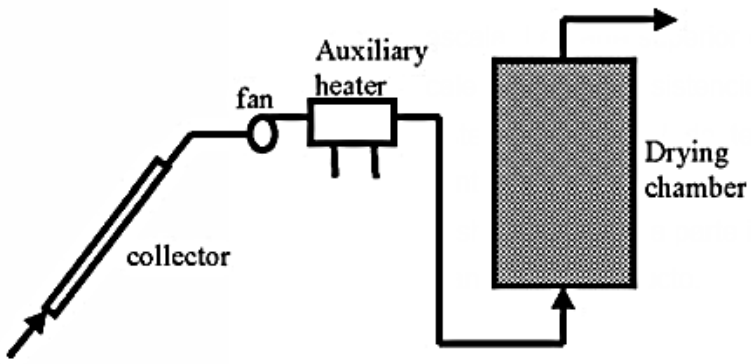

Figura 2.1. Esquema de un deshidratador solar híbrido (Fudholi *et al*., 2010).

Con los deshidratadores solares híbridos se puede controlar las condiciones del proceso de deshidratado, se mejora la calidad del producto debido a que se protege de infestación microbiana y disminuyen los costos del proceso (El-Sebaii y Shalaby, 2013; Kadam y Samuel, 2006). Además, en estos sistemas el proceso es continuo debido a que cuentan con un sistema auxiliar de calefacción. El respaldo auxiliar de calefacción permite que los deshidratadores solares híbridos funcionen en ausencia de radiación solar o bajo condiciones climáticas adversas (Hossain *et al*., 2008), incluso se pueden utilizar en temporada invernal.

Se han desarrollado diversos deshidratadores solares híbridos con diferente capacidad de carga que presentan mayor velocidad de deshidratado, y, por ende, una menor duración del proceso. Algunos de estos estudios afirman que la energía solar térmica aporta del 10 al 25 % de la energía requerida del proceso (Amer *et al*., 2010; Boughali *et al*., 2009; Pangavhane y Sawhney, 2002).

Diferentes autores han efectuado estudios en deshidratadores híbridos, como Ferreira *et al*. (2007) quienes desarrollaron un deshidratador para banana donde las características de deshidratado fueron mejores que en el deshidratado tradicional para las mismas condiciones de temperatura y velocidad del aire. De la misma manera, Bennamoun y Belhamri (2003) reportan que al adoptar un mecanismo calefactor el proceso de deshidratado presentó un mejor desempeño incluso con períodos de baja radiación solar.

En el Cuadro 2.2 se presenta la clasificación de los deshidratadores solares híbridos de acuerdo al aporte de energía (Fudholi *et al*., 2010), y algunos trabajos realizados por diversos autores.

Cuadro 2.2. Clasificación y desarrollo tecnológico de deshidratadores híbridos para productos agrícolas.

Tipo	Aporte energético	Descripción	Referencia
Con almacenamiento térmico	Rocas	Deshidratador de cilantro acoplado a un calentador solar con almacén de rocas como absorbente de calor	(Chauhan *et al*., 1996)
	Arena	Deshidratador indirecto de convección natural con arena como absorbente	(El-Sebaii *et al*., 2002)
	Reflector solar	Deshidratador de gabinete con absorbente inverso	(Goyal y Tiwari, 1999)
Con unidad auxiliar de calefacción	Eléctrica	Deshidratador de productos agrícolas con soplador eléctrico de calor	(Tiris *et al*., 1995)
		Sistema compuesto por calefacción de resistencias y ventiladores eléctricos	(Tsamparlis, 1990)
	Quemador de biomasa	Equipo con quemador de biomasa conformado por un ducto rectangular y chimenea de humo	(Madhlopa y Ngwalo, 2007)
		Sistema que genera de 55 a 60 °C y reduce el tiempo de deshidratado de rizomas de cúrcuma de 11 días a cielo abierto, a 1.5 días dentro del equipo	(Prasad *et al*., 2006)
		Deshidratador mixto de convección natural integrado con un quemador de biomasa	(Tarigan y Tekasakul, 2005)
	Quemador de gas	Deshidratador solar híbrido para cubos de mandioca auxiliado por una estufa de keroseno con un control de flama eléctrico, donde la temperatura varió de 50 a 70 °C	(Onipede y Agbetoye, 2013)
		Deshidratador solar de plátano auxiliado por un quemador de gas LP	(Smitabhindu, Janjai, y Chankong, 2008)
	Motor diésel	Deshidratador híbrido auxiliado por un motor a diésel que acciona un sistema de ventilación centrifuga	[Soponronnarit *et al*., 1986 citado por (Soponronnarit, 1995)]
			(Eissen *et al*., 1985)
Otras fuentes de energía	Agua geotérmica	Deshidratador combinado que utiliza este recurso como auxiliar térmico	(Ivanova *et al*., 2003)
	Fotovoltaica	Deshidratador que utiliza la energía fotovoltaica como	(Ruslan *et al*., 2006)

		auxiliar del sistema de ventilación	
	Bombas de calor	Deshidratador con bomba de calor con colector-evaporador	(Hawlader *et al*., 2008)
	De humificación	Deshidratador de hojas de Centella asiática (pegaga)	(Yahya *et al*., 2004)

2.4 Discusión

Los deshidratadores solares directos son económicos y reducen el tiempo de deshidratado, pero se reduce considerablemente la cantidad y calidad del producto (Jairaj *et al*., 2009).

El flujo de aire es un parámetro importante que influye en el proceso. Yaldiz *et al*. (2001) reportan que el flujo ideal del aire de deshidratado oscila entre 0.5 y 1.5 $m \cdot s^{-1}$ de acuerdo con la temperatura del proceso. Abene *et al*. (2004) mencionan que, a menor valor de temperatura de deshidratado, las velocidades del aire deberán ser menores, así como a mayores temperaturas se incrementa la velocidad del aire, estas condiciones son factibles técnica y económicamente en este tipo de equipos.

El deshidratado solar híbrido es de gran utilidad donde se requiere un proceso continuo y la disponibilidad de radiación solar es mínima (Tiwari, 2016). Además, su uso se justifica cuando el contenido de humedad en los productos agrícolas es elevado, por lo que incrementan los requerimientos energéticos para mantener la temperatura del proceso.

Además de mejorar la calidad del producto, con los deshidratadores solares híbridos se genera un ahorro en el consumo de energéticos y costos de operación, también se reduce la duración del proceso y se ocupa menor área de deshidratado. Por último, el proceso se hace más eficiente al ser controlado y se reduce el impacto ambiental (Aware y Thorat, 2012; Zhang *et al*., 2006).

El desarrollo de deshidratadores solares híbridos capaces de deshidratar diferentes productos agrícolas a mayor escala, y/o en menor tiempo, sería de gran beneficio para los pequeños y medianos productores que lo requieran.

Un deshidratador solar indirecto con circulación de aire forzado podría utilizarse para procesar productos con mejor calidad, parámetro que podría ser aceptable en diferentes mercados nacionales e internacionales.

2.5 Conclusiones

Actualmente los deshidratadores solares híbridos son la mejor opción del uso de energías alternas para obtener un proceso de deshidratado efectivo y en menor tiempo (Kumar *et al*., 2016). Con estos sistemas la eficiencia del proceso se incrementa entre el 30% y 50%. Si se agregan técnicas cómo cambiar los materiales del colector solar, recircular el aire de deshidratado, mejorar los sistemas de calefacción y aislamiento, entre otros, se reducirían las pérdidas térmicas y por tanto el tiempo de deshidratado, por lo que se obtendría un producto uniforme al finalizar el proceso.

Además, por los costos de inversión, se puede afirmar que la mayoría de los productores de mediana y pequeña escala podrían invertir en un sistema de este tipo de acuerdo a sus requerimientos postcosecha. Por lo anterior, es importante desarrollar sistemas de deshidratado simples, efectivos y rentables para alentar a los sectores productivos a invertir en este tipo de tecnologías.

Es importante realizar un análisis de factibilidad en los sistemas de deshidratado solar híbrido. Para ello, habría que tomar en cuenta diversos aspectos como: las propiedades físicas del producto a procesar, las condiciones climáticas de deshidratado, la funcionalidad del equipo, la eficiencia de operación del sistema, así como los costos de mantenimiento (Kumar *et al*., 2016).

Finalmente, para construir los sistemas de deshidratado se deberían considerar diversos factores como la escala de producción, la disponibilidad de nuevas tecnologías y la calidad esperada de los productos a obtener.

2.6 Literatura citada

Abene, A., Dubois, V., Le Ray, M., and Ouagued, A. (2004). Study of a solar air flat plate collector: Use of obstacles and application for the drying of grape. Journal of Food Engineering, 65(1), 15–22.

Amer, B. M. A., and Gottschalk, K. (2012). Drying of chamomile using a hybrid solar dryer. In International Conference of Agricultural Engineering - CIGR - AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life.

Amer, B. M. A., Hossain, M. A., and Gottschalk, K. (2010). Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana. Energy Conversion and Management, 51(4), 813–820.

Aware, R., and Thorat, B. N. (2012). Solar Drying of Fruits and Vegetables. Solar Drying: Fundamentals, Applications and Innovations, 51.

Belessiotis, V., and Delyannis, E. (2011). Solar drying. Solar Energy, 85(8), 1665–1691.

Bennamoun, L., and Belhamri, A. (2003). Design and simulation of a solar dryer for agriculture products. Journal of Food Engineering, 59(2–3), 259–266.

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

Chauhan, P. M., Choudhury, C., and Garg, H. P. (1996). Comparative performance of coriander dryer coupled to solar air heater and solar air-heater-cum-rockbed storage. Applied Thermal Engineering, 16(6), 475–486.

CONUEE. (2016). Energía Solar. Retrieved November 20, 2016, from http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/que_es_la_energia_solar

Eissen, W., Mühlbauer, W., and Kutzbach, H. D. (1985). Solar drying of grapes. Drying Technology, 3(1), 63–74.

Ekechukwu, O., and Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion and Management, 40(6), 615–655.

El-Sebaii, A. A., Aboul-Enein, S., Ramadan, M. R. I., and El-Gohary, H. G. (2002). Experimental investigation of an indirect type natural convection solar dryer. Energy Conversion and Management, 43(16), 2251–2266.

El-Sebaii, A. A., and Shalaby, S. M. (2013). Experimental investigation of an indirect-mode forced convection solar dryer for drying thymus and mint. Energy Conversion and Management, 74, 109–116.

Ferreira, A. G., Lúcia, A., Charbel, T., Pires, R. L., and Silva, J. G. (2007). Analysis of a hybrid solar-electrical dryer. Proceedings of COBEM, (19th International Congress of Mechanical Engineering).

Fohr, J. P., and Arnaud, G. (1992). Crape drying: from sample behaviour to the drier project. Drying Technology, 10(2), 445–465.

Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., and Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Goyal, R. K., and Tiwari, G. N. (1999). Performance of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept. Energy Conversion and Management, 40(4), 385–392.

Gulandaz, M. A., Ali, M. R., Hasan, M. M., Nur-A-Alam, M., Jahan, N., and Rahman, M. M. (2015). Performance evaluation of modified hybrid solar dryer for paddy seed. International Journal of Postharvest Technology and Innovation, 5(2), 105–124.

Hawlader, M. N. A., Rahman, S. M. A., and Jahangeer, K. A. (2008). Performance of evaporator-collector and air collector in solar assisted heat pump dryer. Energy Conversion and Management, 49(6), 1612–1619.

Hossain, M. A., Amer, B. M. A., and Gottschalk, K. (2008). Hybrid Solar Dryer for Quality Dried Tomato. Drying Technology, 26(12), 1591–1601.

Ivanova, D., Enimanev, K., and Andonov, K. (2003). Energy and economic effectiveness of a fruit and vegetable dryer. Energy Conversion and Management, 44(5), 763–769.

Jairaj, K. S., Singh, S. P., and Srikant, K. (2009). A review of solar dryers developed for grape drying. Solar Energy, 83(9), 1698–1712.

Kadam, D. M., and Samuel, D. V. K. (2006). Convective flat-plate solar heat collector for cauliflower drying. Biosystems Engineering, 93(2), 189–198.

Karathanos, V. T., and Belessiotis, V. G. (1999). Application of a Thin-Layer Equation to Drying Data of Fresh and Semi-dried Fruits. Journal of Agricultural Engineering Research, 74(4), 355–361.

Karim, M. A., and Hawlader, M. N. A. (2006). Performance evaluation of a v-groove solar air collector for drying applications. Applied Thermal Engineering, 26(1), 121–130.

Krokida, M. K., and Maroulis, Z. B. (2001). Structural properties of dehydrated products during rehydration. International Journal of Food Science and Technology, 36(5), 529–538.

Kumar, M., Sansaniwal, S. K., and Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Lutz, K., Mühlbauer, W., Müller, J., and Reisinger, G. (1987). Development of a multi-purpose solar crop dryer for arid zones. Solar and Wind Technology, 4(4), 417–424.

Madamba, P. S., Driscoll, R. H., and Buckle, K. A. (1994). Shrinkage, density and porosity of garlic during drying. Journal of Food Engineering, 23(3), 309–

319.

Madhlopa, A., and Ngwalo, G. (2007). Solar dryer with thermal storage and biomass-backup heater. Solar Energy, 81(4), 449–462.

Midilli, A., Kucuk, H., and Yapar, Z. (2002). A New Model for Single-Layer Drying. Drying Technology: An International Journal, 20(7), 1503–1513.

Mühlbauer, W. (1986). Present status of solar crop drying. Energy in Agriculture, 5(2), 121–137.

Mujumdar, A. S. (1995). Handbook of Industrial Drying, Second Edition, Revised and Expanded. Taylor and Francis.

Murthy, M. V. R. (2009). A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(4), 835–844.

Nair, K. K. V, and Bongirwar, D. R. (1994). Solar Dryer for Agricultural Products. Indian Chemical Engineer Section B Industry and News, 36, 103.

Onipede, E. A., and Agbetoye, L. A. S. (2013). Development and performance evaluation of a solar assisted hybrid dryer for cassava chips. Global Research Analy, 2(8), 1–5.

Pangavhane, D. R., and Sawhney, R. L. (2002). Review of research and development work on solar dryers for grape drying. Energy Conversion and Management, 43(1), 45–61.

Panwar, N. L., Kaushik, S. C., and Kothari, S. (2012). State of the art on solar drying technology: a review. International Journal of Renewable Energy Technology, 3(2), 107–141.

Prasad, J., Vijay, V. K., Tiwari, G. N., and Sorayan, V. P. S. (2006). Study on performance evaluation of hybrid drier for turmeric (Curcuma longa L.) drying at village scale. Journal of Food Engineering, 75(4), 497–502.

Rojano Aguilar, A., Salazar Moreno, R., López, I., Ojeda, W., Schmidt, U., and Huber, C. (2011). Temperature and humidity as physical limiting factors for

controlled agriculture. In Acta Horticulturae (pp. 503–507). International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium.

Ruslan, M. H., Othman, M. Y., Yatim, B., Sopian, K., Ali, M. I., and Ibarahim, Z. (2006). Photovoltaic assisted solar drying system.

Sarsavadia, P. N., Sawhney, R. L., Pangavhane, D. R., and Singh, S. P. (1999). Drying behaviour of brined onion slices. Journal of Food Engineering, 40(3), 219–226.

Sharma, A., Chen, C. R., and Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Smitabhindu, R., Janjai, S., and Chankong, V. (2008). Optimization of a solar-assisted drying system for drying bananas. Renewable Energy, 33(7), 1523–1531.

Soponronnarit, S. (1995). Solar drying in Thailand. Energy for Sustainable Development, 2(2), 19–25.

Tarigan, E., and Tekasakul, P. (2005). A mixed-mode natural convection solar dryer with biomass burner and heat storage back-up heater. In Proceedings of the Australia and New Zealand Solar Energy Society Annual Conference (pp. 1–9).

Tiris, C., Ozbalta, N., Tiris, M., and Dincer, I. (1995). Thermal performance of a new solar air heater. International Communications in Heat and Mass Transfer, 22(3), 411–423.

Tiwari, A. (2016). A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. Journal of Food Processing and Technology, 7(9), 1–12.

Tsamparlis, M. (1990). Solar drying. for real applications. Drying Technology, 8(2), 261–285.

Weiss, W., and Buchinger, J. (2012). Solar Drying. AEE INTEC Publication, A-8200 Gleisdorf, Feldgasse, 19.

Yahya, M., Othman, M., Sopian, K., Daud, W., and Yatim, B. (2004). Quality of

Pegaga leaf dried in a solar assisted dehumidification drying system, 1049–1054.

Yaldiz, O., Ertekin, C., and Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy, 26(5), 457–465.

Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. S., and Wang, S. (2006). Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science and Technology.

3. CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN DESHIDRATADOR HÍBRIDO PORTÁTIL PARA PRODUCTOS AGRICOLAS

Resumen

El uso de fuentes alternativas de energía para deshidratar alimentos se presenta como una opción viable y ecológica para procesar dichos productos. Sin embargo, estas tecnologías dependen mayormente de la climatología del lugar de trabajo y las características constructivas del equipo, por lo que se requiere desarrollar dispositivos híbridos para analizar, controlar y obtener los máximos beneficios del proceso. El objetivo del presente trabajo se centra en la construcción, evaluación y modelación matemática de un deshidratador híbrido, solar-eléctrico para productos agrícolas durante diciembre de 2015, que aprovecha los fenómenos de radiación solar y convección natural y combina dos fuentes energéticas de calor mediante un sistema de calentamiento solar indirecto del aire y lo distribuye a través de cinco paneles solares térmicos de 0.054 m^3 hacia el interior de una cámara de deshidratado de 0.45 m^3; el ingreso del aire es inducido por tres ventiladores axiales y es auxiliado mediante un sistema de calefacción conectado a un control de temperatura, y funciona independientemente de la ubicación y la climatología del lugar de prueba. El precio del prototipo es accesible en comparación con otros equipos que cuestan hasta el triple del precio calculado, por lo tanto, su comercialización es viable y pretende dirigirse a pequeños y medianos productores que manipulen menos de 1 m^3 de materia prima. Para evaluar el prototipo se deshidrataron hojas de lechuga aplicando un valor único de temperatura. Los datos se ajustaron estadísticamente a 8 modelos de deshidratado en capa fina como resultado de la revisión de literatura.

Palabras clave: Razón de humedad, fuentes alternas, energía solar, ajuste de modelos.

3.1 Introducción

En el deshidratado solar la energía calórica es usada como única fuente de calefacción. En el caso de los sistemas híbridos se adiciona otra fuente de energía (Ekechukwu y Norton, 1999).

El lugar donde será colocado el deshidratador deberá estar libre de obstáculos para estar expuesto la mayor parte del día a la radiación solar y alejado al menos 50 m de sitios con factor de riesgo contaminante, fábricas, granjas, caminos, etc. Además se recomienda colocar la cámara de deshidratado a 0.8 m de altura, para evitar el ingreso de partículas, insectos y demás agentes contaminantes que puedan modificar la calidad del producto final (Oliveros *et al*., 2013).

Un aspecto constructivo de gran importancia es conocer la conductividad térmica de los materiales utilizados en la construcción de los dispositivos de deshidratado, la cual se refiere a la capacidad de conducción de calor de un material, donde a mayor conductividad, el material será mejor conductor del calor; cuanto menor sea el valor, el material será mejor aislante (Miliarium, 2016).

En el Cuadro 3.1 se mencionan algunos deshidratadores híbridos que han utilizado la energía eléctrica como sistema auxiliar de calefacción.

De acuerdo a la revisión anterior se construyó un deshidratador híbrido, solar-eléctrico, que estabiliza la temperatura de deshidratado mediante un sistema de control automático de temperatura, con base en los valores de la temperatura interna del prototipo, el cual registra y grafica los datos obtenidos en tiempo real. Además, si se requiere incrementar su valor, combina el calor generado en los paneles térmicos por la radiación solar con un sistema de calefacción eléctrica.

Cuadro 3.1. Deshidratadores híbridos de tipo solar-eléctrico para productos agrícolas.

Cultivo	Dimensiones de la cámara de deshidratado (m)	Volumen (m^3)	Características de calefacción	Temperatura de operación (°C)	Referencia
Plátano	0.90x1.20x0.96	1.04	20 lámparas 100W	50	(Ferreira *et al*., 2007)
Cebolla	0.50x0.50x1.20	0.30	Resistencia 5 kW	60	(Reyes *et al*., 2015)
Jitomate	0.50x0.50x1.10	0.28	Resistencia 500W		(Hussein *et al*., 2016)
Jitomate	1.65x0.60x1.00	0.99	Resistencia 3.75kW	50-75	(Boughali *et al*., 2009)
Papa	1.60x0.70x0.60	0.67	Resistencia 1.5kW	50-60	(Chouicha *et al*., 2013)
Lámina de caucho	0.80x0.80x0.80	0.51	Resistencia eléctrica	40-60	(Werapun *et al*., 2015)
Jitomate	0.50x0.50x1.20	0.30	Resistencia 5 kW	50-60	(Reyes *et al*., 2014)
Hongo	0.50x0.50x1.20	0.30	Resistencia 5 kW	60	(Reyes *et al*., 2014)

El objetivo de este trabajo fue construir, evaluar y modelar matemáticamente un deshidratador híbrido, solar-eléctrico, para productos agrícolas con el fin de incrementar el aprovechamiento de la energía solar y reducir los costos de mantenimiento y operación.

3.2 Materiales y métodos

Se construyó un deshidratador híbrido, solar-eléctrico, de estructura portátil en la Universidad Autónoma Chapingo (Latitud: 19 29' 00'', Longitud: -98 54' 00'', Altitud: 2240m), que aprovecha la radiación solar y convección natural y es asistido por un control automático para estabilizar la temperatura de deshidratado.

Previo a la construcción y puesta en marcha del deshidratador se determinaron las condiciones y parámetros en que se realizaría el experimento de deshidratado. Por lo que se efectuaron las siguientes suposiciones:

- La climatología se mantiene constante durante el proceso.
- La irradiación sobre la superficie de los colectores solares es uniforme.
- Las condiciones de temperatura del aire en los paneles solares y la cámara de deshidratado se mantienen constantes durante el proceso.
- El flujo de calor hacia la cámara de deshidratado se mantiene constante.
- Por ser un sistema aislado se desprecian las pérdidas de calor.
- Se considera al producto como un cuerpo homogéneo de forma laminar (Crank, 1957)
- El contenido de humedad inicial del producto es uniforme

A continuación, se efectuaron unas pruebas de deshidratado en una muestra representativa de hojas de lechuga para verificar el comportamiento del prototipo. El producto fue seleccionado por su disponibilidad en el mercado y por la consistencia húmeda de la hoja. En seguida, se registraron las condiciones ambientales y al interior del deshidratador de temperatura, radiación solar y masa del producto. Finalmente, los datos se ajustaron a un conjunto de modelos de deshidratado en capa fina.

Las hojas frescas de lechuga se obtuvieron en un mercado local cercano al lugar del experimento entre el 20 y 21 de diciembre de 2015, las pruebas se realizaron en un horario comprendido entre 11:00 y 17:00 horas. La masa inicial de las muestras para ejecutar el experimento fue de 0.100 kg, con un tamaño inicial de las hojas entre 10 y 15 cm. Posteriormente las hojas se colocaron en una bandeja de aluminio con una superficie de 0.2 m^2 y un espesor de la capa de deshidratado comprendido entre 14 y 16 mm, y se introdujeron al deshidratador, Figura 3.1. El producto se procesó durante 6.5 h hasta obtener una masa prácticamente constante, momento en que se terminó la prueba y se retiró el material del prototipo. Durante el experimento los valores de masa del producto

y temperatura se registraron cada 15 min, con esta información se construyeron las curvas de deshidratado.

El experimento se basó en un diseño completamente al azar con arreglo unifactorial, considerando como único factor a la temperatura con 1 tratamiento comprendido entre 26 y 41.2 °C, el cual se efectuó por triplicado obteniendo un total de 3 unidades experimentales donde la variable respuesta fue la razón de humedad. El análisis estadístico y ajuste de los datos se efectuó con la herramienta *Curve Fitting Tool* incluida en el software Matlab v. 8.0.

Los datos experimentales se ajustaron a 8 modelos de deshidratado en capa fina para seleccionar el modelo que presentara el mejor ajuste estadístico a los datos. Los parámetros de selección del modelo para describir el proceso fueron el menor valor de SSE y RMSE, así como el mayor valor de R^2. Con esta información se obtuvieron los valores de la constante de deshidratado y los coeficientes del modelo. El intervalo de confianza de la modelación matemática fue del 95%.

Para la prueba de deshidratado, la velocidad del aire a la salida del ventilador del deshidratador se midió con un anemómetro digital LM-8102 (± 0.1 m s^{-1}). La masa de las muestras se registró con una balanza digital L-EQ-5 (± 0.001 kg) con capacidad de 5 kg. La temperatura al interior del equipo se registró cada 2 min con diez higrómetros AM2302 (±2% RH, ±0.5 °C) (Aosong, 2016) con un rango de temperatura de funcionamiento de -40 a 80 °C. Los higrómetros se calibraron con el termo higrómetro S-THB-M002, comparando los valores medidos en el sensor de referencia para las mismas condiciones de prueba. Por cada sensor se registró el valor promedio de seis lecturas de temperatura en condiciones similares de medición respecto al sensor de referencia.

La climatología se midió conectando un termo-higrómetro S-THB-M002 (± 0.21°C y ±0.25%RH) y un piranómetro de silicón S-LIB-M003 (±10 Wm^{-2}) a una estación meteorológica ONSET HOBO U30.

3.2.1 Construcción del prototipo

a) Elementos principales

Cámara de deshidratado. La estructura de la cámara es plegable, es decir se extiende para su instalación y se compacta cuando se encuentra fuera de funcionamiento. Esta característica surge como resultado de establecer una analogía de diseño respecto a la forma de las cajas y contenedores de productos agrícolas y materia prima, que en modo compacto reducen su volumen hasta en un 80 % (DISSET, 2017), factor que reduce los costos de embalaje y transporte. Esta característica permite que el equipo sea práctico en cuanto a su manejo e instalación en sitios donde se desarrollen actividades postcosecha o a nivel traspatio, y donde la pendiente del terreno sea mínima.

Cubierta. Para aprovechar de mejor manera la temperatura generada al interior del equipo de deshidratado se ocupará placa de poliuretano como aislante en las paredes del sistema porque tiene una menor conductividad térmica (0.029, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$) en comparación con la madera (0.13 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$), conglomerado (0.047 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$), unicel (0.157 $W\ m^{-1}\ K^{-1}$) o la fibra de vidrio (0.035) (Miliarium, 2016), además que este material es ligero y moldeable.

Paneles térmicos. El equipo deberá orientarse de sur a norte para que los rayos solares incidan perpendicularmente en los paneles y se aproveche la radiación solar durante la mayor parte del día. Se recomienda instalar una cubierta de cristal templado para prevenir daños por sobrecarga o impactos como precipitación y granizo, entre otros agentes que afecten su estructura y funcionamiento.

Bandejas. El estante de bandejas se construirá independientemente de la cámara de deshidratado para evitar perforar las paredes del deshidratador y tener pérdidas de calor en el equipo. El espacio ocupado por los estantes se distribuirá uniformemente para permitir la carga y descarga del producto, de tal manera que se pueda manipular y realizar tareas de mantenimiento y reparación.

(Maupoey *et al*., 2001) afirma que los deshidratadores de bandejas son útiles para deshidratar pequeñas cargas, cuando la capacidad necesaria no exceda de 25 a 50 kg h^{-1} de producto deshidratado.

b) Control electrónico de temperatura

En el equipo desarrollado al ser un prototipo híbrido, el proceso de deshidratado no depende únicamente de las condiciones geográficas y climáticas de prueba, por tal motivo la temperatura del proceso y masa del producto fueron monitoreadas y controladas con un dispositivo electrónico que actúa en mayor o menor proporción de acuerdo con la duración e intensidad de la radiación solar.

Se estableció un sistema de control electrónico para estabilizar la temperatura y acelerar el proceso de deshidratado, las condiciones de temperatura fueron monitoreadas por nueve sensores y se controlaron mediante un conjunto de cinco ventiladores axiales, tres de recirculación y dos extractores, además de una resistencia eléctrica de 120 V utilizada como calefactor auxiliar para incrementar la temperatura obtenida por radiación solar hasta obtener el valor establecido.

3.2.2 Modelación matemática del proceso

La razón de contenido de humedad *MR* (adimensional) de las muestras fue determinada con la ecuación 3.1:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \approx \frac{M_t}{M_o} \tag{3.1}$$

donde M_t [$g_{(agua)}$ $g^{-1}_{(materia\ seca)}$] es el contenido de humedad del producto en el tiempo *t*, M_o [$g_{(agua)}$ $g^{-1}_{(materia\ seca)}$] es el contenido de humedad inicial y M_e [$g_{(agua)}$ $g^{-1}_{(materia\ seca)}$] es el contenido de humedad de equilibrio del producto. Los valores del contenido de humedad de equilibrio son relativamente pequeños comparados con M_t y M_o, y por consiguiente puede considerarse que M_e = 0 (Celma *et al*., 2007).

Para simular el comportamiento del deshidratado en hojas de lechuga, se hizo un análisis estadístico de los datos a 8 modelos de deshidratado en capa fina (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Modelos evaluados para deshidratar hojas de lechuga.

Modelo	Ecuación*	Referencia
Dos términos exponencial	$MR = aexp(-kt)+(1-a)\ exp(-kat)$	(Akpinar *et al.*, 2003)
Dos términos	$MR = aexp(-k_0t)+bexp(-k_1t)$	(Toğrul y Pehlivan, 2004)
Henderson y Pabis	$MR = aexp(-kt)$	(Akpinar *et al.*, 2003)
Logarítmico	$MR = aexp(-kt)+c$	(Yaldiz *et al.*, 2001)
Midilli Kucuk	$MR = aexp(-k(t^n))+bt$	(Midilli *et al.*, 2002)
Page	$MR = exp(-kt^n)$	(V.T. Karathanos y Belessiotis, 1999)
Page modificado	$MR = exp[-(kt)^n]$	(Wang *et al.*, 2007)
Verma	$MR = aexp(-kt)+(1-a)\ exp(-k_1t)$	(Verma *et al.*, 1985)

* donde *k, n, a, b* y *c* representan los parámetros empíricos de cada modelo.

La razón de contenido de humedad (*MR*) se determinó con la ecuación (3.1) para ajustar las curvas *MR* con respecto a *t* en los 8 modelos.

Además, los criterios estadísticos para comprobar la bondad de ajuste de *MR* a los modelos y para seleccionar la expresión que mejor describa el proceso de deshidratado del producto serán: ubicar los mayores valores del promedio del coeficiente de determinación, R^2, los menores valores de RMSE y SSE (Akgun y Doymaz, 2005; E. Kavak Akpinar, 2006).

Ajuste en las constantes y coeficientes del modelo de deshidratado. Para calibrar el modelo que mejor describa el proceso de deshidratado de hojas de lechuga, se aplicará un análisis de regresión no lineal con el software Excel de Microsoft Windows, basado en la minimización de la suma de cuadrados. Los valores de los coeficientes del modelo se estimarán en función de la temperatura.

Validación del modelo. El criterio para validar el modelo seleccionado será graficar *MR* estimada, MR_{est}, con respecto a MR_{exp} (Simal *et al*., 2005; Toğrul y Pehlivan, 2003); en el rango de *T* de control.

3.2.3 Cinética de deshidratado

Velocidad de deshidratado. La velocidad de deshidratado *DR* [$g_{(agua)}$ $g^{-1}_{(materia\ seca)}$ h^{-1}] se define como el cambio en *MR* del producto por unidad de tiempo, y se calcula con la ecuación:

$$DR = \frac{MR_{t+\Delta t} - MR_t}{\Delta t} \tag{3.2}$$

donde ***Δt*** (h) es el intervalo de tiempo considerado.

Difusividad efectiva. La transferencia de masa en estado transitorio del deshidratado en capa fina de productos alimenticios se estudia utilizando la ecuación de la Segunda Ley de difusión, derivada de la primera ley formulada por Fick en 1855 (Crank, 1957). Para establecer el valor de la difusividad efectiva, D_{eff} (m^2 s^{-1}), se asumió a la hoja de lechuga como un cuerpo de geometría plana, dicho parámetro fue expresado mediante la ecuación 3.3 (Crank, 1957):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot n + 1)^2} \cdot \exp\left(- \frac{(2 \cdot n + 1)^2 \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot L^2} \right) \tag{3.3}$$

donde *t* (min) es el tiempo de deshidratado, *L* (m) es el espesor medio del material a deshidratar y *n* (adimensional) es el número de términos. La solución analítica de esta expresión en cuerpos de geometría plana asume una distribución uniforme de la humedad inicial, simplificando su movimiento por difusión y despreciando el encogimiento del producto. Para periodos de deshidratado largos donde *MR* < 0.6 y *n*=0 la ecuación (3.3) se simplifica a (Iguaz *et al.*, 2003):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(- \frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot L^2} \right) \tag{3.4}$$

Aplicando la regla de logaritmos en ambos lados de la ecuación (3.4) se obtiene:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \left(\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot L^2} \right) \tag{3.5}$$

y se extrae:

$$k_o = \left(\frac{\pi^2 \cdot D_{eff[T]}}{4 \cdot L^2} \right) \tag{3.6}$$

donde k_o (adimensional) es la pendiente de la recta ln(*MR*) con respecto a *t*. El valor de D_{eff} para cada temperatura [*T*] se obtiene resolviendo la ecuación (3.6).

Energía de activación. La energía de activación, E_a, expresa la dependencia de D_{eff} en función de la temperatura, es decir, representa la energía necesaria para iniciar la reacción de la difusión (Simal *et al.*, 2005) en un producto. Para evaluar esta dependencia se utiliza la ecuación 3.7 de Arrhenius.

$$D_{eff[G]} = D_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \tag{3.7}$$

donde $D_{eff[G]}$ ($m^2\ s^{-1}$) es la difusividad efectiva general [*G*] del proceso, D_o ($m^2\ s^{-1}$) es el factor de frecuencia o pre-exponencial de la expresión de Arrhenius, E_a ($J\ mol^{-1}$) es la energía de activación, R ($J\ mol^{-1}\ K^{-1}$) es la constante universal de los gases = 8 3143 y T (K) es la temperatura absoluta. Convirtiendo la ecuación (3.7) a su forma lineal, aplicando la ley de los logaritmos se obtiene:

$$\ln\left(D_{eff[G]}\right) = \ln\left(D_o\right) - \frac{E_a}{R \cdot T} \tag{3.8}$$

Los valores de E_a se obtienen graficando lnD_{eff} con respecto a T^{-1}, para correlacionar D_{eff} y *T*. De acuerdo a Göğüş y Maskan (2006) los valores de E_a aumentan al incrementar el grosor en la capa de deshidratado, esto debería considerarse para diseñar los sistemas deshidratadores y estimar la energía requerida para remover la humedad del producto.

3.2.4 Propiedades termodinámicas

Las propiedades termodinámicas del proceso de deshidratado de hojas de lechuga fueron obtenidas con el método descrito por Jideani y Mpotokwana (2009), ecuaciones 3.9-3.11:

$$\Delta H = E_a - R \cdot T \tag{3.9}$$

$$\Delta S = R \cdot \left[\ln\left(A_0\right) - \ln\left(\frac{k_B}{h_P}\right) - \ln\left(T\right)\right] \tag{3.10}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \tag{3.11}$$

donde ΔH (J mol^{-1}) es la variación de entalpía, ΔS (J mol^{-1} K^{-1}) es la variación de entropía, ΔG (J mol^{-1}) es la variación de energía libre de Gibbs, k_B (J K^{-1}) es la constante de Boltzmann, k_B = 1.38 x 10^{-23} y h_P (J s^{-1}) es la constante de Planck, h_P = 6.626 x 10^{-34}.

La entalpia es la energía requerida para remover la humedad en un producto durante el proceso de deshidratado y disminuye al aumentar la temperatura (De Oliveira *et al*., 2010).

La entropía es el grado de desorden entre el agua y el producto a deshidratar. Cuando incrementa la temperatura, incrementa la excitación de las moléculas de agua generando un desorden en dicho sistema (De Oliveira *et al*., 2010).

La energía libre de Gibbs se considera como la cantidad del trabajo efectuado por el sistema durante el proceso de adsorción o desorción (Kaleemullah y Kailappan, 2007). Valores positivos de ΔG indican que no existe una variación espontanea de dicho parámetro y se requieren contribuciones externas de energía para que el fenómeno suceda.

3.2.5 Consumo de energía

El consumo de energía para deshidratar un kilogramo de hojas de lechuga se calculó utilizando la ecuación (3.12) (Motevali *et al.*, 2011) que representa la cantidad de energía consumida por el equipo respecto a *t* para procesar el producto a diferentes temperaturas:

$$\frac{E}{t} = \frac{v \cdot \rho_a \cdot C_a \cdot \Delta T \cdot t}{d \cdot \Delta X} \qquad (3.12)$$

donde E_t (kJ kg^{-1}) es el consumo energético en cada condición de deshidratado, d (kg m^{-2}) es la densidad de carga, v (m s^{-1}) es la velocidad del aire, ρ_a (kg m^{-3}) es la densidad del aire, C_a (kJ kg^{-1} °C^{-1}) es el calor especifico del aire, ΔT (°C) es la diferencia de temperatura y ΔX (kg kg^{-1}) es la diferencia de *MR*. Para estimar ρ_a con base en la temperatura, se utilizó la ecuación (3.13) (Kumar, 2012, 2013)

$$\rho_a = \frac{353.44}{(T + 273.15)} \tag{3.13}$$

3.2.6 Eficiencia energética

La eficiencia energética se define como la energía utilizada para la evaporación del agua del producto respecto a la energía total aplicada al deshidratador, se expresa mediante la ecuación (3.14):

$$\eta = \frac{d \cdot \lambda \cdot \Delta X}{F_a \cdot C_a \cdot \Delta T \cdot t} \tag{3.14}$$

donde η (%) es la eficiencia, λ (kJ kg^{-1}) es el calor latente de vaporización, ecuación (3.15) (Youcef-Ali *et al.*, 2001) y F_a (kg s^{-1} m^{-2}) el flujo másico del aire.

$$\lambda = 4186.8 \cdot (597 - 0.56 \cdot T) \tag{3.15}$$

3.2.7 Costo del prototipo

El costo del equipo depende de los materiales de construcción y los componentes del sistema de control de temperatura, además de la mano de obra utilizada para su construcción y desarrollo.

El costo del proceso se determinará con base en el tipo de producto a procesar, el volumen a deshidratar, el tiempo de deshidratado y los insumos utilizados, incluyendo los costos de depreciación del equipo, la mano de obra y los costos administrativos.

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Construcción del prototipo

Se efectuaron dos pruebas de funcionamiento con el deshidratador híbrido sin instalar algún control de temperatura, por lo tanto, las condiciones de deshidratado dependieron de la climatología del lugar de prueba.

Figura 3.1. Deshidratador construido y con el mecanismo de calefacción instalado.

a) Elementos principales

Cámara de deshidratado. La estructura principal del deshidratador es de madera, por ser un material ligero y fácil de conseguir en el mercado. El prototipo consta de cinco paneles solares térmicos de 0.53 x 0.4 x 0.05 m, con una superficie de captación solar de 1.05 m^2, con tapas de cristal de 4 mm de espesor y una cámara de deshidratado de 0.45 m^3 con un par de compuertas en la parte posterior (Figura 3.2). Además, tiene una capacidad de carga de 40 kg, ±5 kg y una superficie de deshidratado de 5.6 m^2 repartidos en 28 niveles de 0.2 m^2. A excepción de su principio de operación, la forma de la cámara de deshidratado es similar a los sistemas para procesar madera (Bekkioui *et al*., 2009; Garita *et al*., 2008) y los invernaderos con cubierta de cristal (Awani *et al*., 2017).

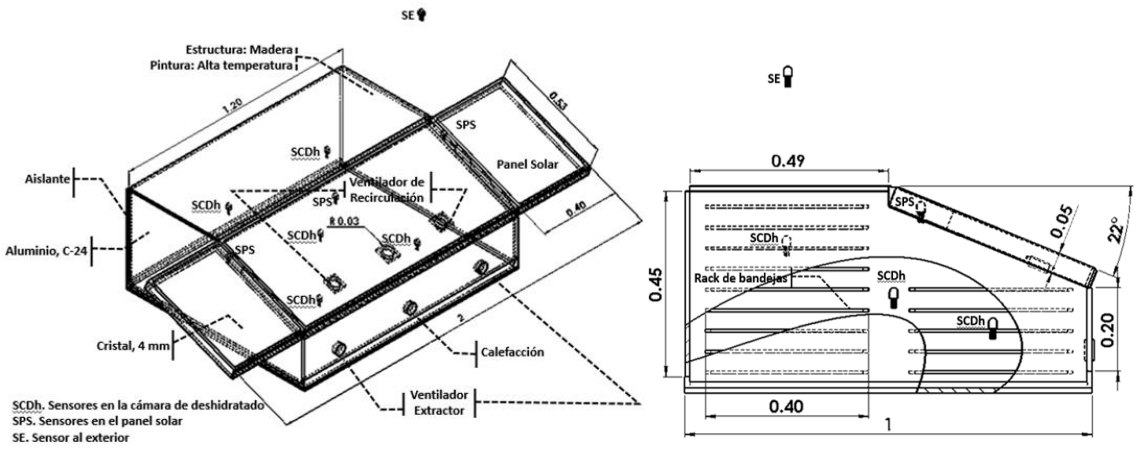

Figura 3.2. Distribución de componentes y sensores en la cámara de deshidratado.

Ambos componentes se cubrieron con lámina de aluminio y se aislaron con una capa de poliuretano de acuerdo con el espesor de las paredes en la cámara de deshidratado (0.0127 m) lo que permitió plegar el módulo sin deformar su estructura y reducir las pérdidas de calor por conducción en el equipo.

Para plegar la cámara de deshidratado se tomó en cuenta el tablero con mayor superficie que tiene 1.2 m x 1 m, (1); a partir de ahí se procedió a colocar los demás tableros en el siguiente orden (Figura 3.3). Estas dimensiones se consideraron en caso de que una persona manipule la estructura plegada, ya que podrá extender los brazos y levantarla sin complicaciones.

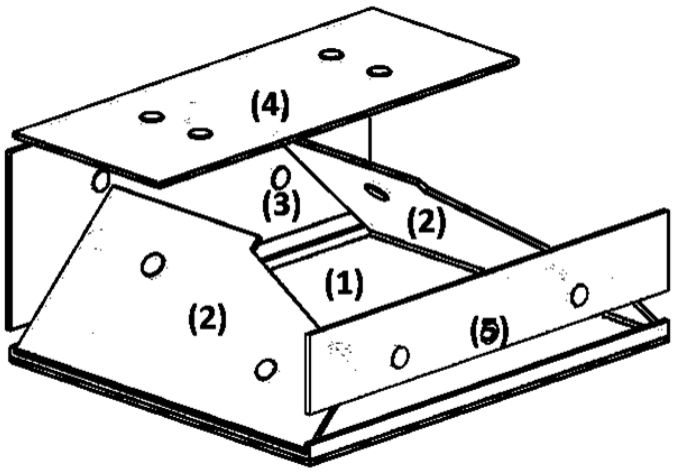

Figura 3.3. Ensamblaje y secuencia de construcción de la cámara de deshidratado.

Cada componente va anclado a la estructura de madera mediante unas bisagras metálicas que permiten abrir-cerrar cada tablero de acuerdo a su posición en el deshidratador. Para cumplir con esta función se colocaron unos broches metálicos en los bordes de los tableros de la cámara de deshidratado y los paneles térmicos.

Figura 3.4. Cámara de deshidratado y paneles térmicos plegados.

Cubierta. En este dispositivo, las funciones de estructura y cubierta las cumplen las paredes del deshidratador; cada cara del prisma construido consta de una estructura de madera con perfil de ½”x1”. En ambas caras de los marcos de madera se colocó lámina de aluminio calibre 24, valor seleccionado por conformar las paredes del módulo sin deformar su estructura y porque a menor calibre incrementarían la densidad de la lámina y la masa del prototipo. El aislante se aplicó al colocar la primera placa, y una vez retirado el excedente se colocó la segunda lámina para que la espuma quedara entre las dos placas. La relación material de cubierta con respecto a la superficie de deshidratado en este experimento fue de 0.5 m^2 de aluminio por m^2 de superficie. La superficie metálica que estará en contacto con el producto dentro del deshidratador se recubrió con pintura mate color negro de alta temperatura para absorber el calor generado y extender la vida útil del metal.

Paneles térmicos. Se instalaron cinco paneles de 0.525 x 0.4 m, 1.05 m^2, con cristal de 4 mm de espesor. Sus componentes son plegables para reducir su volumen de transporte y almacenamiento, Figura 3.4. El ángulo de inclinación utilizado para su instalación fue de 20 ± 2 ° de acuerdo a la latitud en Chapingo.

Se estableció que el conjunto de paneles solares térmicos fuera totalmente cerrado, al observar que, a pesar de haber mayor radiación durante las pruebas de deshidratado, 700 Wm^{-2}, con las entradas de aire abiertas, los valores de temperatura fueron similares cuando los paneles se cerraron por completo, habiendo menores valores de radiación. En este caso se presentó un valor de temperatura 11 °C superior al interior de la cámara respecto a la temperatura ambiente, 26.7 °C, Figura 3.5. Este parámetro constructivo se estableció sin instalar algún control de temperatura y sin utilizar fuentes externas de calor.

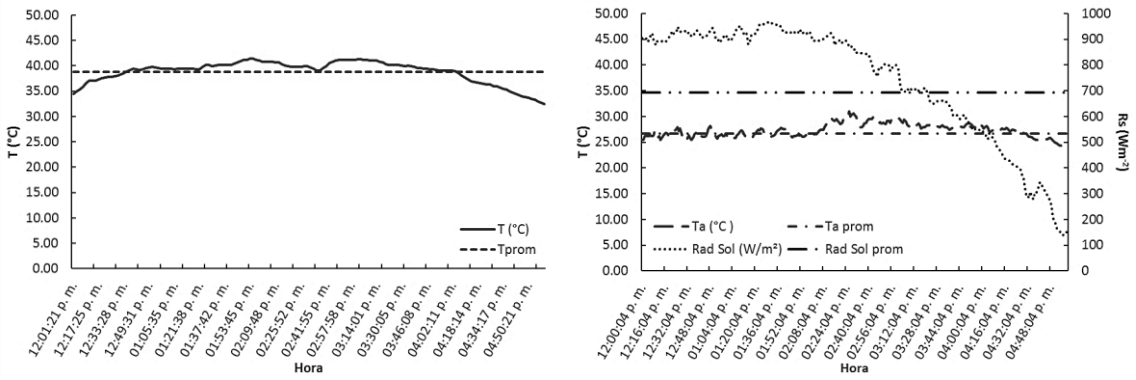

Figura 3.5. Condiciones climáticas y al interior durante la construcción del prototipo.

Bandejas. Se construyeron 28 bandejas de 0.4 m x 0.5 m x 0.007 m, con bastidores de aluminio y malla de fibra de vidrio para permitir el paso del aire en la superficie del producto, Figura 3.6. Tienen una capacidad de carga de 1-1.5 kg de producto fresco. La capacidad de carga experimental será de 1 kg. El estante de bandejas se diseñó para que la separación entre bandejas fuera de 0.05 m entre sí y entre las paredes del prototipo.

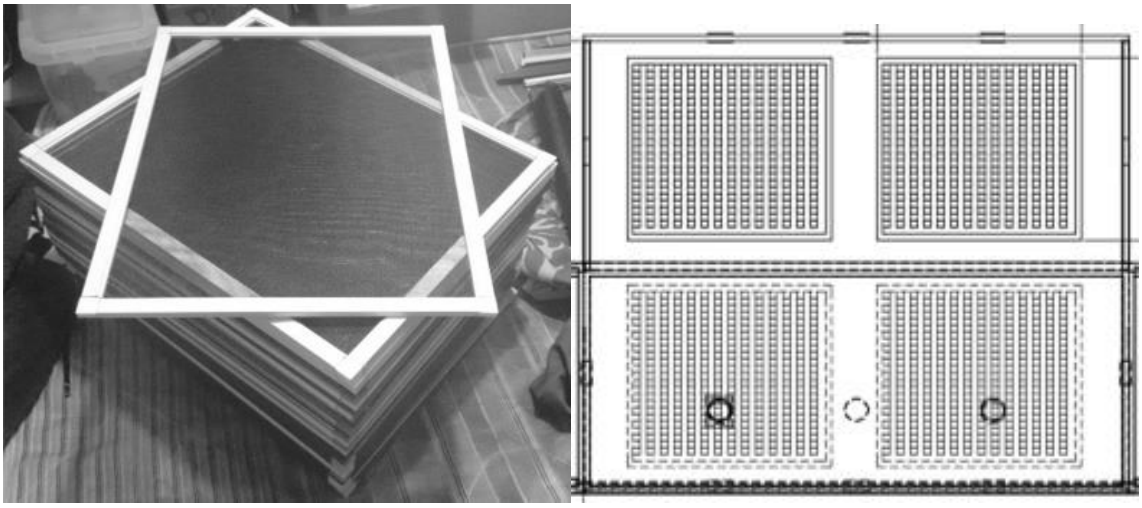

Figura 3.6. Bandejas de aluminio y distribución en la cámara de deshidratado.

El producto al interior del equipo deberá distribuirse aprovechando la superficie de las bandejas, 0.2 m^2, y el espesor de la capa de deshidratado, 0.025 m, es decir se ocupará un volumen de 0.005 m^3 por bandeja.

b) Principio de funcionamiento

En este prototipo el transporte de calor se genera en sentido contrario que en los deshidratadores de gabinete, es decir la circulación del aire comienza desde la parte superior hacia la parte inferior de la cámara de deshidratado. A continuación se describe su funcionamiento.

El calor se genera por la exposición a la radiación del colector solar (1) y circula por convección a través del material absorbedor y la cubierta transparente del panel (2), además es impulsado por tres ventiladores axiales de recirculación de 12 V CD. Posteriormente, el aire calentado en los paneles ingresa hacia el interior de la cámara de deshidratado (3) y viaja a través del producto depositado en las bandejas (4). El aire húmedo es extraído mediante dos chimeneas colocadas en la parte frontal inferior de la cámara de deshidratado, mientras que el aire calentado en la cámara y el generado por la calefacción eléctrica en la parte frontal media (5) es desplazado por los ventiladores de recirculación desde la cámara hacia el colector solar (6) para comenzar de nuevo el ciclo (Figura 3.7).

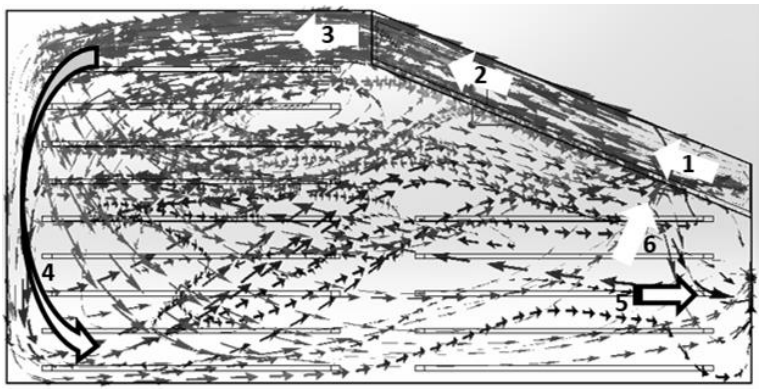

Figura 3.7. Circulación del aire al interior del equipo de deshidratado.

c) Control electrónico de temperatura

Para caracterizar el deshidratador se construyó un sistema de medición con 9 termistores AM2302, ± 2 °C, conectados a una tarjeta Arduino y un control de temperatura que consta de una resistencia eléctrica como calefactor y cinco ventiladores axiales de corriente directa para recircular y expulsar el aire hacia el exterior del equipo, Figura 3.8. El parámetro a medir fue la temperatura para estimar el valor promedio de trabajo con base en la señal digital enviada a la tarjeta de adquisición.

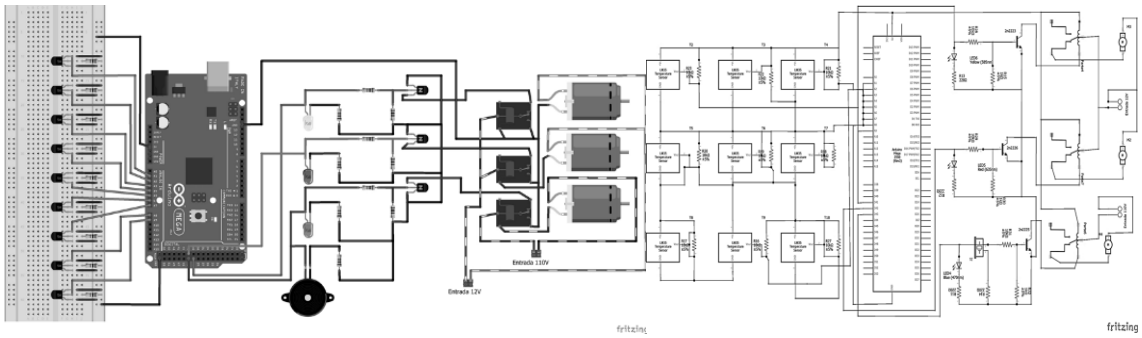

Figura 3.8. Diagrama de componentes y circuito del control de temperatura.

Previo a su calibración, los sensores mostraron un comportamiento variable de ±0.5 °C respecto a la medición de referencia. Una vez calibrados, la variación de las lecturas de temperatura oscilo en un rango de ±0.25 °C, es decir la resolución de los sensores se corrigió en un 50 %.

Para incrementar o estabilizar la temperatura en la cámara de deshidratado, se construyó un circuito ON-OFF que consta de tres relevadores SPDT, es decir la bobina de los relevadores activa dos contactos: normalmente cerrado, y normalmente abierto. El conjunto de relevadores activa cinco ventiladores axiales de 12 V y una resistencia eléctrica de 120 V, 12 A y 1.5 kW que opera en un rango de 50 °C a 600 °C. El encendido ocurre al recibir la señal digital enviada por los sensores de temperatura y convertirla a 5V, lo que activa o bloquea la circulación de la corriente en el circuito. Una vez alcanzada la temperatura de deshidratado se apaga la calefacción y se activa el sistema de enfriamiento del equipo, Cuadro 3.3.

Los ventiladores de recirculación se mantendrán siempre encendidos a una velocidad constante de 1 m s^{-1} para mezclar el aire al interior del equipo y remover la humedad del producto, con el fin de garantizar un proceso rápido y efectivo.

Cuadro 3.3. Control automático con base en las lecturas de temperatura, ON: ↑, OFF: ↓.

	T (°C)	Descripción	Recirculación	Calefacción	Extracción
Set Point 1	T_a – 0.5 T_{dh}	Captando energía solar	↑	↓	↓
Set Point 2	0.5 T_{dh} – T_{dh}	Adicionando calor	↑	↑	↓
Set Point 3	> T_{dh}	Enfriando	↓	↓	↑

Para monitorear la temperatura del proceso en tiempo real se implementó un registrador de datos con el software Parallax (2016) que mostró las lecturas de los sensores en una hoja de cálculo y una interfaz gráfica.

La adquisición de datos se representó en el Cuadro 3.4, mostrando en la primera columna la fecha y hora de cada lectura y en las siguientes columnas el valor de la temperatura de cada sensor comenzando a partir de T_0 hasta T_9 y por último el valor promedio de los diez registros, T_x, ambos parámetros fueron actualizados en intervalos de un segundo de tiempo.

Cuadro 3.4. Registro y control de temperatura de deshidratado en tiempo real.

Fecha	Hora	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	SP_t	Tx_i	t_6	t_7	t_8	Tx_P	T_a	Estado
12/08/2016	12:55:50 p. m.	59.7	55.01	31	49.62	53.77	63.00	49.82	34.5	32.76	33.86	33.7	33.13	Adicionando Calor
12/08/2016	12:55:55 p. m.	58.8	54.14	31	49.47	50.27	63.00	48.72	34.5	32.28	34.21	33.65	33.24	Adicionando Calor
12/08/2016	12:56:00 p. m.	57.9	52.90	32	48.32	48.46	63.00	47.91	34.5	32.47	34.38	33.77	33.38	Adicionando Calor
12/08/2016	12:56:06 p. m.	56.8	51.75	33.1	47.30	48.11	63.00	47.41	34.6	32.62	34.4	33.87	33.27	Adicionando Calor
12/08/2016	12:56:11 p. m.	56.1	50.60	34.2	46.30	48.06	63.00	47.07	34.9	32.64	34.4	33.97	33.39	Adicionando Calor
12/08/2016	01:09:34 p. m.	68.9	63.27	60.7	58.73	62.92	63.00	62.9	39.9	38.5	38.22	38.87	38.97	Adicionando Calor
12/08/2016	01:09:39 p. m.	68.9	63.54	60.7	58.73	63.04	63.00	62.98	39.9	38.62	38.25	38.92	38.97	Adicionando Calor
12/08/2016	01:09:45 p. m.	68.9	63.83	60.7	58.73	63.06	63.00	63.04	39.8	38.51	38.13	38.81	38.72	Enfriando el Sistema
12/08/2016	01:09:48 p. m.	67.9	63.11	59.8	58.60	62.56	63.00	62.4	39	38.37	37.87	38.42	38.19	Adicionando Calor
12/08/2016	01:09:54 p. m.	68.8	63.53	60.6	58.71	63.00	63.00	62.92	39.8	38.73	37.96	38.83	38.88	Adicionando Calor
12/08/2016	01:09:59 p. m.	68.9	63.20	60.7	58.98	62.93	63.00	62.93	39.6	38.53	38.22	38.79	38.96	Adicionando Calor
12/08/2016	01:10:04 p. m.	68.7	63.29	60.7	59.26	62.92	63.00	62.96	39.7	38.75	38	38.83	38.85	Adicionando Calor
12/08/2016	01:10:09 p. m.	68.6	63.55	60.7	59.17	62.92	63.00	62.99	40	38.9	38.35	39.09	38.96	Adicionando Calor
12/08/2016	01:10:14 p. m.	68.9	63.33	60.7	59.16	63.17	63.00	63.04	40	39.05	38.14	39.08	38.97	Enfriando el Sistema
12/08/2016	01:10:18 p. m.	67.9	62.93	59.7	58.66	62.70	63.00	62.37	39	38.57	37.87	38.49	38.47	Adicionando Calor
12/08/2016	01:10:23 p. m.	68.7	63.75	60.6	59.35	63.76	63.00	63.21	39.9	38.76	38.21	38.96	38.91	Enfriando el Sistema

Para una mejor interpretación de los datos, en una interfaz gráfica se presentó la lectura simultánea de cada sensor y el promedio total del equipo (Figura 3.9).

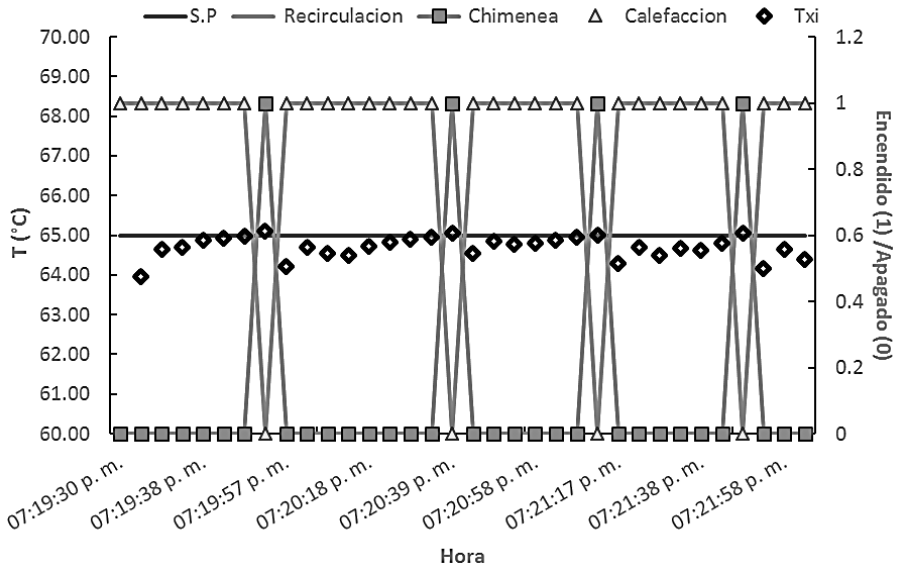

Figura 3.9. Representación gráfica del control de temperatura en tiempo real.

3.3.2 Prueba de funcionamiento

Se deshidrató una muestra de 0.1 kg de hojas de lechuga durante 255 min hasta reducir la masa total del producto en un 76 %, Figura 3.10.

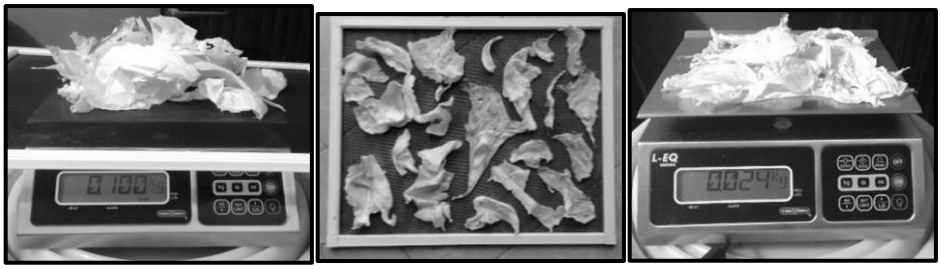

Figura 3.10. Hojas de lechuga. Izq. Hojas frescas. Der. Hojas deshidratadas.

La temperatura promedio en la cámara de deshidratado durante la prueba fue de 37 °C, 10 °C superior a la temperatura ambiente, mientras que la radiación solar fue de 450 w m^{-2}, por haber condiciones de nubosidad, Figura 3.11. Aunque el valor de radiación fue menor por 250 W m^{-2} al valor reportado en la Figura 3.5, la variación de temperatura fue similar, esto indica que con el material aislante las condiciones de almacén de calor mejoraron en un 50 % respecto a los valores de radiación solar en el lugar de prueba.

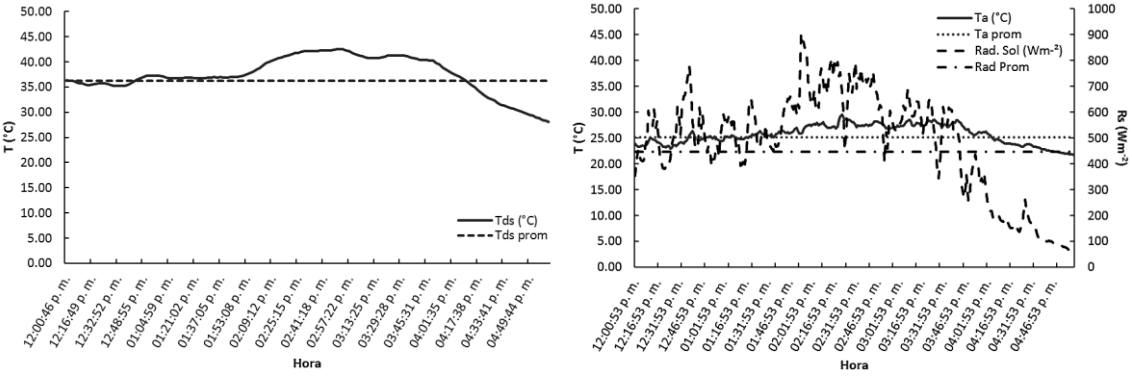

Figura 3.11. Condiciones climáticas y de deshidratado durante el experimento.

Para correlacionar los valores de temperatura de deshidratado, T_{DH}, y de radiación solar, RS, durante la prueba, se aplicó una regresión polinómica de segundo orden mediante la ecuación 3.16.

$$T_{DH} = -3x10^{-05} \cdot RS^2 + 0.0419 \cdot RS + 25.513 \qquad (3.16)$$

donde los valores promedio de R^2 = 85.34 % indican la bondad de ajuste de la relación empírica de la variación de T_{DH} con respecto a RS. Con esta expresión es posible estimar T_{DH} de acuerdo a la radiación incidente en el lugar de prueba.

3.3.3 Modelación matemática del proceso

El modelo Midilli presentó mayor bondad de ajuste a los datos experimentales con valores de SSE: 0.0104, R^2: 0.9908, RMSE: 0.0323, Cuadro 3.5., y ecuación (3.5); en cambio, el modelo de Dos términos fue el que presentó menor ajuste a los datos con SSE: 0.03173, R^2: 0.9721, RMSE: 0.05633.

Cuadro 3.5. Estadísticos de los modelos de deshidratado de hojas de lechuga.

Modelo	SSE	R^2	RMSE
Dos términos exponencial	0.0216	0.9810	0.0424
Dos términos	0.0317	0.9721	0.0563
Henderson y Pabis	0.0252	0.9778	0.0459
Logarítmico	0.0233	0.9795	0.0461
Midilli Kucuk	0.0105	0.9908	0.0324
Page	0.0238	0.9791	0.0446
Page modificado	0.0238	0.9791	0.0446
Verma	0.0215	0.9811	0.0442

Ajuste en k y los coeficientes del modelo Midilli. Para ajustar los datos al modelo, la estimación de *MR* se expresó en función de k y los coeficientes a, n, b y t con la ecuación (3.5). Los datos experimentales se ajustaron a una expresión general para estimar los valores de MR durante el proceso de deshidratado de las hojas de lechuga, basada en el modelo Midilli en cualquier lapso de tiempo y a 38 °C. Para esto se sustituyeron los coeficientes del modelo Midilli-Kucuk en la ecuación (3.17).

$$MR = 1.005 \cdot \exp\left[-0.5271 \cdot t^{0.6622}\right] - 0.02762 \cdot t \qquad (3.17)$$

Validación del modelo. El modelo Midilli, se contrastó MR_{exp} con respecto a *MR* estimada, MR_{est}, a una temperatura de deshidratado de 38 °C, donde hubo una leve dispersión de los datos alrededor de la línea de ajuste, con promedio de R^2 = 0.9908. La correlación anterior se muestra al graficar MR_{exp} y MR_{est} con respecto a *t* a 38 °C (Figura 3.12).

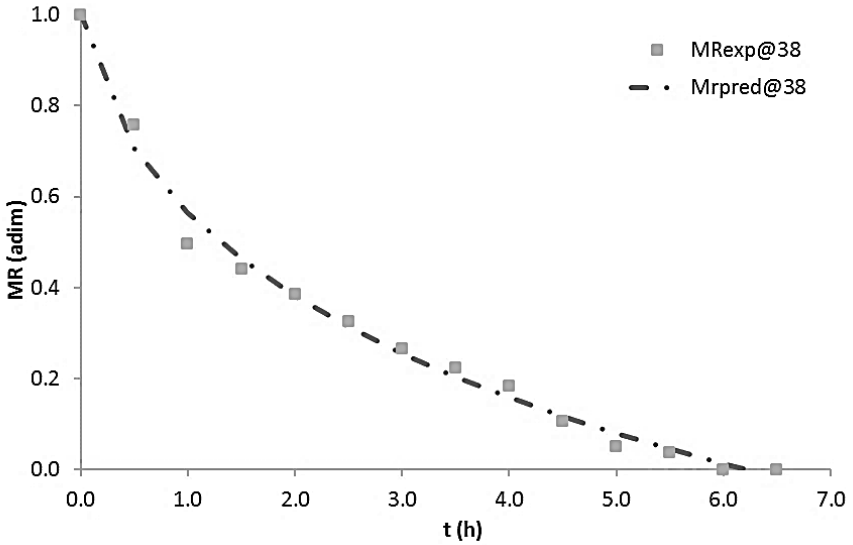

Figura 3.12. Comparación entre la razón de humedad experimental (MR_{exp}) y estimada (MR_{est}) con respecto al tiempo (t) de deshidratado.

Con la ecuación (3.17) del modelo Midilli ajustado se podrá describir el deshidratado del producto al estimar los valores de *MR* en cualquier valor de *T* y *t* en el rango de control establecido.

3.3.4 Cinética de deshidratado y propiedades termodinámicas

La velocidad promedio de deshidratado fue de 0.1666 g h^{-1}. Mientras que la ecuación 3.18 describe la recta ln(*MR*) con respecto a *t* con R^2=0.9382:

$$\ln(MR)=-0.5432 \cdot t+0.0824 \quad (3.18)$$

Mientras que los valores de D_{eff} y E_a fueron de $4.31x10^{-09}$ m^2 s^{-1} y 0.0045 kJ mol^{-1} K^{-1}, respectivamente. El valor de la energía libre de Gibbs (ΔG) fue de 75313.01 J mol^{-1} con ΔH: -2582.51 J mol^{-1} y ΔS: -250.35 J mol^{-1} K^{-1}. Además, la energía requerida para procesar el producto (E_t) durante la prueba fue de 384.34 kJ kg^{-1} con una eficiencia (η) del proceso igual a 53.24 %.

3.3.5 Costos del prototipo

El precio de los materiales para construir el deshidratador híbrido fue de $ 7621.2. Respecto al control de temperatura, incluyendo los mecanismos de

calefacción, ventilación y sus componentes electrónicos, se estimó un costo de $ 7,378.80, es decir, el equipo cuesta $ 15,000.00 en total. Estos materiales se eligieron por su accesibilidad de costo y disponibilidad en el mercado, cotización correspondiente a mayo de 2016.

3.4 Conclusiones

Se construyó y evaluó un deshidratador solar híbrido para productos agrícolas que incrementa el uso de la energía solar durante el proceso mediante un sistema de control automático de temperatura.

Al controlar la temperatura en el deshidratador, la duración del proceso se redujo un 50 % respecto al tiempo ocupado por los métodos tradicionales de deshidratado solar, que varían de acuerdo al producto a procesar.

Se pudo observar que cuanto mayor fue la intensidad de la radiación solar, menor fue el consumo de la energía eléctrica utilizado en la calefacción del equipo. Por lo cual se recomienda efectuar el deshidratado entre las 09:00 y 15:00 h para aprovechar al máximo la radiación y disminuir el consumo eléctrico.

Además, por ser un ambiente cerrado se conservó la calidad del producto y disminuyeron las pérdidas por exposición a diversos agentes como smog o polvo, problema común en el deshidratado al aire libre.

Además, al recircular el aire, únicamente se extrae la humedad del producto y no su olor y sabor característico por encontrarse en un ambiente cerrado y controlado.

En futuros trabajos, se recomienda mejorar el control, implementando un ancho de banda que estabilice la temperatura de deshidratado y reduzca el consumo de energía durante el proceso. Además, se recomienda aislar

herméticamente los componentes electrónicos del medidor para operar en diferentes condiciones de humedad y temperatura sin afectar su funcionamiento.

Adicionalmente, la configuración y componentes del deshidratador híbrido se pueden replicar a mayor escala, la diferencia principal sería que los colectores solares irían instalados en el techado de la construcción, en la misma posición que en el prototipo de estudio.

De acuerdo con la modelación matemática, para deshidratar 100 g de hojas de lechuga se requieren 255 min para procesar el producto a 37.51 °C hasta obtener una razón de humedad del 12%, momento en que el material deshidratado se podría pulverizar o almacenar para futuras aplicaciones.

3.5 Literatura citada

Akpinar, E. K. (2006). Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. Journal of Food Engineering, 77(4), 864–870.

Aosong. (2016). AM2302. Retrieved December 15, 2016, from http://aosong.com/en/products/details.asp?id=117

Awani, S., Kooli, S., Chargui, R., and Guizani, A. (2017). Numerical and experimental study of a closed loop for ground heat exchanger coupled with heat pump system and a solar collector for heating a glass greenhouse in north of Tunisia. International Journal of Refrigeration.

Bekkioui, N., Zoulalian, A., Hakam, A., Bentayeb, F., and Sesbou, A. (2009). Modelling of a Solar Wood Dryer with Glazed Walls. Maderas-Ciencia Y Tecnologia, 11(3), 191–205.

Boughali, S., Benmoussa, H., Bouchekima, B., Mennouche, D., Bouguettaia, H., and Bechki, D. (2009). Crop drying by indirect active hybrid solar - Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. Solar Energy, 83(12),

2223–2232.

Celma, A. R., Rojas, S., L??pez, F., Montero, I., and Miranda, T. (2007). Thin-layer drying behaviour of sludge of olive oil extraction. Journal of Food Engineering, 80(4), 1261–1271.

Chouicha, S., Boubekri, A., Mennouche, D., and Berrbeuh, M. H. (2013). Solar drying of sliced potatoes.an experimental investigation. In Energy Procedia (Vol. 36, pp. 1276–1285).

Crank, J. (1957). The mathematics of diffusion. JSTOR.

De Oliveira, G. H. H., Corrêa, P. C., Araujo, E. F., Valente, D. S. M., and Botelho, F. M. (2010). Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (Zea mays L.). International Journal of Food Science and Technology, 45(3), 546–554.

DISSET, O. (2017). Cajas de plástico plegables para frutas y vegetales. Retrieved March 15, 2017, from http://www.dissetodiseo.com/producto/cajas-de-plastico-plegables-para-frutas-y-vegetales/

Ekechukwu, O. ., and Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. Energy Conversion and Management, 40(6), 615–655.

Ferreira, A. G., Lúcia, A., Charbel, T., Pires, R. L., and Silva, J. G. (2007). Analysis of a hybrid solar-electrical dryer. Proceedings of COBEM, (19th International Congress of Mechanical Engineering).

Garita, C. S., Roque, R. M., and Foglia, R. C. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 5(14), 30–55.

Göğüş, F., and Maskan, M. (2006). Air drying characteristics of solid waste (pomace) of olive oil processing . Journal of Food Engineering, 72, 378–382.

Hussein, J. B., Filli, K. B., and Oke, M. O. (2016). Thin layer modelling of hybrid,

solar and open sun drying of tomato slices.

Iguaz, A., Martin, M. S., Mate, J., and Fernandez, T. (2003). Modelling effective moisture difusivity of rough rice (Lido cultivar) at low drying temperatures. Journal of Food.

Jideani, V. A., and Mpotokwana, S. M. (2009). Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. Journal of Food Engineering, 92(2), 182–188.

Kaciuba-Uscilko, H., and Ingram, D. L. (1977). The effect of propranolol on cold-induced thermogenesis in the newborn pig. Comparative Biochemistry and Physiology. C: Comparative Pharmacology, 56(1), 53–5.

Kaleemullah, S., and Kailappan, R. (2007). Monolayer moisture, free energy change and fractionation of bound water of red chillies. Journal of Stored Products Research, 43(2), 104–110.

Kumar, M. (2012). Effect of internal heating on sensible behavior of sugarcane juice in a stainless steel pot. Facta Universitatis-Series: Mechanical Engineering, 10(2), 113–124.

Kumar, M. (2013). Forced convection greenhouse papad drying: an experimental study. Journal of Engineering, Science and Technology, 8(2), 177–189.

Maupoey, P. F., Grau, A. M. A., Sorolla, A. M. A., and Baviera, J. M. B. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Editorial U.P.V.

Miliarium. (2016). Propiedades térmicas de materiales. Retrieved December 15, 2016, from http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp

Motevali, A., Minaei, S., and Khoshtagaza, M. H. (2011). Evaluation of energy consumption in different drying methods. Energy Conversion and Management, 52(2), 1192–1199.

Oliveros, C. E., Ramírez, C. A., Sanz, J. R., and Peñuela, A. E. (2013). Secador

solar de túnel para café pergamino.

Parallax. (2016). PLX-DAQ | Parallax Inc. Retrieved from https://www.parallax.com/downloads/plx-daq

Reyes, A., Mahn, A., and Cares, V. (2015). Analysis of dried onions in a hybrid solar dryer, freeze dryer and tunnel dryer.

Reyes, A., Mahn, A., Huenulaf, P., and González, T. (2014). Tomato Dehydration in a Hybrid-Solar Dryer. Journal of Chemical Engineering and Process Technology, 5(4), 1.

Reyes, A., Mahn, A., and Vásquez, F. (2014). Mushrooms dehydration in a hybrid-solar dryer, using a phase change material. Energy Conversion and Management, 83, 241–248.

Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., and Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. Journal of Food Engineering, 66(3), 323–328.

Toğrul, I. T., and Pehlivan, D. (2003). Modelling of drying kinetics of single apricot. Journal of Food Engineering, 58(1), 23–32.

Werapun, W., Pianroj, Y., Jumrat, S., and Kongchana, P. (2015). Drying kinetics of natural rubber sheets by using a hybrid solar-electric dryer with force convection. วารสาร วิชาการ เทคโนโลยี อุตสาหกรรม (The Journal of Industrial Technology), 10(3), 85–95.

Youcef-Ali, S., Messaoudi, H., Desmons, J. Y., Abene, A., and Le Ray, M. (2001). Determination of the average coefficient of internal moisture transfer during the drying of a thin bed of potato slices. Journal of Food Engineering, 48(2), 95–101.

4. MODELACIÓN MATEMÁTICA Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DURANTE EL DESHIDRATADO DE HOJAS DE *Stevia*

Resumen

La *Stevia* (*Stevia rebaudiana*) es una planta Sudamericana, utilizada como endulzante natural debido a sus propiedades edulcorantes. En México el consumo de esta planta se da a nivel medicinal e industrial. A continuación, se muestra el estudio de la cinética de deshidratado en hojas de *Stevia* hasta obtener una razón de humedad de 10 ± 2 % en un rango de temperatura de 40 a 80 °C con incrementos de 5 °C. Al incrementar la temperatura de deshidratado, la duración del proceso descendió de 4 a 1 h. Los valores de difusividad efectiva fluctuaron entre 84.67 E^{-10} y 4.78 E^{-08} m^2 s^{-1}, el factor de Arrhenius y la energía de activación fueron de 8.38 E^{01} m^2 s^{-1} y 37.19 kJ mol^{-1}. Para estimar el comportamiento del deshidratado en el producto, se ajustaron los datos experimentales de la razón de humedad y la razón estimada respecto al tiempo a 8 modelos matemáticos de deshidratado en capa fina. Para seleccionar el modelo que brindara la mejor bondad de ajuste a los datos, se aplicaron dos criterios estadísticos: ubicar el mayor valor del coeficiente de determinación y el menor valor del cuadrado medio del error entre la razón de humedad experimental y estimada. El modelo Midilli presentó la mejor bondad de ajuste con un promedio de SSE = 0.0035, R^2 = 99.7 % y RMSE = 0.0224. También se describen los efectos de la temperatura de deshidratado en las hojas de *Stevia* al validar el modelo Midilli donde la constante *k* incrementó con la temperatura. Finalmente, la entropía disminuyó al incrementar la temperatura de deshidratado y fue negativa como la entalpía; esta última y la energía libre de Gibbs incrementaron su valor a mayores temperaturas.

Palabras clave: Coeficiente de difusión, energía de activación, difusividad efectiva, velocidad de deshidratado, modelo matemático, entalpía, entropía.

4.1 Introducción

La *Stevia* (*Stevia rebaudiana*; F. Asteraceae) es una planta Sudamericana cultivada en Paraguay, Brasil y Argentina, de clima subtropical, subhúmedo con precipitaciones de 1200 a 1800 mm, se cultiva a temperaturas entre 15 y 30 °C (C.P.S., 2006). Las hojas de *Stevia* se utilizan como endulzante natural debido a sus propiedades edulcorantes y nutricionales. Poseen diversas propiedades medicinales y farmacéuticas para prevenir o controlar enfermedades como la glucemia, hipertensión (Lee *et al*., 2001) y la obesidad. El contenido de azúcar en la planta es nulo debido a la alta predominancia de esteviósidos en su composición. Las hojas se comercializan deshidratadas, enteras o pulverizadas, así como en extractos, en líquido y/o polvo. La hoja deshidratada deberá tener un color verde claro como indicador de buena calidad.

En México el rendimiento anual de la hoja deshidratada fluctúa entre 1.2 y 4 $ton \cdot ha^{-1}$ a partir del primer y hasta el tercer año de la puesta en marcha del cultivo (Ramirez, 2011). Para 2014 se estimó que el cultivo mundial oscilaría entre 11000 toneladas con un rendimiento de 4 a 5 $ton \cdot ha^{-1}$ (I. A., 2013).

El deshidratado de hojas de *Stevia* se realiza por lo general al aire libre o bajo invernadero sin tener un control total de la temperatura debido a las condiciones ambientales del lugar, lo que se refleja en la disminución de la calidad del producto (color y textura). Por lo tanto, se requiere de tecnologías adecuadas que mejoren la calidad y cantidad de los principios activos del producto y reduzcan las pérdidas por contaminación y/o deterioro, así como minimicen el consumo excesivo de energía y aumenten los rendimientos postcosecha.

Diversos estudios de cinética y modelación del deshidratado en productos herbales y de hoja se han llevado a cabo para procesar menta, albahaca, perejil y té negro, donde los análisis estadísticos en los modelos de deshidratado en capa fina muestran la superioridad de los modelos Logarítmico, Page y Midilli utilizados para describir el proceso.

Existen pocos estudios de este tipo en hojas de *Stevia*, como el trabajo efectuado por Lemus-Mondaca *et al.* (2015), quienes reportan que al contrastar estadísticamente 11 modelos semi-empíricos para deshidratar el producto en un rango de 30 a 80 °C el modelo Midilli representó mejor la cinética de deshidratado del producto. Otros autores como Periche *et al.* (2015) además de Jino y Assawarachan (2015) presentan los resultados de las características del producto relacionadas con el color o el contenido de edulcorantes en la planta (esteviósidos y rebaudiósidos), así como de sus actividades antioxidantes.

Los objetivos del presente trabajo fueron estudiar la cinética de deshidratado de hojas de *Stevia*, modelar matemáticamente el proceso y estudiar las propiedades termodinámicas del producto bajo las condiciones de control establecidas.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Descripción del experimento

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Energías Alternativas del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, localizado a 19° 29’ N, 98° 53’ O, y a una altitud de 2240 m. Las hojas de *Stevia* se colectaron por la mañana en un invernadero ubicado a 500 m del laboratorio, en la última semana de abril y en la primera semana de mayo de 2016. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico herméticas antes de realizar las pruebas de deshidratado para minimizar las pérdidas por marchitamiento o por contaminación con impurezas. Además, para minimizar los errores de medición se procuró que las muestras fueran homogéneas respecto al tamaño, color de hoja y fecha de recolección.

Las pruebas de deshidratación de las hojas de *Stevia* se realizaron en un horno de convección mecánica con control digital de temperatura FE-291-AD (Felisa, México), que cuenta con una resistencia eléctrica de 1060 W y opera en

un rango de temperatura de 5 °C a 250 °C. La temperatura del interior fue medida con un sensor PT-100 con resistencia de platino (precisión ± 1 °C). La velocidad del aire a la salida del ventilador del horno fue medida con un anemómetro digital LM-8102 (Lutron, Italia) (precisión ± 0.1 m s^{-1}). La masa de las muestras se midió con una balanza digital L-EQ-5 (Tor-Rey, México) con una capacidad de 5 kg y una precisión de ± 0.001 kg.

La masa inicial del producto en cada tratamiento fue de 0.150 kg. Las muestras de *Stevia* fresca se colocaron en el interior del horno distribuyéndolas en una bandeja de acero inoxidable con una superficie de 0.3 m^2. La capa de deshidratado fluctuó entre 24 y 26 mm. El tamaño de hojas osciló entre 10 y 15 cm de longitud con un espesor de ± 0.0014 m. Durante el experimento, la masa de las muestras fue determinada cada 10 min, y las pruebas finalizaron cuando el producto alcanzó una razón de humedad final de 10 ± 2 % (Ramirez, 2011).

Los valores de temperatura y velocidad del aire fueron constantes a la entrada y salida del equipo durante los experimentos. La variación de la temperatura fue de ± 3 °C y la velocidad del aire dentro del sistema fue de 3 m s^{-1}. Para estabilizar la temperatura del horno, este se encendió 15 min antes de cada prueba. Además, las muestras se deshidrataron el mismo día en que se colectaron.

4.2.2 Análisis estadístico

El experimento se basó en un diseño completamente al azar con arreglo unifactorial, considerando como único factor a la temperatura con 9 tratamientos comprendidos entre 40 y 80 °C con incrementos de 5 °C, que se efectuaron por triplicado obteniendo 27 unidades experimentales donde la variable respuesta fue la razón de humedad. El análisis estadístico y ajuste de los datos se efectuó con la herramienta *Curve Fitting Tool* incluida en el software Matlab v. 8.0.

4.2.3 Modelación matemática del proceso

La razón de humedad *MR* (adimensional) de las muestras fue determinada con la ecuación (4.1):

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \approx \frac{M_t}{M_o} \tag{4.1}$$

donde M_t [$g_{(agua)}$ $g^{-1}_{(materia\ seca)}$] es el contenido de humedad del producto en el tiempo *t*, M_o [$g_{(agua)}$ $g^{-1}_{(materia\ seca)}$]es el contenido de humedad inicial del producto y M_e [$g_{(agua)}$ $g^{-1}_{(materia\ seca)}$] es el contenido de humedad de equilibrio del producto. Los valores del contenido de humedad de equilibrio son relativamente pequeños comparados con M_t y M_o, y por consiguiente puede considerarse que M_e = 0 (Celma *et al*., 2007).

Para simular el deshidratado en hojas de *Stevia*, se hizo un análisis estadístico de los datos a 8 modelos de deshidratado en capa fina (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Modelos evaluados para el deshidratado de *Stevia*.

Modelo	Ecuación*	Referencia
Dos términos exponencial	$MR = aexp^{(-kt)}+(1-a)exp^{(-kat)}$	(Akpinar *et al.*, 2003)
Dos términos, Suma de exponenciales	$MR = aexp(-k_0t)+bexp(-k_1t)$	(Toğrul y Pehlivan, 2004)
Henderson y Pabis	$MR = aexp^{(-kt)}$	(Akpinar *et al.*, 2003)
Logarítmico	$MR = aexp^{(-kt)}+c$	(Yaldiz *et al.*, 2001)
Midilli-Kucuk	$MR = aexp(-kt^n)+bt$	(Midilli *et al.*, 2002)
Page	$MR = exp(-kt^n)$	(V.T. Karathanos y Belessiotis, 1999)
Page modificado	$MR = exp[-(kt)^n]$	(Wang *et al.*, 2007)
Verma	$MR = aexp^{(-kt)}+(1-a)exp^{(-gt)}$	(Verma *et al.*, 1985)

* donde *k, n, a, b* y *c* representan los parámetros empíricos de cada modelo.

La razón de contenido de humedad (*MR*) se determinará con la ecuación (4.1) para ajustar a las curvas *MR* con respecto a *t* a los 8 modelos.

Además, los criterios estadísticos para comprobar la bondad de ajuste de *MR* a los modelos y para seleccionar la expresión que mejor describa el proceso de deshidratado del producto, serán ubicar los mayores valores del promedio del

coeficiente de determinación, R^2, los menores valores de RMSE y SSE (Akgun y Doymaz, 2005; E. Kavak Akpinar, 2006).

a) Ajuste en las constantes y coeficientes del modelo de deshidratado

Para calibrar el modelo que mejor describa el proceso de deshidratado de hojas de *Stevia*, se aplicará un análisis de regresión no lineal con el software Excel de Microsoft Windows, basado en la minimización de la suma de cuadrados. Los valores de los coeficientes del modelo se estimarán en función de la temperatura.

b) Generalización de las curvas de deshidratado

Se verificará la posibilidad de ajustar los datos a una curva general de deshidratado para el rango de temperatura de control, aplicando la metodología propuesta por Motta Lima (1999) quien correlaciona *MR* con respecto a *τ* con la ecuación (4.2):

$$\tau = \frac{N_c \cdot t}{MR_o} \tag{4.2}$$

donde *τ* (adimensional) es el tiempo adimensional de deshidratado, MR_o (adimensional) es *MR* inicial y N_c (min^{-1}) es la tasa constante de deshidratado.

c) Validación del modelo

El criterio para validar el modelo seleccionado será graficar *MR* estimada, MR_{est}, con respecto a MR_{exp} (Simal *et al*., 2005; Toğrul y Pehlivan, 2003); en el rango de *T* de control.

4.2.4 Cinética de deshidratado

a) Velocidad de deshidratado

Se define como el cambio en *MR* del producto por unidad de tiempo, *DR* [$g_{(agua)}$ $g^{-1}_{(materia\ seca)}$ h^{-1}], y se calcula con la ecuación (4.3):

$$DR = \frac{MR_{t+\Delta t} - MR_t}{\Delta t} \tag{4.3}$$

donde ***Δt*** (h) es el intervalo de tiempo considerado.

b) Difusividad efectiva

La transferencia de masa en estado transitorio del deshidratado en capa fina de productos alimenticios se estudia generalmente utilizando la ecuación de la Segunda Ley de difusión de Fick. Para establecer el valor de la difusividad efectiva, D_{eff} (m^2 s^{-1}), se asumió a la hoja de estevia como un cuerpo de geometría plana, dicho parámetro fue expresado mediante la ecuación 4.4 (Crank, 1957):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot n + 1)^2} \cdot \exp\left(- \frac{(2 \cdot n + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot L^2} \right) \tag{4.4}$$

donde *t* (min) es el tiempo de deshidratado, *L* (m) es el espesor medio del material a deshidratar y *n* (adimensional) es el número de términos. La solución analítica de esta expresión en cuerpos de geometría plana asume una distribución uniforme de la humedad inicial, simplificando su movimiento por difusión y despreciando el encogimiento del producto. Para periodos de deshidratado largos donde *MR* < 0.6 y *n*=0 la ecuación (4.4) se simplifica a (Iguaz *et al.*, 2003):

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(- \frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot L^2} \right) \tag{4.5}$$

Aplicando la regla de logaritmos en ambos lados de la ecuación (4.5) se obtiene:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \left(\frac{\pi^2 \cdot D_{eff} \cdot t}{4 \cdot L^2}\right) \quad (4.6)$$

y se extrae:

$$k_o = \left(\frac{\pi^2 \cdot D_{eff[T]}}{4 \cdot L^2}\right) \quad (4.7)$$

donde k_o (adimensional) es la pendiente de la recta ln(*MR*) con respecto a *t*. El valor de D_{eff} para cada temperatura [*T*] se obtiene resolviendo la ecuación (4.7).

c) D_{eff} vs MR

El comportamiento de la curva D_{eff} con respecto a *MR* se caracteriza por tres etapas: 1) Un incremento rápido de D_{eff} y *T* a pesar de la pérdida de *MR*, 2) La estabilización de D_{eff} y *T*, así como 3) Una reducción de *MR* con una variación en D_{eff} de acuerdo con el nivel de temperatura aplicado. En la primera etapa del deshidratado, la difusión debería ser el principal mecanismo de transporte de humedad del producto. Conforme transcurre *t*, la difusión del vapor debería ser el medio dominante de difusión de humedad en la última parte del deshidratado. Para estimar D_{eff} por cada valor de *MR*, la ecuación (4.5) se evalúa con el número de Fourier, ecuación (4.8), (Bal *et al*., 2010; Ruiz Celma *et al*., 2009)**:**

$$F_o = \left(\frac{D_{eff[MR]} \cdot t}{L^2}\right) \quad (4.8)$$

reescribiendo la ecuación (4.5) y transformándola a su forma lineal se obtiene:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 \cdot F_o}{4}\right) \quad (4.9)$$

$$\ln(MR) = -0.21 - 2.4674 \cdot F_o \quad (4.10)$$

despejando F_o de la ecuación (4.10) se genera:

$$F_o = -0.4052 \cdot \ln(MR) - 0.0851 \quad (4.11)$$

por último, el valor de $D_{eff[MR]}$ se despeja en la ecuación (4.8) y se sustituye F_o con la ecuación (4.11).

d) Energía de activación

La energía de activación, E_a, expresa la dependencia de D_{eff} en función de la temperatura, es decir, representa la energía necesaria para iniciar la reacción de la difusión (Simal *et al.*, 2005) en un producto. Para evaluar esta dependencia se utiliza la ecuación 4.12 de Arrhenius.

$$D_{eff[G]} = D_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \tag{4.12}$$

donde $D_{eff[G]}$ ($m^2\ s^{-1}$) es la difusividad efectiva general [*G*] del proceso, D_o ($m^2\ s^{-1}$) es el factor de frecuencia o pre-exponencial de la expresión de Arrhenius, E_a ($J\ mol^{-1}$) es la energía de activación, R ($J\ mol^{-1}\ K^{-1}$) es la constante universal de los gases = 8 3143 y T (K) es la temperatura absoluta. Convirtiendo la ecuación (4.12) a su forma lineal, aplicando la ley de los logaritmos se obtiene:

$$\ln\left(D_{eff[G]}\right) = \ln\left(D_o\right) - \frac{E_a}{R \cdot T} \tag{4.13}$$

Los valores de E_a se obtienen graficando $\ln(D_{eff})$ con respecto a T^{-1}, para confirmar la correlación entre D_{eff} y T.

De acuerdo a Göğüş y Maskan (2006) los valores de E_a aumentan al incrementar el grosor en la capa de deshidratado, esto debería considerarse para diseñar los sistemas de deshidratado y calcular la energía necesaria para remover la humedad del producto.

4.2.5 Propiedades termodinámicas

Las propiedades termodinámicas del deshidratado de hojas de *Stevia* se obtuvieron con el método de Jideani y Mpotokwana (2009), ecs 4.14-4.16:

$$\Delta H = E_a - R \cdot T \tag{4.14}$$

$$\Delta S = R \cdot \left[\ln\left(A_0 \right) - \ln\left(\frac{k_B}{h_P} \right) - \ln(T) \right] \tag{4.15}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \tag{4.16}$$

donde ΔH (J mol^{-1}) es la variación de entalpía, ΔS (J mol^{-1} K^{-1}) es la variación de entropía, ΔG (J mol^{-1}) es la variación de energía libre de Gibbs, k_B (J K^{-1}) es la constante de Boltzmann, k_B = 1.38 x 10^{-23} y h_P (J s^{-1}) es la constante de Planck, h_P = 6.626 x 10^{-34}.

La entalpia es la energía requerida para remover la humedad en un producto durante el proceso de deshidratado y disminuye al aumentar la temperatura (De Oliveira *et al*., 2010).

La entropía es el grado de desorden entre el agua y el producto a deshidratar. Cuando aumenta la temperatura, incrementa la excitación de las moléculas de agua generando un desorden en el sistema (De Oliveira *et al*., 2010).

La energía libre de Gibbs se considera como la cantidad del trabajo efectuado por el sistema durante el proceso de adsorción o desorción (Kaleemullah y Kailappan, 2007). Valores positivos de ΔG indican que no existe una variación espontanea de dicho parámetro y se requieren contribuciones externas de energía para que el fenómeno suceda.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Modelación matemática del proceso

Con la ecuación (4.1) se obtuvo *MR* experimental, MR_{exp}, para diferentes intervalos de tiempo y temperatura. A continuación, se muestran las hojas de *Stevia* frescas y deshidratadas (Figura 4.1).

Figura 4.1. Hojas de *Stevia* antes y después de efectuar el proceso de deshidratado.

El comportamiento de las curvas MR_{exp} con respecto a *t* para las muestras de *Stevia* a diferentes niveles de temperatura, *T*, se muestran en la Figura 4.2.

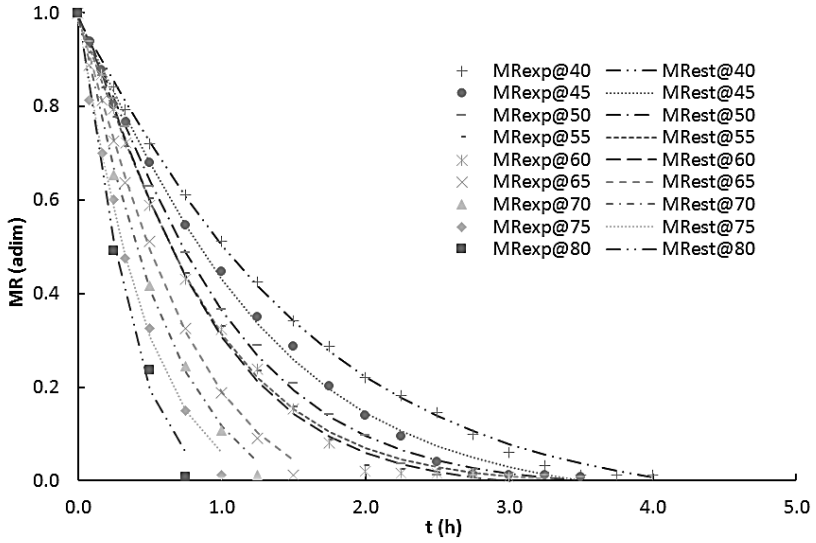

Figura 4.2. Comparación entre la razón de humedad experimental (MR_{exp}) y estimada (MR_{est}) con respecto al tiempo (*t*) de deshidratado.

Conforme se incrementó la temperatura de deshidratado, T_{exp}, los valores de *t* para obtener MR_f = 10 ± 2 % se redujeron de 4 a 1 h. Al graficar *t* con respecto a T_{exp} se obtuvo la ecuación (4.17) para estimar *t* con R^2 = 97.59 %:

$$t = -0.0548 \cdot T_{exp} + 5.0016 \quad (4.17)$$

Comportamientos similares reportó Kadam *et al.* (2011) para el deshidratado en hojas de menta. Los resultados muestran que T_{exp} es el principal factor que influye en la duración del proceso.

De acuerdo al trabajo realizado por Lemus-Mondaca *et al.* (2015) la duración de t para el mismo rango de datos en hojas de *Stevia* fluctuó entre 0.98, y 9.7 h, lo cual difiere en un 50 % aproximado de la duración de los tratamientos observados en el presente trabajo.

Se muestra el ajuste de los datos experimentales a 8 modelos matemáticos de deshidratado en capa fina para procesar hojas de *Stevia* bajo 9 condiciones de temperatura (Cuadro 4.2).

La selección del modelo que mejor describiera el proceso se efectuó de acuerdo con el mayor valor de R^2 y al menor valor de RMSE y SSE, los parámetros en todos los casos se obtuvieron en un rango de R^2 (95.5 a 99.8 %), RMSE (0.014 a 0.132) y SSE (0.001 a 0.034), respectivamente.

Cuadro 4.2. Coeficientes y estadísticos de los modelos de deshidratado de *Stevia*.

Modelo	Temperatura (°C)	Constantes y coeficientes	Valores				SSE	R^2	RMSE
Dos-T Exp	40	*a, k*	1.67	0.97			0.008	0.996	0.021
	45		1.68	1.19			0.010	0.995	0.024
	50		1.72	1.40			0.004	0.998	0.016
	55		1.67	1.53			0.004	0.998	0.016
	60		1.75	1.62			0.004	0.997	0.018
	65		1.76	2.19			0.007	0.995	0.026
	70		1.77	2.67			0.004	0.994	0.030
	75		1.65	3.12			0.006	0.994	0.029
	80		1.83	4.38			0.005	0.992	0.038
Dos-T, Suma Exp	40	*a, k_0, b, k_1*	90.41	0.57	-89.30	0.57	0.024	0.987	0.038
	45		-33.05	0.34	34.01	0.35	0.020	0.991	0.036
	50		-7.26	0.64	8.29	0.68	0.005	0.997	0.018
	55		18.09	0.98	-17.05	0.96	0.010	0.995	0.026
	60		23.33	0.96	-22.28	0.95	0.011	0.994	0.030
	65		-20.84	0.65	21.83	0.68	0.003	0.997	0.022
	70		17.28	0.75	-16.30	0.71	0.003	0.996	0.032
	75		33.32	0.94	-32.37	0.91	0.012	0.989	0.045
	80		56.57	0.83	-55.65	0.82	0.034	0.955	0.132
Henderson y Pabis	40	*a, k*	1.03	0.77			0.018	0.990	0.031
	45		1.03	0.93			0.022	0.991	0.035
	50		1.04	1.09			0.015	0.994	0.028
	55		1.03	1.20			0.012	0.994	0.028
	60		1.05	1.25			0.015	0.991	0.033
	65		1.04	1.63			0.020	0.986	0.045
	70		1.02	2.00			0.011	0.985	0.048
	75		1.01	2.41			0.012	0.989	0.039
	80		1.01	3.19			0.010	0.986	0.051
Logarítmico	40	*a, k, c*	1.09	0.62	-0.08		0.003	0.998	0.014
	45		1.08	0.76	-0.07		0.008	0.996	0.021
	50		1.07	0.96	-0.04		0.007	0.996	0.021
	55		1.05	1.08	-0.04		0.007	0.996	0.023
	60		1.09	1.07	-0.05		0.007	0.995	0.024
	65		1.16	1.18	-0.15		0.004	0.997	0.021
	70		1.15	1.46	-0.14		0.001	0.997	0.020
	75		1.07	2.01	-0.07		0.005	0.995	0.028
	80		1.06	2.74	-0.05		0.006	0.991	0.047
Midilli-K	40	*a, k, n, b*	0.98	0.65	1.10	-0.01	0.003	0.998	0.014
	45		0.97	0.80	1.16	-0.01	0.006	0.997	0.020

	50		0.98	0.99	1.19	-0.00	0.003	0.998	0.015
	55		0.97	1.13	1.19	-0.00	0.004	0.998	0.016
	60		0.99	1.16	1.20	-0.00	0.003	0.998	0.017
	65		0.98	1.50	1.17	-0.02	0.002	0.998	0.018
	70		0.99	1.81	1.10	-0.04	0.001	0.998	0.023
	75		0.98	2.46	1.13	-0.02	0.005	0.995	0.029
	80		0.99	3.83	1.25	-0.01	0.005	0.993	0.050
	40		0.69	1.16			0.008	0.995	0.021
	45		0.86	1.17			0.011	0.995	0.024
	50		1.02	1.18			0.004	0.998	0.015
	55		1.17	1.15			0.005	0.997	0.017
Page	60	*k, n*	1.19	1.21			0.004	0.997	0.017
	65		1.72	1.24			0.006	0.995	0.025
	70		2.20	1.25			0.004	0.995	0.028
	75		2.70	1.15			0.007	0.993	0.030
	80		4.06	1.29			0.005	0.993	0.036
	40		0.73	1.16			0.008	0.995	0.021
	45		0.88	1.17			0.011	0.995	0.024
	50		1.02	1.18			0.004	0.998	0.015
	55		1.15	1.15			0.005	0.997	0.017
Page M.	60	*k, n*	1.16	1.21			0.004	0.997	0.017
	65		1.55	1.23			0.006	0.995	0.025
	70		1.87	1.25			0.004	0.995	0.028
	75		2.36	1.15			0.007	0.993	0.03
	80		2.96	1.29			0.005	0.993	0.036
	40		-24.71	0.91	0.90		0.016	0.991	0.031
	45		-23.26	0.61	0.62		0.012	0.995	0.027
	50		-5.77	0.60	0.65		0.007	0.997	0.020
	55		7.88	0.72	0.67		0.006	0.997	0.020
Verma	60	*a, k, k_1*	-23.45	0.92	0.93		0.016	0.991	0.035
	65		-8.76	0.76	0.82		0.004	0.997	0.021
	70		-7.88	0.96	1.04		0.001	0.997	0.021
	75		-3.33	1.26	1.46		0.004	0.996	0.026
	80		-12.45	2.06	2.12		0.006	0.991	0.047

Del Cuadro 4.2, el modelo Midilli fue el que mejor describió el proceso de deshidratado en hojas de *Stevia* para el rango de temperatura, presentando el mejor ajuste de los datos a las curvas MR_{exp} con respecto a MR_{est}, con valores promedio de R^2 = 99.7 %, RMSE = 0.0224 y SSE = 0.0035. Los siguientes

modelos con mejor ajuste fueron Logarítmico y Dos términos, con R^2 (99.57 y 99.54 %), RMSE (0.0243 y 0.0242) y SSE (0.0053 y 0.0058) respectivamente.

En el estudio de deshidratado en hojas de *Stevia* efectuado por Lemus-Mondaca *et al.* (2015) se aplicaron temperaturas en un rango de 30 a 80 °C con una velocidad del aire de 2 m s^{-1}, aplicando 11 modelos matemáticos a los datos experimentales, donde el modelo propuesto por Midilli *et al.* (2002) también fue el que presentó mejor ajuste a los datos experimentales.

Diversos autores reportan resultados similares al estudiar la cinética de deshidratado en productos herbales y de hoja, donde el modelo Midilli presenta el mejor ajuste de los datos a la curva de deshidratado, incluyendo los trabajos realizados por Doymaz *et al.* (2006) en eneldo y perejil, Özbek y Dadali (2007) en hojas de menta y por I. Doymaz (2011) en tomillo.

Los estadísticos de la constante de deshidratado, *k*, y los coeficientes del modelo Midilli para deshidratar hojas de *Stevia* fluctuaron entre 99.3 y 99.8 % para R^2, 0.014 y 0.05 para *RMSE*, y entre 0.001 y 0.006 para SSE (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. Constante *k*, y coeficientes del modelo Midilli a diferentes valores de temperatura (*T*).

T (°C)	*k*	*a*	*N*	*b*	*SSE*	R^2	*RMSE*
40	0.651	0.9851	1.106	-0.0104	0.0034	0.9983	**0.0146**
45	0.8017	0.9779	1.162	-0.0087	0.0067	0.9973	0.0204
50	0.992	0.988	1.195	-0.0029	0.0036	**0.9986**	0.0151
55	1.136	0.977	1.198	-0.0015	0.0040	0.9982	0.0169
60	1.162	0.9948	1.2	-0.0046	0.0037	0.9980	0.0176
65	1.5	0.9838	1.179	-0.0298	0.0028	0.9982	0.0186
70	1.813	0.9977	1.108	-0.0470	**0.0016**	0.9980	0.0234
75	2.469	0.9812	1.131	-0.0230	0.0053	0.9956	0.0296
80	3.836	0.9979	1.255	-0.0119	0.0050	0.9936	0.0501

a) Ajuste en k y los coeficientes del modelo Midilli

Se estudió del efecto de la temperatura en *k* y los coeficientes del modelo, así como su ajuste y validación. Para ajustar los datos al modelo, la estimación de *MR* se expresó en función de *k* y los coeficientes *a, n, b* y *t* con la ecuación (4.18):

$$\frac{M_t}{M_o} = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t \qquad (4.18)$$

Los valores de *k* variaron de acuerdo con las propiedades del material y fueron directamente proporcionales a *T*. Al graficar *k* en función de *T*, se obtuvo la ecuación (4.19) con una correlación de R^2 = 95.22 % (Figura 4.3).

$$k = 0.1259 \cdot e^{0.0398 \cdot T} \qquad (4.19)$$

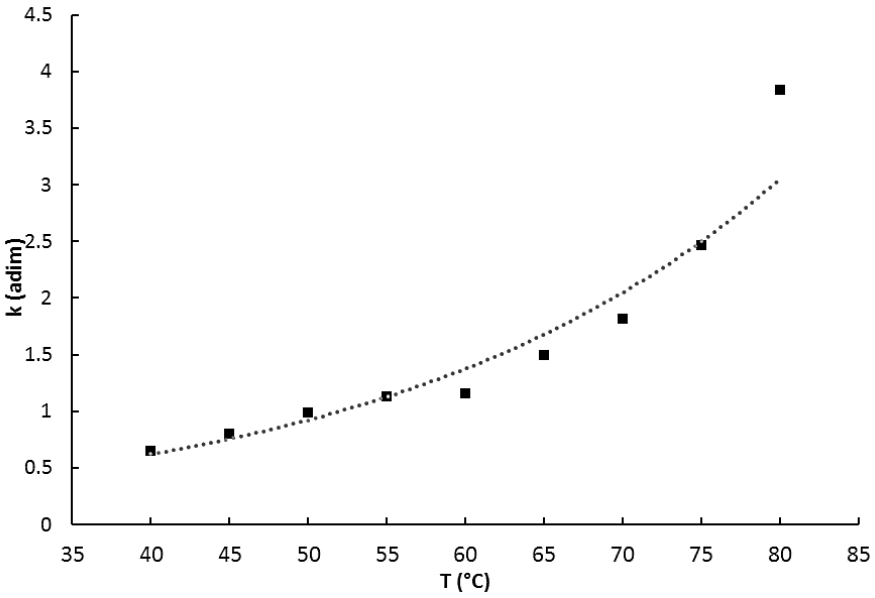

Figura 4.3. Constante *k* con respecto a la temperatura (*T*) entre 40 y 80 °C.

Autores como Panchariya *et al.* (2002) y Togrul y Pehlivan (2002) correlacionan k con *T*. Los valores de *k* se relacionan directamente con la difusividad de la humedad únicamente cuando el deshidratado se efectúa durante

el período de velocidad decreciente (Ibrahim Doymaz, 2006). Además, *k* debería asociarse con la facilidad de remover la humedad de las hojas de *Stevia*.

Los valores de *a* y *n* mantuvieron una relación positiva con *T*. Al graficar los valores de a con respecto a *T* se mostró una dispersión de $R^2 = 0.2521$, por lo que se obtuvo un valor promedio de *a* = 0.987.

Al graficar los valores de *n* con respecto a *T* se presentó un marcado comportamiento disperso de los valores con $R^2 = 0.0923$, por lo tanto, se estimó el valor promedio de *n* = 1.1704.

Mientras el coeficiente *b* mantuvo una relación negativa con *T*. Al graficar *b* con respecto a *T* existió una dispersión de los valores con $R^2 = 0.2578$ por lo que se generó un valor promedio de *b* = -0.0155.

b) Generalización de la curva de deshidratado

Se verificó la posibilidad de ajustar los datos experimentales a una expresión general basada en el modelo Midilli para estimar los valores de *MR* de las hojas de *Stevia* durante el proceso de deshidratado en cualquier lapso de tiempo y dentro del rango de temperatura de 40 a 80 °C. Para esto se sustituyó la ecuación (4.19) y el promedio de los coeficientes del modelo Midilli-Kucuk en la ecuación (4.18); de esta forma la expresión general para estimar el proceso de deshidratado en hojas de *Stevia* fue:

$$MR_{aj} = 0.987 \cdot \exp\left[-\left(0.0025 \cdot T^2 - 0.2357 \cdot T + 6.2723\right) \cdot t^{1.1704} \right] - 0.0155 \cdot t \qquad (4.20)$$

Las curvas *MR* con respecto a τ se muestran en la Figura 4.4.

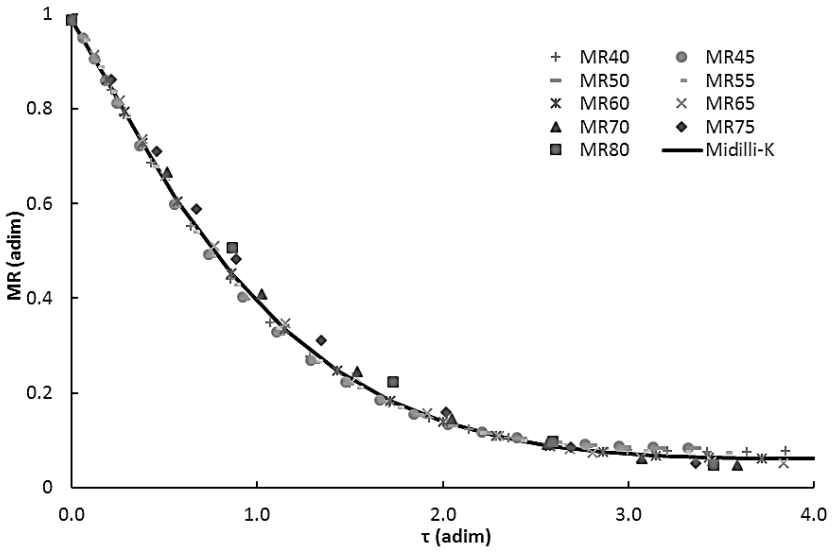

Figura 4.4. Curva de deshidratado modelada con la ecuación 4.20.

Con la ecuación (4.20) del modelo Midilli generalizado se podrá describir el deshidratado del producto al estimar los valores de *MR* en cualquier valor de *T* y *t* en el rango de control establecido.

Para validar el modelo Midilli generalizado, se contrastó MR_{exp} con respecto a *MR* ajustada, MR_{aj}, a diferentes temperaturas de control, y hubo una dispersión promedio alrededor de la línea de ajuste de $R^2 = 0.9943$ (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Correlación del contraste entre la razón de humedad experimental (MR_{exp}) con respecto a la razón de humedad ajustada (MR_{aj}).

T (°C)		Ecuación linear *y*	R^2
40		0.9529x - 0.0021	0.9816
45		0.9073x + 0.101	0.9973
50		0.864x + 0.1511	0.9976
55		0.8873x + 0.1346	0.998
60	$MR_{aj} - MR_{exp}$	0.9215x + 0.0588	0.9973
65		0.9203x + 0.0695	0.9967
70		0.9281x + 0.0484	0.9964
75		0.9644x + 0.0317	0.9921
80		0.9229x + 0.0531	0.9919

4.3.2 Cinética de deshidratado

a) Velocidad de deshidratado

Los valores de *DR* se incrementaron con la temperatura de control, Figura 4.5, es decir, el principal factor que influyó en la cinética del deshidratado de hojas de *Stevia* fue la temperatura (Belghit *et al.*, 2000; Saeed *et al*., 2008), debido a que el proceso efectuado a mayor temperatura incrementa los valores en la difusividad y el déficit de presión de vapor (Methakhup *et al*., 2005; Prabhanjan, *et al*., 1995). Los valores de DR_{prom} fluctuaron entre 0.2815 y 1.322 g h^{-1} de 40 a 80 °C respectivamente. En el rango de *T* de 40 a 60 °C, los valores de DR fueron similares; a partir de 65 a 80 °C, el incremento en DR fue más notorio. Al graficar los valores de DR_{prom} con respecto a *T*, se obtuvo la ecuación (4.21) para estimar *DR* con R^2 = 0. 9696.

$$DR_{prom} = 0.0597 e^{0.0387T} \qquad (4.21)$$

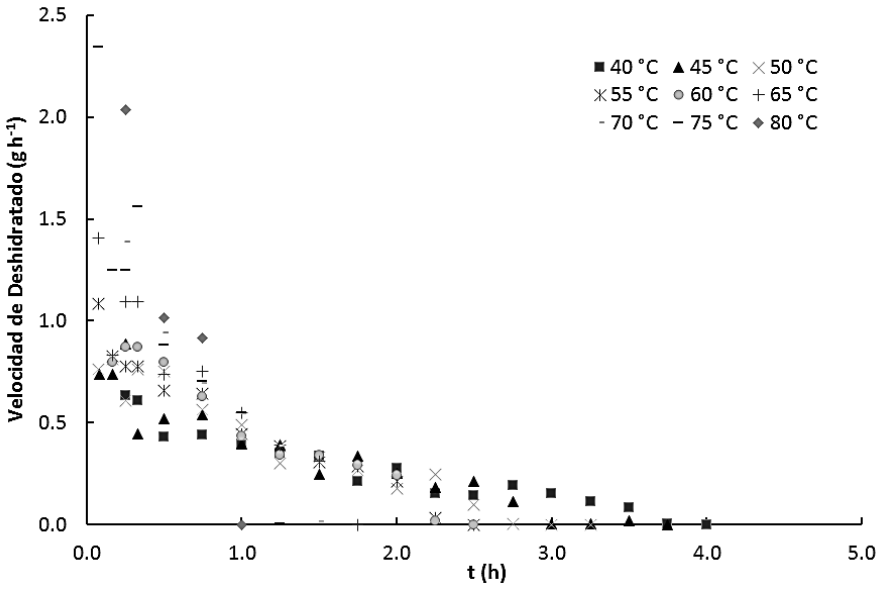

Figura 4.5. Velocidad de deshidratado (*DR*) con respecto al tiempo (*t*) en hojas de *Stevia* a diferente temperatura, 40℃-80℃.

b) Difusividad efectiva

Los valores de D_{eff} se obtuvieron sustituyendo en la ecuación (4.8) los valores de k_o por cada condición de deshidratado, así como el espesor de la hoja, *L*.

Para correlacionar ln(*MR*) y *t* bajo las condiciones experimentales de deshidratado se aplicó una regresión polinómica de tercer orden (Erenturk *et al.* 2010) mediante la ecuación 4.22:

$$\ln(MR) = A \cdot t^3 + B \cdot t^2 + C \cdot t + D \qquad (4.22)$$

donde *A*, *B*, *C* y *D* (adimensional) son constantes de la regresión (Cuadro 4.5). Los valores promedio de R^2 = 97.58 % indican la bondad de ajuste de la relación empírica de la variación de ln(*MR*) con respecto a *t*.

Cuadro 4.5. Regresión de los coeficientes de ln(*MR*) para diferentes temperaturas.

	Coeficientes de regresión x 10^1				
T (°C)	A	B	C	D	R^2
40	0.0584	-0.5404	0.1658	-0.2032	0.9821
45	0.1893	-1.203	0.6103	-0.2288	0.9838
50	0.2116	-1.189	0.2281	-0.1468	0.9841
55	0.1582	-0.7487	-0.5854	-0.0275	0.9842
60	0.3103	-1.501	0.1809	-0.142	0.9815
65	0.5517	-2.543	0.2234	-0.1369	0.9785
70	1.069	-4.123	0.5098	-0.1137	0.9665
75	3.678	-8.284	1.093	-0.1917	0.9711
80	10.6	-18.03	2.269	-0.0437	0.9504

Los valores calculados de D_{eff} de las hojas deshidratadas de *Stevia* se incrementaron a medida que aumentaba la temperatura de deshidratado, fluctuaron en un rango de 84.67 E^{-10} y 4.78 E^{-08} m^2 s^{-1} y R^2_{prom} = 90.44 % (Cuadro 4.6). Estos valores se encuentran dentro del rango de 10^{-9} y 10^{-11} m^2 s^{-1} para el deshidratado de materiales alimenticios (Maskan *et al.*, 2002).

Cuadro 4.6. Difusividad efectiva (D_{eff}) y su ecuación lineal para hojas de *Stevia* a diferentes tratamientos, °C.

T (°C)	Ecuación linear ln(*MR*)	k_0	D_{eff}, $m^2\ s^{-1}$	R^2
40	-1.0659*t* + 0.3243	1.0659	$84.67E^{-10}$	0.9195
45	-1.2972*t* + 0.2625	1.2972	$1.03E^{-08}$	0.9125
50	-1.5*t* + 0.271	1.5	$1.19E^{-08}$	0.9245
55	-1.6008*t* + 0.2147	1.6008	$1.27E^{-08}$	0.9621
60	-1.6798*t* + 0.2749	1.6798	$1.33E^{-08}$	0.918
65	-2.5013*t* + 0.3232	2.5013	$1.99E^{-08}$	0.8968
70	-3.2324*t* + 0.4521	3.2324	$2.57E^{-08}$	0.8718
75	-3.9198*t* + 0.3563	3.9198	$3.11E^{-08}$	0.8881
80	-6.0161*t* + 0.5262	6.0161	$4.78E^{-08}$	0.8464

Los resultados difieren de los presentados por Lemus-Mondaca *et al.* (2015) quienes estudiaron el proceso en *Stevia* de 40 a 80 °C y a una velocidad del aire de 2 m s^{-1} y reportan valores de D_{eff} desde 1.21 E^{-12} a 8.11 E^{-12} $m^2\ s^{-1}$. Resultados similares reportan Jin Park *et al.* (2002) en hojas de menta, Doymaz *et al.* (2006) en perejil y eneldo, y Panchariya *et al.* (2002) en hojas de té negro.

c) D_{eff} vs MR

Al contrastar D_{eff} con respecto a MR_{exp} de hojas de *Stevia* a diferentes temperaturas de deshidratado los valores de D_{eff} fueron directamente proporcionales a la temperatura.

Los valores de D_{eff} incrementaron al disminuir MR_{exp} tal como lo reportan Özbek y Dadali, (2007) y Sharma *et al*. (2005), es decir el valor máximo de D_{eff} se obtuvo al final del proceso. Cuando se aplicaron altas temperaturas de deshidratado los valores de D_{eff} fueron mayores en cualquier punto de *MR*, resultando en una menor duración del proceso.

d) Energía de activación

Los valores de D_o y E_a de la difusión de humedad en hojas de *Stevia* se estimaron con la pendiente y la intersección de la recta ln(D_{eff}) con respecto a T^{-1} respectivamente. La ecuación 4.23 describe esta condición con R^2 = 93.15 %.

$$\ln(D_{eff}) = -4473.6 \cdot T^{-1} - 4.4282 \quad (4.23)$$

Los valores de D_o y E_a fueron 8.38x10^{01} m^2 s^{-1} y 37.19 kJ mol^{-1} respectivamente. E_a se ubica en el rango reportado para materiales alimenticios y productos agrícolas. Resultados similares reportan Lemus-Mondaca *et al.* (2015) al deshidratar el mismo producto con E_a = 39.91 kJ mol^{-1}.

El valor de E_a fue similar a los resultados presentados por Kadam *et al.* (2011) en albahaca, y por Doymaz *et al.* (2006) en eneldo y perejil; en cambio, dicho parámetro fue menor que la E_a del té negro, hojas de menta y tomillo.

4.3.3 Propiedades termodinámicas

Las propiedades termodinámicas del deshidratado de hojas de *Stevia* se muestran en el Cuadro 4.7, donde la entropía disminuyó al incrementar la temperatura de deshidratado y fue negativa como la entalpía; esta última y la energía libre de Gibbs incrementaron su valor a mayores temperaturas.

La entalpia aumentó al incrementar la temperatura, es decir, se requiere una mayor cantidad de energía para remover la humedad del producto durante el proceso (De Oliveira *et al*., 2010). En el deshidratado de hojas de *Stevia*, la influencia de la entalpia se observó al obtener valores negativos que indican la ausencia de reacciones endergónicas, las cuales requieren un suministro de energía del ambiente en que se encuentra el producto para que ocurran.

Valores negativos de entropía indican alteraciones químicas o modificaciones en la estructura del producto durante el deshidratado (De Oliveira *et al*., 2010).

La energía libre de Gibbs incrementó de 74062.99 a 78834.87 J mol^{-1}, valores positivos indican que el deshidratado es un proceso no espontáneo y se requiere aplicar energía externa para que el proceso ocurra (De Oliveira *et al*., 2010).

Cuadro 4.7. Propiedades termodinámicas del deshidratado de hojas de *Stevia*.

T (°C)	ΔH (J mol^{-1})	ΔS (J mol^{-1} K^{-1})	ΔG (J mol^{-1})
40	-2594.79	-244.80	74062.99
45	-2634.44	-243.29	74769.73
50	-2674.33	-242.22	75597.94
55	-2715.06	-241.80	76632.73
60	-2755.98	-241.53	77709.29
65	-2790.72	-238.34	77804.71
70	-2826.21	-236.33	78271.23
75	-2862.07	-234.85	78900.77
80	-2886.21	-231.41	78834.87

Además, se determinaron las ecuaciones (24-26) para estimar los valores de ΔH, ΔS y ΔG en el rango de temperatura de estudio con valores de R^2 de 0.9968, 0.9365 y 0.9464 respectivamente.

$$\Delta H = -7.4266 \cdot T - 2303.3 \quad (4.24)$$

$$\Delta S = 0.3137 \cdot T - 258.22 \quad (4.25)$$

$$\Delta G = 126.66 \cdot T + 69354 \quad (4.26)$$

4.4 Conclusiones

Se estudió la cinética de deshidratado en hojas de *Stevia* con técnicas de modelación matemática para evaluar el efecto de la temperatura de 40 a 80 °C, con incrementos de 5 °C hasta obtener una razón final de humedad de 10 ± 2 %.

Al incrementar la temperatura disminuyó la duración del proceso. Se requieren entre 60 y 240 minutos para completar un ciclo de deshidratado de acuerdo con la temperatura aplicada.

La mayor pérdida de humedad durante el deshidratado de las hojas de *Stevia* ocurrió durante el período de velocidad decreciente para todas las condiciones experimentales, sin presentar un periodo de velocidad constante al inicio del experimento. De esta manera se demostró que la transferencia de masa interna se produjo por difusión y no por evaporación en la superficie del producto.

Además, conforme se incrementó la temperatura, los valores de la velocidad de deshidratado fueron mayores debido a que aumentó la concentración del vapor de agua en la superficie del producto (Toğrul y Pehlivan, 2003) sin embargo a temperaturas altas se puede causar cierta contracción y deterioro del producto.

Los valores de difusividad efectiva en las hojas de *Stevia* aumentaron al incrementar la temperatura de deshidratado y fluctuaron en un rango de 84.67 E^{-10} a 4.78 E^{-08} m^2 s^{-1}. El factor de frecuencia y la energía de activación para la difusión de la humedad en las hojas de *Stevia* fueron de 8.38 E^{01} m^2 s^{-1} y 37.19 kJ mol^{-1} respectivamente. Al incrementar la temperatura y por tanto la velocidad de deshidratado, los valores de la energía de activación tienden a ser mayores.

La entropía disminuyó al incrementar la temperatura de deshidratado y fue negativa como la entalpía; esta última y la energía libre de Gibbs incrementaron su valor a mayores temperaturas.

Al estudiar la modelación matemática del deshidratado en hojas de *Stevia* se demostró la superioridad del modelo Midilli-Kucuk para describir la cinética de deshidratado del producto, con el cual se obtuvo la mejor bondad de ajuste de los datos para el rango de temperatura de estudio, mostrando un valor promedio de SSE = 0.0035, R^2 = 99.7 % y RMSE = 0.0224.

Para validar el modelo Midilli ajustado para el deshidratado en hojas de *Stevia* se graficó la razón de humedad experimental con respecto a la razón de humedad estimada. Con los valores de R^2 se confirmó la capacidad del modelo para describir el proceso bajo las condiciones de control establecidas.

Al validar el modelo Midilli y estudiar los efectos de la temperatura de deshidratado en sus constantes y coeficientes, los valores de la constante k fueron directamente proporcionales a la temperatura, es decir, a mayor temperatura se obtuvieron mayores valores de k. La correlación de k con la temperatura de deshidratado mostró un valor de R^2 = 94.96 %. Además, el coeficiente *a* presentó un valor promedio de 0.987; el coeficiente *n* mostró una leve dependencia con la temperatura con un valor de 1.1704 y el coeficiente *b* de -0.0155, no fue necesario que todos los parámetros mostraran una tendencia similar para cumplir con el ajuste del modelo.

4.5 Literatura citada

Akpinar, E. K. (2006). Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. Journal of Food Engineering, 77(4), 864–870.

Akpinar, E. K., Bicer, Y., & Yildiz, C. (2003). Thin layer drying of red pepper. Journal of Food Engineering, 59(1), 99–104.

Bal, L. M., Kar, A., Satya, S., & Naik, S. N. (2010). Drying kinetics and effective moisture diffusivity of bamboo shoot slices undergoing microwave drying. International Journal of Food Science and Technology, 45(11), 2321–2328.

Belghit, A., Kouhila, M., & Boutaleb, B. C. (2000). Experimental study of drying kinetics by forced convection of aromatic plants. Energy Conversion and Management, 41(12), 1303–1321.

C.P.S. (2006). Cooperativa de productores de Stevia. Retrieved February 9, 2016, from http://cooprodestevia.blogspot.mx/

Crank, J. (1957). The mathematics of diffusion. JSTOR.

De Oliveira, G. H. H., Corrêa, P. C., Araujo, E. F., Valente, D. S. M., & Botelho, F. M. (2010). Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet

corn cultivars (Zea mays L.). International Journal of Food Science & Technology, 45(3), 546–554.

Doymaz, I. (2006). Thin-layer drying behaviour of mint leaves. Journal of Food Engineering, 74(3), 370–375.

Doymaz, I. (2011). Drying of thyme (Thymus Vulgaris L.) and selection of a suitable thin-layer drying model. Journal of Food Processing and Preservation, 35(4), 458–465.

Doymaz, I., Tugrul, N., & Pala, M. (2006). Drying characteristics of dill and parsley leaves. Journal of Food Engineering, 77(3), 559–565.

Erenturk, S., Gulaboglu, M. S., & Gultekin, S. (2010). Experimental determination of effective moisture diffusivities of whole- and cut-rosehips in convective drying. Food and Bioproducts Processing, 88(2–3), 99–104.

Göğüş, F., & Maskan, M. (2006). Air drying characteristics of solid waste (pomace) of olive oil processing . Journal of Food Engineering, 72, 378–382.

I. A. (2013). México planea desplazar a China en producción de stevia. Retrieved September 6, 2016, from http://imagenagropecuaria.com/2013/mexico-planea-desplazar-a-china-en-produccion-de-stevia/

Iguaz, A., Martin, M. S., Mate, J., & Fernandez, T. (2003). Modelling effective moisture difusivity of rough rice (Lido cultivar) at low drying temperatures. Journal of Food.

Jideani, V. A., & Mpotokwana, S. M. (2009). Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. Journal of Food Engineering, 92(2), 182–188.

Jin Park, K., Vohnikova, Z., & Pedro Reis Brod, F. (2002). Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (Mentha crispa L.). Journal of Food Engineering, 51(3), 193–199.

Jino, P., & Assawarachan, R. (2015). Comparative study of color retention of dried

stivia leaves (Stevia Rebaudiana Bertoni) by single-stage drying and multi-stage drying. Journal of Food Science and Agricultural Technology (JFAT), 1(1), 83–88.

Kaciuba-Uscilko, H., & Ingram, D. L. (1977). The effect of propranolol on cold-induced thermogenesis in the newborn pig. Comparative Biochemistry and Physiology. C: Comparative Pharmacology, 56(1), 53–5.

Kadam, D. M., Goyal, R. K., Singh, K. K., & Gupta, M. K. (2011). Thin layer convective drying of mint leaves. Journal of Medicinal Plants Research, 5(2), 164–170.

Kaleemullah, S., & Kailappan, R. (2007). Monolayer moisture, free energy change and fractionation of bound water of red chillies. Journal of Stored Products Research, 43(2), 104–110.

Karathanos, V. T., & Belessiotis, V. G. (1999). Application of a Thin-Layer Equation to Drying Data of Fresh and Semi-dried Fruits. Journal of Agricultural Engineering Research, 74(4), 355–361.

Lee, C. N., Wong, K. L., Liu, J. C., Chen, Y. J., Cheng, J. T., & Chan, P. (2001). Inhibitory effect of stevioside on calcium influx to produce antihypertension. Planta Medica, 67(9), 796–799.

Lemus-Mondaca, R., Vega-Gálvez, A., Moraga, N. O., & Astudillo, S. (2015). Dehydration of S tevia rebaudiana Bertoni Leaves: Kinetics, Modeling and Energy Features. Journal of Food Processing and Preservation, 39(5), 508–520.

Maskan, A., Kaya, S., & Maskan, M. (2002). Hot air and sun drying of grape leather (pestil). Journal of Food Engineering, 54(1), 81–88.

Methakhup, S., Chiewchan, N., & Devahastin, S. (2005). Effects of drying methods and conditions on drying kinetics and quality of Indian gooseberry flake. LWT - Food Science and Technology, 38(6), 579–587.

Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A New Model for Single-Layer Drying. Drying Technology: An International Journal, 20(7), 1503–1513.

Motta Lima, O. C. (1999). Generalized drying curves in paper drying. Abstracts Proceedings and Presented at the II ENPROMER, Ago/set, Florianópolis, BR.

Özbek, B., & Dadali, G. (2007). Thin-layer drying characteristics and modelling of mint leaves undergoing microwave treatment. Journal of Food Engineering, 83(4), 541–549.

Panchariya, P. C., Popovic, D., & Sharma, A. L. (2002). Thin-layer modelling of black tea drying process. Journal of Food Engineering, 52(4), 349–357.

Periche, A., Castelló, M. L., Heredia, A., & Escriche, I. (2015). Influence of drying method on steviol glycosides and antioxidants in Stevia rebaudiana leaves. Food Chemistry, 172, 1–6.

Prabhanjan, D. G., Ramaswamy, H. S., & Raghavan, G. S. V. (1995). Microwave-assisted convective air drying of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, 25(2), 283–293.

Ramirez, G. (2011). Paquete Tecnológico Estevia (Stevia rebaudiana) Establecimiento y mantenimiento. Programa Estratégico Para El Desarrollo Rural Sutentable de La Región Sur - Sureste de México: Tropico Húmedo 2011, 0–15.

Ruiz Celma, A., Cuadros, F., & López-Rodríguez, F. (2009). Characterisation of industrial tomato by-products from infrared drying process. Food and Bioproducts Processing.

Saeed, I. E., Sopian, K., & Abidin, Z. Z. (2008). Drying characteristics of Roselle (1): Mathematical Modeling and Drying Experiments. Food Engineering, X(1), 1–25.

Sharma, G. P., Verma, R. C., & Pathare, P. B. (2005). Thin-layer infrared radiation drying of onion slices. Journal of Food Engineering, 67(3), 361–366.

Simal, S., Femenia, A., Garau, M. C., & Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. Journal of Food Engineering, 66(3), 323–328.

Togrul, I. T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. Journal of Food Engineering, 55(3), 209–216.

Toĝrul, I. T., & Pehlivan, D. (2004). Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. Journal of Food Engineering, 65(3), 413–425.

Toğrul, I. T., & Pehlivan, D. (2003). Modelling of drying kinetics of single apricot. Journal of Food Engineering, 58(1), 23–32.

Verma, L. R., Bucklin, R. A., Endan, J. B., & Wratten, F. T. (1985). Effects of drying air parameters on rice drying models. Transactions of the ASAE, 28(1), 296–301.

Wang, Z., Sun, J., Chen, F., Liao, X., & Hu, X. (2007). Mathematical modelling on thin layer microwave drying of apple pomace with and without hot air pre-drying. Journal of Food Engineering, 80(2), 536–544.

Yaldiz, O., Ertekin, C., & Uzun, H. I. (2001). Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. Energy, 26(5), 457–465.

5. CONCLUSIONES GENERALES

Se construyó un prototipo portátil para deshidratar productos agrícolas que atenderá pequeños y medianos ciclos de producción de granos, plantas medicinales, frutos y hortalizas, entre otros productos.

Las ventajas que presenta el deshidratador desarrollado son las siguientes:

- Incrementa el valor agregado de los productos y los ingresos del productor.
- La superficie de deshidratado al interior del prototipo se reduce por poseer un módulo de bandejas distribuidas por niveles.
- La duración del proceso es menor ya que el deshidratador se puede utilizar por la noche o en condiciones de nubosidad o precipitación, ya que su funcionamiento es independiente de las condiciones climáticas.
- La construcción e instalación del prototipo es práctica, además su tecnología es replicable, en caso de emprender un proyecto a nivel semi-industrial.

También se mencionan las desventajas del prototipo, las cuales son:

- El precio del prototipo puede ser inaccesible para pequeños productores
- El volumen a deshidratar se reduce con productos de menor densidad como flores, hojas o hierbas. Por lo que se requiere de un mayor equipo para procesar mayores cantidades de materia prima.

En los deshidratadores híbridos encontrados en la revisión de literatura, Cuadro 3.1, los experimentos para procesar diferentes productos se efectuaron en un rango de 40 a 75 °C, donde la temperatura promedio fue de 54.23 °C. Además, los mecanismos de calefacción instalados consumen en promedio 3.25 kW de potencia para operar en el rango anterior de temperatura, a diferencia del prototipo construido que consume 1.5 kW y trabaja entre 40 y 65°C. Otro dato hallado en los equipos anteriores fue que el volumen promedio de la cámara de deshidratado fue de 0.55 m^3, valor similar en comparación con el volumen de este equipo que tiene 0.54 m^3.

Con la información anterior se puede confirmar la factibilidad de implementar un sistema de deshidratado similar al reportado en el presente trabajo, debido a que el consumo energético fue menor 50 % respecto al valor reportado en la literatura para condiciones similares de temperatura y dimensiones equivalentes en la cámara de deshidratado.

Con la modelación matemática es posible estimar la duración del proceso en el dispositivo, de acuerdo al producto a procesar (fruto, grano, entre otros) y a la razón de humedad a extraer (10 ± 2 %).

Con esta información es posible implementar el modelo cuándo exista escasa información del deshidratado del producto, para establecer las condiciones de control de temperatura y duración del proceso respecto a los valores de la razón de humedad, que permitan mejorar la calidad y valor agregado del producto.

Este trabajo de investigación podría mejorar con un análisis de dinámica de fluidos computacional para representar la interacción del proceso en la cámara de deshidratado de acuerdo a las variables climáticas de temperatura, radiación y humedad, así como para simular el efecto térmico en el producto a deshidratar.