



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS
DE HIDALGO**



FACULTAD DE QUÍMICO FARMACOBIOLOGÍA

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE MAESTRIA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
AREA TEMÁTICA EN BIOTECNOLOGÍA ALIMENTARIA**

**OPTIMIZACIÓN DE UN DESHIDRATADOR SOLAR COMO TECNOLOGIA
PARA LA DESHIDRATACIÓN DE FRUTAS Y HORTALIZAS**

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
PRESENTA:**

I.B.Q. ELIZABETH SÁMANO DELGADO

DIRECTOR DE TESIS:

D.C. HÉCTOR EDUARDO MARTÍNEZ FLORES

Morelia, Mich., Abril de 2011

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a Dios por que en estos dos años pude comprobar que nunca me deja sola!

A mi mamá, porque cada día aprecio más la magnitud de sus sacrificios, por todo su apoyo incondicional, su amor y por siempre creer en mí y por ser un gran ejemplo en mi vida, te amo!

A Adonai, a quien debo un agradecimiento muy especial, por todo el apoyo invaluable que me brindó en esta etapa, definitivamente esto es posible en gran medida gracias a ti y sé que compartes la felicidad y el orgullo que ahora siento, te amo!

A mi hermano y a toda mi familia, por su apoyo, sus ánimos y porque siempre han creído en mí.

A mi asesor, el Dr. Héctor E. Martínez Flores, por todo su apoyo, por todo lo que me enseñó y por hacer mi estancia tan amena.

A mis sinodales, la Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, el Dr. Carlos Rubén Sosa Aguirre, el Dr. Jorge Isidro Aranda Sánchez y la Dra. Consuelo de Jesús Cortés Penagos por todas las observaciones realizadas que fueron fundamentales para desarrollar el proyecto adecuadamente, gracias!

A todos mis amigos que son parte tan importante en mi vida, especialmente a Alia Yhamel y Marisol Domínguez, muchísimas gracias amigas por todo el apoyo y los ánimos brindados durante esta etapa, las quiero!!

Finalmente, quiero agradecer a CONACYT, por el apoyo económico brindado que fue fundamental para lograr desarrollar el presente trabajo.

INDICE GENERAL

	ABSTRACT	1
1	INTRODUCCIÓN	3
2	ANTECEDENTES	5
2.1	Michoacán: Productor de Frutas y Hortalizas.....	5
2.1.1	El Plátano.....	5
2.1.2	La Guayaba.....	8
2.2	Cambios ocurridos en frutos durante la maduración.....	10
2.3	El Secado.....	11
2.4	Cinética del Secado.....	13
2.5	Secado Solar.....	14
2.5.1	Diseño de Deshidratadores Solares.....	16
2.5.2	Herramientas del Diseño.....	17
2.6	Error Sistemático.....	18
2.7	Contaminación microbiológica de frutas y hortalizas.....	19
2.7.1	Control sanitario durante la deshidratación.....	19
2.8	Trabajos Previos.....	20
3	JUSTIFICACIÓN	22
4	HIPÓTESIS	24
5	OBJETIVOS	24
5.1	General.....	24
5.2	Específicos.....	24
6	MATERIALES Y MÉTODOS	25
6.1	Materiales.....	25
6.2	Métodos.....	29
6.2.1	Estandarización de grado de madurez de plátano y guayaba... ..	29
6.2.2	Perfil de temperatura experimental del deshidratador de referencia.....	30
6.2.3	Cinéticas de secado realizadas en el modelo previo.....	31
6.2.4	Determinación de la eficiencia del secado.....	32

6.2.5	Cálculos termodinámicos para dimensionar el deshidratador solar.....	32
6.2.6	Evaluación de la pérdida de calor a través de las paredes del deshidratador con diferentes modelos.....	33
6.2.7	Diseño del deshidratador solar.....	34
6.2.8	Perfil de temperatura analítico del deshidratador solar.....	34
6.2.9	Construcción del deshidratador solar.....	35
6.2.10	Cinéticas de secado realizadas en el nuevo modelo.....	35
6.2.11	Pruebas de secado para evaluar el nuevo modelo.....	36
6.2.12	Evaluación microbiológica y textural de producto deshidratado.....	36
6.2.13	Error sistemático del equipo.....	37
7	RESULTADOS	38
8	DISCUSIÓN	75
9	REFERENCIAS	76
10	GLOSARIO	80
11	ANEXOS	82
11.1	Anexo 1. Cálculos.....	82
11.2	Anexo 2.....	96
11.3	Anexo 3. Diseño del deshidratador solar en AUTOCAD.....	101

INDICE DE TABLAS

1	Valor nutrimental del plátano.....	7
2	Valor nutrimental de la guayaba.....	10
3	Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de deshidratadores solares.....	16
4	Deshidrataciones previas de plátano en diferentes deshidratadores solares.....	21
5	Grados de madurez de plátano Tabasco.....	38
6	Grados de madurez de guayaba blanca.....	39
7	Análisis estadístico de estados de madurez en plátano.....	40
8	Análisis estadístico de estados de madurez en guayaba.....	40
9	Monitoreo del incremento de la temperatura del aire al interior del colector solar.....	42
10	Monitoreo de temperatura del aire en primera y última charola de la cabina de secado.....	43
11	Monitoreo de temperatura interior y exterior de las paredes de la cabina de secado.....	45
12	Tiempo de secado de plátano a diferentes espesores de rebanada.....	46
13	Tiempo de secado de guayaba a diferentes espesores de rebanada.....	46
14	Pérdida de calor por convección para plátano y guayaba.....	50
15	Pérdida de calor por conducción para plátano y guayaba.....	51
16	Cálculo del área de las charolas.....	52
17	Cálculo de la separación entre las charolas.....	54
18	Aumento del número de charolas con el aumento de la temperatura del aire.....	55
19	Evaluación de pérdida de calor en las paredes del deshidratador a través de distintos modelos.....	56
20	Evaluación de efecto aislante del aire a espesores de capa distintos.....	56
21	Cálculo del volumen húmedo del aire al fluir sobre cada charola en la cabina de secado.....	57
22	Monitoreo de la temperatura interna de la cámara en ambos modelos.....	61

23	Monitoreo de la temperatura de colector solar en nuevo modelo.....	64
24	Monitoreo de la temperatura interna de la cámara en nuevo modelo.....	64
25	Monitoreo de gradiente de temperatura y humedad dentro de la cabina de secado a capacidad máxima.....	67
26	Tiempos y eficiencias de secado de nopal y mango.....	69
27	Deshidratadores solares de mango.....	70
28	Análisis microbiológico de plátano deshidratado.....	71
29	Comparación en el color del producto fresco y deshidratado.....	72
30	Comparación en la textura del producto fresco y deshidratado..	72
31	Evaluación del cambio en la transferencia de calor con respecto a la disminución de temperatura del aire.....	85
32	Cálculo del gradiente de temperatura máximo posible en la cabina de secado con el área nueva de las charolas.....	86
33	Pérdida de calor por convección a diferentes temperaturas del aire.....	88
34	Valor nutrimental del mango Haden.....	95
35	Valor nutrimental del nopal Opuntia.....	95
36	Evaluación de color, textura y °Bx para caracterizar estados de madurez en plátano Tabasco y guayaba blanca.....	96
37	Temperatura asociada a cada nodo en el perfil de temperatura.	97
38	Determinación de textura en guayaba y plátano deshidratados.	98
39	Determinación de color en guayaba y plátano deshidratados....	98
40	Monitoreo de tiempos de secado por rebanada.....	99

INDICE DE FIGURAS

1	Deshidratador solar Modelo BRET-DSH-250.....	4
2	Deshidratador solar de nopal.....	4
3	Gráfica de datos de humedad libre en función del tiempo.....	13
4	Mango Haden.....	25
5	<i>Opuntia tomentosa</i>	25
6	Deshidratador solar donde se llevaron a cabo las pruebas de deshidratación y perfiles de temperatura.....	26
7	Colorímetro Color Flex Hunter Lab.....	26
8	Texturómetro Texture Analyser TA-XT2.....	26
9	Refractómetro ATAGO N-50E.....	27
10	Wireless Thermometer modelo 63-1088.....	27
11	Wired Thermometer/Hygrometer modelo 63-1032.....	27
12	Rebanadora Meat Slicer Lot. No. 2312.....	28
13	Balanza analítica Sartorius modelo 63-1032.....	28
14	Aguja P2N.....	30
15	Esquema de monitoreo de temperaturas en cabina de secado.	31
16	Modelado de la cabina de secado en ANSYS.....	34
17	Gradientes de temperatura en colector y cabina.....	44
18	Cinéticas de Secado de plátano y guayaba a espesor de rebanada de 5 mm.....	47
19	Cinética de Secado de plátano a espesor de rebanada de 2 mm.....	48
20	Cinética de Secado de guayaba a espesor de rebanada de 3 mm.....	48
21	Distribución de temperaturas de la cabina de secado del nuevo modelo.....	58
22	Diseño del deshidratador solar en 3D.....	59
23	Vista frontal de nuevo modelo del deshidratador solar.....	60
24	Deshidratador solar, nuevo modelo.....	60
25	Prueba comparativa de deshidratación de plátano utilizando ambos modelos.....	61
26	Plátano deshidratado en nuevo modelo.....	62

27	Plátano deshidratado en modelo previo.....	63
28	Monitoreo del gradiente de temperatura entre la primera y la última charola en la cabina de secado del nuevo modelo.....	65
29	Cinéticas de plátano en ambos modelos.....	66
30	Cinéticas de guayaba en ambos modelos.....	66
31	Monitoreo del gradiente de temperatura en la cabina de secado del nuevo modelo cuando tiene capacidad máxima de producto.....	68
32	Cinética de secado de mango.....	70
33	Análisis microbiológico de plátano deshidratado en el nuevo modelo.....	71
34	Modelo 1 de paredes de cámara de secado del deshidratador..	90
35	Colector solar: vista superior.....	100
36	Colector solar: vista lateral.....	101
37	Cabina de secado: vista frontal.....	101
38	Cabina de secado: vista lateral.....	102
39	Tapa: vista lateral.....	103
40	Tapa: vista superior.....	103

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF A SOLAR DRIER AS TECHNOLOGY FOR THE DEHYDRATION OF FRUITS AND VEGETABLES.

Mexico is a major producer of fruit and vegetables in the world because of the variety, quality, health, services and prices of their crops. However, it is estimated that about 40% of vegetable production in Mexico is lost due to weather factors, poor postharvest practices and most are highly perishable products. Preservation of foods is necessary to avoid the action of microorganisms or enzymes that can alter the original characteristics of fruits such as appearance, smell and taste. Solar drying consists in to remove most of the moisture contained in a product and as a method of food preservation has great advantages such as: dehydrated products do not lose their nutritional and sensory properties, energy saving, lower cost of process, products can be marketed at higher prices and the process is simple, safe and efficient.

Currently, several solar dehydrator designs exists on the market, some of which use expensive materials for its construction, making the prototype of a very high price and difficult to obtain for small producers. The aim of this study was to build and characterize a low-cost solar dryer and high energy efficiency which allows preserving the nutritional and organoleptic properties of products, making easy the prototype access to fruit and vegetable producers in Michoacán. The dryer was evaluated by testing using guava and bananas, because Michoacán is a major producer of both fruits.

The design of the dryer machine was realized starting from the optimization of a previous model, a solar dehydrator property of the Faculty of Chemical Pharmacobiology of the U.M.S.N.H., which was characterized through temperature profiles and drying kinetics to identify gaps and then through the theoretical and numerical modeling correct it to finally build the new prototype. Among the tests performed are: the number of trays of the dryer, its area, the separation between each of them and the best materials to build the dehydrator. The kinetics were made using guava and banana and the design was developed using the drawing software

AUTOCAD. Considering the results of all tests, it was found that a design using double polycarbonate layer separated by air is the best alternative to achieve an adiabatic process. This is important because it allows batches of product to be dehydrated at a uniform speed. It was also made a microbiological evaluation of dehydrated products, to verify that they are innocuous and that the model does not promote bacterial contamination.

The use of solar driers is one of the best alternatives to small and medium producers of fruits and vegetables to provide postharvest treatment because it is an economic process, does not pollute and helps to prevent economic losses so its use should have widely promotion.

1 INTRODUCCIÓN

México es uno de los principales productores de frutas y legumbres en el mundo, debido a la variedad, calidad, sanidad, inocuidad, servicios y precios de sus cosechas. La producción hortofrutícola en México se mantiene como una industria competitiva a nivel mundial, por la amplia diversidad de climas, las tecnologías empleadas y la mentalidad empresarial de nuestros productores (Ramírez et al., 2007). Michoacán es uno de los principales productores a nivel nacional y mundial de aguacate, fresa, plátano, durazno, guayaba, limón, papaya, melón, mango, lenteja y pepino. No obstante, se estima que cerca del 40% de la producción hortofrutícola en México se pierde por varias causas asociadas a factores climatológicos, malas prácticas post-cosecha tanto sanitarias, como de almacén y transporte; y debido a que la mayoría de los productos son altamente perecederos. Por otro lado, la mayoría de estos productos son susceptibles de obtener un alto valor agregado si son sometidos a procesos adecuados de conservación (Ramírez et al., 2007).

Conservar un alimento consiste en bloquear la acción de los agentes (microorganismos o enzimas) que pueden alterar sus características originales como aspecto, olor y sabor. Existen diferentes métodos de conservación de alimentos como son: el envasado al vacío, congelación, deshidratación, liofilización, acidificación y enlatado, principalmente (Geankoplis, 2006). De los métodos mencionados, la deshidratación presenta grandes ventajas, entre las que destacan: los productos deshidratados no pierden sus propiedades nutritivas y sensoriales, ahorro de energía y por lo tanto menor costo del proceso; los productos deshidratados se pueden comercializar a precios mayores y el proceso es sencillo, seguro y eficiente (Macazaga, 2008).

Actualmente existen ya en el mercado varios diseños de deshidratadores solares, sin embargo, en general presentan dos grandes desventajas; por un lado existen algunos modelos que emplean materiales muy costosos para su construcción, que hacen al prototipo de muy elevado precio y difícil de adquirir para pequeños productores (Fig.1), por otro lado existen otros modelos que son aún muy rústicos y con eficiencias de secado muy bajas, lo cual favorece la contaminación microbiológica de

los productos (Fig.2). En el presente trabajo, se construirá un deshidratador solar que sea de baja costo y alta eficiencia (en términos de tiempos de secado), de modo que permita conservar las propiedades nutrimentales y sensoriales de los productos, haciendo así al prototipo de fácil acceso para la mayoría de los productores hortofrutícolas en Michoacán. El deshidratador será evaluado mediante pruebas utilizando guayaba y plátano, debido a que Michoacán es uno de los principales productores nacionales y mundiales de ambos frutos.



\$105,950.00

**Más gastos de envío
Venta a partir de 5 equipos**

**Fig. 1. Deshidratador solar Modelo BRET-DSH-250.
Fuente: www.bretconenergiasolar.com**



**Fig. 2. Deshidratador solar de nopal.
Fuente: www.lillywolfensberger.com**

2 ANTECEDENTES

2.1 Michoacán: Productor de frutas y hortalizas

Michoacán es considerado uno de los estados de mayor producción de frutas y hortalizas en México, destacado por su producción de plátano y guayaba. Los principales productores de plátano son: Chiapas, Tabasco, Veracruz, conociéndose como productores secundarios a los estados de Colima y Michoacán, principalmente (<http://www.cedagro.col.gob.mx/platano2>). El volumen de producción que se obtiene en estos estados representa en promedio el 85.7% del volumen total nacional. Para la guayaba, por su parte, destacan los estados de Zacatecas, Aguascalientes y Michoacán que en conjunto abarcan el 91.3% de la superficie destinada a este cultivo. En el año 2007 Michoacán registró una producción de plátano de 108,239.60 toneladas (principalmente en los municipios de Apatzingán, Coahuayana, Parácuaro y Lázaro Cárdenas) y 71,100 toneladas de Guayaba (principalmente en los municipios de Pátzcuaro, Apatzingán, Uruapan y Zitácuaro) (<http://www.limonmexicano.gob.mx>).

2.1.1 El Plátano

El plátano ocupa el primer lugar en producción mundial de frutas tropicales y es una fruta básica en la alimentación mexicana, por su sabor, disponibilidad en todo el año y por su bajo precio (<http://www.cedagro.col.gob.mx/platano2>). No obstante, el plátano tiene un tiempo de vida limitado. Es generalmente alto en azúcar y muy susceptible a deterioros fisicoquímicos, por lo cual se descompone con facilidad acortando su vida de anaquel (Thipayarat, 2007). Aunada a ello existe una gran pérdida poscosecha del producto principalmente por malas prácticas sanitarias, de transporte y de almacenamiento, por lo que es necesario plantear nuevas alternativas para la conservación del fruto. El plátano es cultivado extensamente en regiones tropicales y subtropicales. Es el cuarto cultivo más importante del mundo, después del arroz, el trigo y el maíz (Thipayarat, 2007).

La morfología y taxonomía del fruto y la planta de plátano se muestran a continuación (www.infoagro.com):

Nombre científico: *Musa cavendishii*.

Nombre común: Plátano ó Banano.

Familia: *Musaceae*.

Origen: Asia Meridional.

Planta: Herbácea perenne gigante, con rizoma corto y tallo aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares, cónico y de 3.5 a 7.5 m de altura, terminado en una corona de hojas.

Sistema radicular: Raíz superficial, menos ramificada que en peral.

Hojas: Muy grandes y dispuestas en forma de espiral, de 2 a 4 m de largo y hasta de 0.5m de ancho, con un peciolo de 1m o más de longitud y limbo elíptico alargado, ligeramente decurrente hacia el peciolo, un poco ondulado y glabro. De la corona de hojas sale, durante la floración, un escapo pubescente de 5 a 6 cm de diámetro, terminado por un racimo colgante de 1 a 2 m de largo. Éste lleva una veintena de brácteas ovales alargadas, agudas, de color rojo púrpura, cubiertas de un polvillo blanco harinoso; de las axilas de estas brácteas nacen a su vez las flores.

Flores: Flores amarillentas, irregulares y con seis estambres, de los cuales uno es estéril, reducido a estaminodio petaloideo. El gineceo tiene tres pistilos, con ovario ínfero. El conjunto de la inflorescencia constituye el “régimen” de la platanera. Cada 5 grupos de flores reunidas en cada bráctea forma una reunión de frutos llamada “mano”, que contiene de 3 a 20 frutos. Un régimen no puede llevar más de 4 manos, excepto en las variedades muy fructíferas, que pueden contar con 12 a 14.

Fruto: Oblongo, durante el desarrollo del fruto éstos se doblan geotrópicamente, según el peso de éste, hace que el pedúnculo se doble. Esta reacción determina la forma del racimo. Los plátanos son polimórficos, pudiendo contener de 5 a 20 manos, cada una con 2 a 20 frutos; siendo de color amarillo verdoso, amarillo, amarillo-rojizo o rojo. Los plátanos comestibles son de partenocarpia vegetativa, es decir, que desarrollan una masa de pulpa comestible sin la polinización. Los óvulos se atrofian pronto, pero pueden reconocerse en la pulpa comestible.

Variedades: Las variedades o tipos de plátano que se producen en México son: Enano Gigante, Macho, Tabasco Dominicano, Valery, Criollo, Sin Clasificar, Pera, Manzano y Morado, siendo el Tabasco dominico y macho los que satisfacen el mercado externo y las variedades restantes cubren exclusivamente el consumo interno. La variedad enano gigante es la que predomina en producción en México, seguida del plátano macho (www.limonmexicano.gob.mx). El género *Musa* está formado por cuatro secciones: Australimusa, Callimusa, Rhodochlamys y Eumusa. La sección Eumusa es la de mayor importancia económica y difusión geográfica, ya que en ella se incluyen los bananos y plátanos comestibles. En esta sección, las especies silvestres *Musa acuminata* y *Musa balbisiana* son las más importantes porque por hibridación dieron origen a los plátanos y bananos cultivados.

En la Tabla 1 se muestra el valor nutricional del plátano de acuerdo a lo recopilado por Marín (2008).

Tabla1. Valor nutrimental del plátano (g/100g).

Agua (g)	75.7	Acido cítrico (mg)	150
Proteína (g)	1.1	Acido oxálico (mg)	6.4
Lípidos (g)	0.2	Sales minerales	
Carbohidratos (g)	22.2	Sodio (mg)	1
Fibra (g)	0.6	Potasio (mg)	420
Vitaminas		Calcio (mg)	8
A (UI)	190	Magnesio (mg)	31
B ₁ (mg)	0.05	Manganeso (mg)	0.64
B ₂ (mg)	0.06	Hierro (mg)	0.7
B ₆ (mg)	0.32	Fósforo (mg)	28
Acido nicotínico (mg)	0.6	Cobre (mg)	0.2
Acido pantoténico (mg)	0.2	Azufre (mg)	12
C (mg)	10	Cloro (mg)	125
Otros componentes		Calorías (Kcal)	85
Acido málico (mg)	500		

Fuente: <http://portal.veracruz.gob.mx>

2.1. 2 La Guayaba

La guayaba es un cultivo originario de América Tropical y actualmente se encuentra muy difundido en prácticamente todas las áreas tropicales y subtropicales del mundo (López y Mercado, 2007). Es una fruta muy apreciada comercialmente ya que puede ser utilizada en multitud de preparaciones, como jugos, dulces y néctares siendo parte importante de la cultura gastronómica de numerosos países. Sin embargo, debido a que el fruto de la guayaba es altamente perecedero, su comercialización como fruta fresca presenta cierta dificultad en cuanto a su manejo ya que la guayaba madura es muy frágil y se deteriora fácilmente por daños mecánicos y por su sobre maduración, siendo la alternativa más viable su industrialización posterior al tratamiento por alguna de las diferentes técnicas de conservación para elevar así su período de vida útil (López y Mercado, 2007).

Algunas generalidades sobre la morfología y la taxonomía de la planta se presentan a continuación (www.limonmexicano.gob.mx):

Nombre científico: *Psidium guajava* L.

Nombre común: Guayaba.

Familia: *Myrtaceae*.

Origen: América Tropical.

Planta: La guayaba es un árbol pequeño que alcanza 6 m de altura y posee una copa amplia y extendida que se ramifica cerca del suelo. El tronco es corto, de color verdoso-café a café claro y está cubierto de una cáscara escamosa.

Hojas: Las hojas son opuestas y de forma alargada. Tienen de 7 a 18 cm de longitud y poseen venas prominentes en el envés. El envés posee también pequeños pelitos, especialmente cuando son jóvenes.

Flores: Son blancas, de aproximadamente 2.5 cm de diámetro y se disponen en pequeños grupos o individualmente en las axilas de hojas recién formadas. La autopolinización es posible pero la polinización por insectos produce mayores rendimientos.

Frutos: La forma de los frutos puede ser redonda, ovoide o piriforme. El peso varía entre 28 gr y 453 gr. El color de la cáscara usualmente es amarillo, mientras que la pulpa puede ser blanca, amarilla, rosada o roja. Los frutos pueden variar desde poseer una cáscara delgada que rodea una pulpa firme con numerosas semillas hasta poseer una cáscara gruesa y una pulpa blanda con pocas semillas. El sabor varía de dulce hasta altamente ácido. Poseen un aroma característico que va desde ser fuerte y penetrante hasta suave y agradable. Los frutos se producen y maduran prácticamente durante todo el año, pero la mayor parte de la producción ocurre durante los meses del verano.

Varietades: Las variedades más conocidas en función del país de origen son: guayabas de pulpa blanca, Puerto Rico, Rojo Africano, Extranjero, Trujillo, Roja, Polonuevo, Guayabita de Sadoná (Nariño), Rosada, Blanca Común de Antioquia y guayaba Agria. Comercialmente se agrupan en blancas y rojas, según la coloración que presenta la pulpa. En México se consume principalmente la guayaba roja conocida también como guayaba colorada, perolera, pichi, enandi ó xalxocotl.

Propiedades nutritivas: Su componente mayoritario es el agua. Es de bajo valor calórico, por su escaso aporte de hidratos de carbono y menor aún de proteínas y grasas. Destaca su contenido en vitamina C; concentra unas siete veces más que la naranja. Aporta en menor medida otras vitaminas del grupo B (sobre todo niacina o B3). Si la pulpa es anaranjada, es más rica en provitamina A (carotenos). Respecto a los minerales, destaca su aporte de potasio.

La Tabla 2 presenta los principales componentes nutrimentales de la guayaba (<http://www.grupopm.com/downloads/trade/michparte4.pdf>):

Tabla 2. Valor nutrimental de la guayaba.

Nutrimento	Unidad	Valor por 100g de porción comestible
Agua	g	80.66
Energía	Kcal	69
Proteínas	g	0.58
Grasa total	g	0.6
Carbohidratos totales	g	17.36
Fibra dietética	g	5.4
Calcio	mg	21
Hierro	mg	0.22
Magnesio	mg	17
Fósforo	mg	27
Potasio	mg	292
Sodio	mg	37
Vitamina C	mg	300
Vitamina A	UI	90

2.2 Cambios ocurridos en frutos durante la maduración

El etileno (C_2H_4) es una fitohormona que juega un papel crítico en el desarrollo y maduración de muchos frutos y vegetales ya que estimula la iniciación y progresión de los cambios ocurridos durante la maduración.

Entre los cambios que tienen lugar durante el proceso de maduración se encuentran: disminución de la firmeza de la mayoría de los frutos y vegetales por acción enzimática ya que éstas incrementan su actividad durante la maduración lo cual promueve el ablandamiento extensivo del fruto mediante la degradación progresiva de los polisacáridos de la pared celular, los cuales son solubilizados y despolimerizados. (Sañudo et. al., 2008).

El etileno, también acelera la degradación de clorofila y la aparición de los pigmentos coloreados, mejora el sabor y el olor de los frutos y vegetales, ya que incrementa la producción de compuestos volátiles, disminuye la astringencia y aumenta la concentración total de sólidos solubles (Saltveit, 1999).

De acuerdo a lo anterior, existe una relación directa entre el estado de madurez y las características físicas de frutos y vegetales, factor que debe ser tomado en cuenta para elegir adecuadamente el grado de madurez de cada producto en base al tipo de procesamiento que se le dará, pues de acuerdo a éste se asociarán determinadas propiedades reológicas al fruto o vegetal que pueden favorecer o entorpecer el proceso.

2.3 **El Secado**

La deshidratación o secado de frutas y hortalizas, consiste en eliminar la mayor parte del agua contenida en ellas (Juárez H. E., 2006). El secado es un proceso en el que se intercambian calor y masa. Implica la transferencia de un líquido procedente de un sólido húmedo a una fase gaseosa no saturada. Incluye una operación energética elemental y representa una de las acciones térmicas básicas en la industria de procesos y agro-alimentaria. Diversos productos agrícolas requieren un secado post-cosecha para su adecuada conservación hasta su llegada a los centros de consumo. El secado o deshidratación de alimentos se usa como técnica de preservación pues los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y desarrollarse en ausencia de agua, además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en los alimentos no pueden funcionar sin agua (Geankoplis, 2006).

Aún en el caso de los productos que se comercializan en forma fresca, el secado ofrece una alternativa al agricultor cuando existen problemas de transporte o se producen bajas de precio por sobreproducción (Meza, 2009). El contenido de humedad del producto seco final varía ya que depende del producto pero generalmente es entre el 5 y 10%. El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque.

Entre las principales ventajas que ofrecen los alimentos deshidratados se encuentran (Juárez H.E., 2006):

- Constituyen alimentos que conservan su valor nutricional.
- Preservan sus características organolépticas (sabor, aroma, color) originales.
- Pueden ser consumidas en cualquier época del año, dado su facilidad de almacenamiento y conservación a temperatura ambiente.
- Presentan un período de conservación elevado.
- Permite comercializar los alimentos a precios mayores en los mercados locales y globales.

Existen diferentes métodos y procesos de secado, los cuales se clasifican de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua, en (Geankoplis, 2006):

- El calor en el material se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.
- Secado al vacío, donde la evaporación del agua se verifica con mayor rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación.
- Liofilización, donde el agua se sublima directamente del material congelado.

Entre los diferentes equipos de secado existentes se encuentran principalmente: los de bandejas, los indirectos al vacío con anaqueles, los continuos de túnel, los rotatorios, los de tambor simple y doble, los de aspersion y los solares (Geankoplis, 2006).

2.4 Cinética del Secado

La cinética de secado de un material es la dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo o variables relacionadas (Geankoplis, 2006). La intensidad de evaporación se determina a través de la velocidad de secado, que es el cambio de humedad (base seca) en el tiempo. La migración de agua desde el alimento al medio (exterior) va a depender del contenido de agua y de la composición del alimento, de la temperatura y humedad relativa ambiental. Durante el proceso de secado podemos construir una gráfica que relacione la cantidad de agua con respecto del tiempo, se construye registrando la pérdida de peso en intervalos iguales de tiempo hasta que se logra eliminar la mayor parte de agua posible (Geankoplis, 2006).

Una curva de secado típica se muestra en la Figura 3.

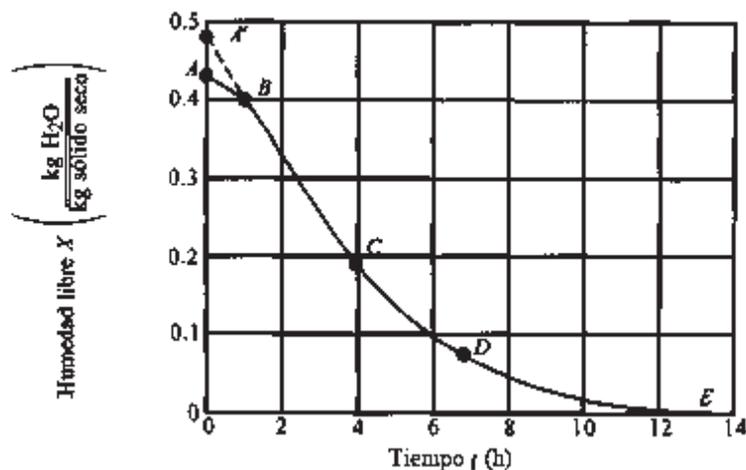


Fig. 3. Gráfica de datos de humedad libre en función del tiempo.
Fuente: Geankoplis, 2006.

En la gráfica de contenido de humedad respecto al tiempo se pueden distinguir varias fases importantes que caracterizan el proceso de secado (Geankoplis, 2006):

1. Estabilización. Del punto A al punto B las condiciones del aire se equilibran con la superficie del alimento. El sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final. Si el sólido está bastante caliente al principiar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Este período inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto.

2. Fase de velocidad constante. Compreendida entre el punto B y C, el agua migra a la misma velocidad que se produce la evaporación. La pendiente y la velocidad son constantes durante este período. El alimento permanece húmedo. En el punto C se presenta la humedad crítica, que depende de la temperatura y velocidad de aire. Para que se realice de forma adecuada el aire debe tener una temperatura moderadamente elevada, baja humedad relativa y una velocidad elevada. Durante éste periodo se elimina la humedad no ligada.

3. Primera fase de velocidad decreciente. Del punto C al D las áreas húmedas de la superficie se vuelven completamente secas. La velocidad de secado comienza a disminuir hasta llegar al punto D.

4. Segunda fase de velocidad decreciente. La velocidad de pérdida de humedad disminuye con mayor rapidez aún, alargándose el tiempo de remoción de agua, en este periodo influye la temperatura del aire, el grosor del alimento y la humedad relativa, al final del proceso de secado, el alimento llega a alcanzar la temperatura de bulbo seco. En el secado de algunos materiales, esta región no existe, o bien, constituye la totalidad del período de velocidad decreciente.

2.5 Secado Solar

El secado solar, donde los productos se exponen directamente al sol, es uno de los usos más antiguos de la energía solar y es aún uno de los procesos agrícolas más utilizados en nuestro país y en el mundo (Meza et al., 2009). Conforme los científicos fueron investigando las propiedades solares se percataron de que el sol podía utilizarse como una fuente de energía alternativa, en especial cuando se predecía lo que hoy es una realidad: las fuentes no renovables se acaban y se necesita un urgente reemplazo. De esta forma, se concluye que, entre las energías renovables, la que se presenta como más confiable y con mayores posibilidades de aprovechamiento es la energía solar. Una de las principales aplicaciones de la energía solar es a través de los deshidratadores solares (Juárez H. E., 2006). Aunado a lo anterior, particularmente en México, el empleo de deshidratadores presenta grandes ventajas (Fito, 2001):

1. Es un país con disponibilidad de energía solar.
2. En general, el campo agrícola no tiene accesibilidad a nuevas y mejores tecnologías, por los costos elevados que estas tienen.
3. El uso del equipo es muy sencillo y no requiere asesoría técnica.
4. El tiempo del secado no repercute en los costos del proceso.

Los dos elementos básicos de un secador solar son: el colector, donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado, donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse de diferentes formas para integrarse a diversos equipos de secado solar (Vlachos N.A., et al., 2002):

1) **Secador solar indirecto:** Los dos elementos están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incide sobre el producto colocado en la cámara de secado.

2) **Secador solar directo:** Los dos elementos pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar.

3) **Secador solar mixto:** Finalmente, puede darse el caso en que la colección de radiación se realice tanto en un colector solar previo a la cámara como en la misma cámara.

Cada uno de los diferentes tipos de deshidratadores solares presenta ventajas y desventajas (Tabla 3) que deben ser consideradas antes de adquirir un equipo, así como tomar en cuenta el tipo de producto que se desee deshidratar.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de deshidratadores solares.

Deshidratador solar	Ventajas	Desventajas
Directo	<ul style="list-style-type: none"> • Es el más económico. • Modelos muy sencillos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede ocasionar daños al producto por radiación UV.
Indirecto	<ul style="list-style-type: none"> • Protección de productos a radiación UV. • Menor riesgo de daño al producto por temperaturas extremas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Más complejos. • Precios más elevados.
Mixto	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempos de deshidratación menores. • Menor riesgo de daño al producto por temperaturas extremas. • Eficiencia térmica elevada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede llegar a ocasionar daños al producto por radiación UV. • Más complejos. • Precios más elevados.

* Fuente: Juárez, 2006

2.5.1 Diseño de Deshidratadores Solares

El diseño, como tema, ha desempeñado un papel determinante en la ciencia y la técnica. La reducción de los recursos energéticos en los últimos 20 años y el incremento de la contaminación ambiental han incentivado la creación de diseños más eficientes en el campo de las energías renovables.

Aunque la práctica del secado con energía solar es muy antigua, los primeros trabajos, fundamentalmente de carácter práctico, se reportan desde 1940. El desarrollo teórico y experimental del tema se observa a partir de 1960, donde, además, se aprecia el avance en el diseño de los secadores solares (Lugones y Linares, 1998).

A pesar de que se han desarrollado cierta variedad de secadores solares, desde el punto de vista constructivo estos equipos tienen similitud, ya que todos cuentan con una cámara de secado con un adecuado aislamiento y una superficie captadora de la energía de la radiación solar. El diseño de estos equipos se ha encaminado a dar soluciones geométricas del colector que incrementen el rendimiento de la captación solar, conjuntamente con el empleo de materiales de mejores propiedades ópticas.

Esto ha conllevado a que las diferencias de estos equipos se encuentran fundamentalmente en la configuración del colector y de la cabina de secado (Lugones y Linares, 1998).

Para diseñar secadores solares se usan métodos que se soportan fundamentalmente en dos elementos, que son los balances de energía y el uso de modelos del comportamiento térmico del sistema. En dependencia del diseño, del tipo y composición del material de la cubierta, será la temperatura de la misma y, en consecuencia, la transferencia de calor por radiación determinará el valor de las pérdidas energéticas y al final el rendimiento del colector. Aunque el mecanismo de la transferencia de calor radiante predomina, debe considerarse, además, la convección en el valor de las pérdidas de energía (Fito, 2001).

2.5.2 Herramientas del Diseño

Actualmente existen diferentes softwares que permiten elaborar el diseño en computadora de cualquier prototipo, denominadas herramientas de diseño asistido, las cuales, están orientadas fundamentalmente, pero no exclusivamente, al diseño, la fabricación y el análisis asistido por computadora en los ámbitos científico e industrial. Entre las ventajas de dichos programas, se destaca que permiten obtener un modelo virtual tridimensional, a partir del cual se pueden obtener datos, montar en otros modelos, hacerlo adaptativo, imprimirlo, predecir posibles errores durante la fabricación, reducción del tiempo de dibujo y aumento de la eficacia del proceso de diseño (http://es.wikipedia.org/wiki/Herramientas_de_diseño_asistido).

Una de las herramientas de diseño y dibujo de prototipos más empleada actualmente debido a su fácil acceso y manejo, es el software AUTOCAD, el cual es un programa de diseño asistido por computadora para dibujo en 2D y 3D. Permite dibujar desde figuras básicas o primitivas (líneas, arcos, rectángulos, textos, etc.) hasta gráficos más complejos (sólidos). Además, puede organizar los objetos por medio de capas o estratos, ordenando el dibujo en partes independientes con diferente color y

grafismo. El dibujo de objetos seriados se gestiona mediante el uso de bloques, posibilitando la definición y modificación única de múltiples objetos repetidos. Otra de las grandes ventajas, es que permite guardar y compartir los diseños con gran facilidad y confianza (<http://es.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>).

2.6 **Error Sistemático**

La Metrología es la ciencia de las mediciones y medir es comparar con algo (unidad) que se toma como base de comparación. Actualmente, existen diferentes equipos de medida de uso habitual, sin embargo, es importante conocer la seguridad y fiabilidad de los datos que suministran. El principio de incertidumbre en física establece que cualquier medida está sujeta a errores, a incerteza en la medida. Existen diferentes tipos de errores que afectan las mediciones como son: sistemático, casual, de cero, de ganancia, ambientales, de carga, de paralaje del operador, de histéresis, entre otros (Marban y Pellecer, 2002).

El error sistemático lo constituyen aquellas fuentes que afectan a las mediciones de forma constante y suponen factores estables que afectan de la misma forma e intensidad cada vez que se hacen las mediciones (Abascal y Grande, 2009). Se define como la diferencia entre la media de todas las mediciones y el verdadero valor. Un error sistemático grande significa que el método de medida tiene una baja validez. El error sistemático mejora con una escrupulosa calibración previa del equipo de medida, y depende del instrumento, que subestima o sobreestima el valor real, siempre en la misma dirección (bias= predisposición), independientemente del número de veces que se repita la medida, y este error es previsible aunque no siempre controlable (Marban y Pellecer, 2002).

2.7 **Contaminación microbiológica de frutas y hortalizas**

Para garantizar que un producto sea apto para consumo humano es necesario tener cuidados que garanticen la sanidad del mismo. Es por ello que para tener productos de calidad se requiere tener un control de procesos para reducir los agentes contaminantes (Marín, 2008). Las frutas y hortalizas se encuentran expuestas a contaminación por microorganismos patógenos, antes, durante y después de su cosecha. En la precosecha son de interés la tierra, el agua de riego, la presencia de materia fecal humana o de animal, el tipo de abono utilizado, el aire y las personas que cuidan del terreno de cultivo. En la poscosecha destaca la maquinaria y equipo, el procesamiento del producto, los recipientes, animales domésticos y silvestres, los trabajadores, el polvo de la atmósfera y los vehículos (Fernández, 2008).

Fundamentalmente estos productos limitan su contenido microbiano a las partes externas, aunque algunos investigadores han reportado la presencia de bacterias en el interior de hortalizas diversas (Sturz y col., 2000).

2.7.1 **Control sanitario durante la deshidratación**

El control sanitario en todo el proceso de deshidratación solar es fundamental para lograr un producto de alta calidad desde el punto de vista microbiológico y se convierte en un requisito indispensable para su exitosa comercialización. No obstante, la complejidad intrínseca del proceso del secado solar, el cual está sujeto a las imprevisibles variaciones climatológicas, obliga a realizar un estudio sistemático y detallado de los puntos sanitarios críticos del proceso (Marín, 2008).

La remoción de agua en un alimento restringe hasta cancelar toda posibilidad de actividad microbiana. En consecuencia, le preserva del deterioro por esta causa. Aunado a esto, la acción directa del sol tiene un marcado efecto germicida (Fernández, 2008).

Durante el secado se presenta un daño celular progresivo y muerte microbiana. La magnitud de este efecto suele ser poco significativa. Si bien la temperatura llega a niveles reconocidos como germicidas, correlativamente la resistencia microbiana se incrementa con la pérdida de la humedad. Una deshidratación mal controlada, lenta e insuficiente, permite la supervivencia, y eventualmente la multiplicación de algunos microorganismos (Fernández, 2008). El grupo de microorganismos más difíciles de eliminar y controlar en los alimentos desecados es el de los hongos, siendo el grupo de *Aspergillus glaucus* el más notorio a valores bajos de A_w (Jay, 2000).

Aunque el tratamiento preliminar aplicado al alimento y las condiciones de secado tienden a disminuir el contenido microbiano, en ningún caso se alcanza la condición de esterilidad, por ese mero efecto. La calidad del producto terminado está fuertemente determinada por la de la materia prima utilizada. Por otra parte, la contaminación ulterior del equipo puede ser un factor decisivo en la inocuidad del alimento final (Fernández, 2008).

2.8 Trabajos Previos

Para la construcción de deshidratadores solares, previamente, se ha trabajado en coordinación con el CIDEM (Centro de Investigación y Desarrollo del Estado de Michoacán) en dos vertientes fundamentales: a) El diseño, construcción y caracterización de deshidratadores solares y b) La caracterización de las condiciones de secado. Los modelos desarrollados han sido utilizados con fines agrícolas, principalmente para el secado de frutas y verduras como son: plátano (Rangel et al., 2008), setas (Macazaga, 2008), mango (Cortéz et al., 2007), quelite (Baltasar et al., 2007), nopal, chiles, y verdolaga, entre otros.

Entre los diferentes modelos de deshidratadores solares diseñados se encuentran: directos, indirectos y mixtos, con fines tanto de autoconsumo como para pequeñas aplicaciones productivas y con capacidad de deshidratación que va desde los 3 kg de producto fresco hasta superiores a los 100 kg, resultando de mejor eficiencia los secadores indirectos y con fines de autoconsumo. Si bien todos los modelos desarrollados han llevado a cabo su principal función y se ha logrado la deshidratación de diversos productos, con características fisicoquímicas apropiadas, los productos finales no siempre presentan características organolépticas adecuadas y las eficiencias de secado son bajas. Además, se ha observado que con cargas elevadas de producto se tienen problemas durante la deshidratación, ya que no se obtienen las humedades finales requeridas, presentándose entonces características inapropiadas en los productos finales y deterioro por crecimiento microbiano en los frutos.

Se estima que dichas fallas se deben principalmente a que no se han logrado establecer las condiciones ideales para el diseño, construcción y variables de secado óptimas. También, ha faltado desarrollar con precisión los cálculos termodinámicos correspondientes.

En la Tabla 4 se presentan algunos trabajos realizados con plátano en los modelos antes mencionados. En todos los casos, el trozado del producto fue en rebanadas de espesor de 3 mm aproximadamente y las pruebas se realizaron entre los meses de febrero y mayo.

Tabla 4. Deshidrataciones previas de plátano en diferentes deshidratadores solares.

Fuente	Deshidratador Solar	Tiempo de secado (hr)
Marín, 2008	Directo	7.6
Marín, 2008	Indirecto	7.3
Marín, 2008	Mixto	6.3
Proyecto actual	Mixto (Modelo previo)	6.2

3 JUSTIFICACIÓN

Michoacán ocupa el primer lugar nacional en producción anual de guayaba y el segundo lugar en producción anual de plátano, sin embargo, si bien es cierto que la mayoría de los esfuerzos en la tecnología agrícola se han enfocado hacia la producción primaria y se han obtenido resultados satisfactorios, poco se ha realizado sobre el manejo y transformaciones de estas producciones. Dado que las frutas y hortalizas son productos altamente perecederos, el problema existente es de mayor magnitud. Los esfuerzos realizados para elevar la producción se pierden en las etapas subsiguientes, ocurriendo grandes pérdidas en las fases posteriores a la cosecha. De acuerdo con la SAGARPA en el año 2007 se registró una pérdida del 33% de la producción total anual de frutos en el país, esto debido a malas prácticas poscosecha. Particularmente en Michoacán en el año 2009 se reportó una producción anual total de plátano de 122,610.45 Ton con pérdidas por 40,000 Ton de las cuales 12 000 Ton aproximadamente correspondieron a pérdidas poscosecha (<http://www.limonmexicano.gob.mx>).

Desafortunadamente, la asesoría científica que se tiene para la producción, no se tiene para el manejo de la misma. Esto indica que es prioritario enfocar los esfuerzos para optimizar el manejo poscosecha de los alimentos (Ramírez et al., 2007).

Una alternativa viable para combatir el problema anterior es a través de la construcción de deshidratadores solares eficientes y de bajo costo, así como la debida promoción de los mismos con los productores de frutas y hortalizas. Los productos deshidratados presentan varias ventajas como el aumento de valor, de vida útil y la facilidad de transporte y almacenamiento y tienen numerosas aplicaciones como son: en postres, como frituras, en bebidas de sabor, en cereales, en sopas y en caramelos, entre otros.

Los deshidratadores solares pueden convertirse en tecnología rural apropiada, sin embargo, para lograrlo es necesario conocer a fondo los principios termodinámicos de su funcionamiento, el proceso de secado de los alimentos a deshidratar, las condiciones meteorológicas del lugar y los fundamentos de la radiación solar. Es un trabajo de caracterización que requiere esfuerzos de análisis termodinámico tanto teórico como experimental, para generar diseños adecuados de deshidratadores solares.

4 HIPÓTESIS

Se podrá construir un deshidratador solar de bajo costo, con alta eficiencia energética y que permita preservar las características nutrimentales y sensoriales de los productos deshidratados, a partir de la optimización de un modelo previo.

5 OBJETIVOS

5.1 General

Optimizar a través de la caracterización un deshidratador solar mixto, para construir finalmente un modelo con un alto grado de eficiencia* que garantice la preservación de las propiedades sensoriales y nutrimentales de los productos en él deshidratados.

5.2 Específicos

- Caracterización de los frutos (plátano y guayaba) con los que se harán las pruebas de deshidratado en el prototipo diseñado.
- Caracterización del deshidratador con el que se realizarán las pruebas para detectar deficiencias en éste y posteriormente a través de la modelación teórica y numérica corregirlas para finalmente construir un prototipo mejorado.
- Realizar las pruebas de caracterización microbiológica y textural de los productos deshidratados en el secador diseñado.
- Cálculo de la eficiencia del deshidratador solar con diferentes frutos.

*Alto grado de eficiencia en relación con www.bretconenergiasolar.com y www.sitiosolar.com está dado por la deshidratación de sus productos en jornadas no mayores a 10 hrs considerando una carga aprox. de 8 kgs. y días con escasa o nula nubosidad.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materiales

Se trabajó con plátano Tabasco y guayaba blanca adquiridos en un centro comercial de la ciudad de Morelia, Mich. Para realizar las diferentes pruebas, se utilizó el plátano con un estado de madurez 3 y la guayaba con un estado de madurez 2 (Ver tablas de madurez). La elección de los estados de madurez con los que se trabajó cada fruto fue en base al mejor comportamiento durante el secado. Para llevar a cabo la deshidratación de éstos, se lavaron con abundante agua y se cortaron en rodajas. Se trabajó con diferentes espesores de rebanada para cada fruto. Las piezas fueron de diámetros aproximados de 3 cm para el plátano y de 5 cm para la guayaba.

Se realizaron pruebas de secado también con mango de la variedad Haden (Fig. 4) y nopal *Opuntia tomentosa* (Fig. 5). El mango se trabajó sin cáscara, se lavó y fue cortado en rectángulos de 5 cm x 2 cm y 3 mm de espesor. El nopal, se lavó, se retiraron todas las espinas y se cortó en cuadros de 1 cm de diámetro y 3 mm de espesor aprox.



Fig. 4. Mango Haden



Fig. 5. *Opuntia tomentosa*

La optimización del nuevo secador solar utilizó como referencia un deshidratador solar mixto, propiedad de la Facultad de Químico Farmacobiología de la U.M.S.N.H. (Fig.6):



Fig.6. Deshidratador solar donde se llevaron a cabo las pruebas de deshidratación y perfiles de temperatura para optimizar el nuevo modelo.

Para realizar el estudio de caracterización de grados de madurez del plátano y guayaba se trabajó con un colorímetro Color Flex Hunter Lab (Fig.7), un texturómetro Texture Analyser TA-XT2 (Fig. 8) y un refractómetro ATAGO N-50E (Fig.9).



Fig. 7. Colorímetro Color Flex Hunter Lab.



Fig. 8. Texturómetro Texture Analyser TA-XT2.



Fig. 9. Refractómetro ATAGO N-50E.

Para medir la temperatura y humedad dentro del deshidratador, se utilizaron dos termómetros Wireless Thermometer modelo 63-1088 (Fig.10), y un termohigrómetro Wired Thermometer/Hygrometer modelo 63-1032 (Fig. 11).



Fig. 10. Wireless Thermometer modelo 63-1088.

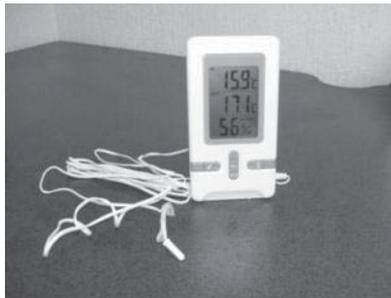


Fig. 11. Wired Thermometer/Hygrometer modelo 63-1032.

Para elaborar las cinéticas de secado y cortar la fruta, se utilizó una rebanadora Meat Slicer Lot. No. 2312 (Fig.12) y para monitorear el peso de las rebanadas se utilizó una balanza analítica Sartorius Modelo BL120S (Fig. 13).



Fig. 12. Rebanadora Meat Slicer Lot. No. 2312.



Fig. 13. Balanza analítica Sartorius modelo 63-1032.

6.2 Métodos

6.2.1 Estandarización de grado de madurez de plátano y guayaba

Se estandarizaron los grados de madurez con los que se trabajó el plátano y la guayaba. Para llevar a cabo las pruebas se adquirieron los frutos con diferentes grados de madurez caracterizada en base a 3 parámetros: color, textura y contenido de grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$) y se clasificó a cada fruto en 4 categorías en base a sus características físicas, donde el 1 representa el fruto en su estado de menor madurez y el 4 el de mayor madurez.

Para determinar el color se midieron los valores de L, a y b con el colorímetro. Con el texturómetro se midió la fuerza en gramos requerida para penetrar al fruto, es decir, la resistencia a ser penetrado, la cual disminuye conforme aumenta el grado de madurez; para realizarlo el tipo de sonda utilizada fue la Aguja P2N (Fig. 14). Para realizar las pruebas de textura los frutos se trabajaron con y sin cáscara. La medición en los frutos con cáscara se realizó en el centro del fruto completo y en los frutos sin cáscara se llevo a cabo sobre las rebanadas. Para el plátano se realizó en el centro de la pieza y para la guayaba en la orilla de la circunferencia. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

Se calculó la media y desviación estándar de cada triplicado. Finalmente se evaluaron las diferencias estadísticas existentes entre los diferentes grados de madurez, para lo cual se llevó a cabo una prueba de comparación de medias. Lo anterior se realizó mediante una prueba de Tukey-Kramer con un $\alpha= 0.05$ utilizando el software JMP 6.0.



Fig. 14. Aguja P2N.

Los ensayos en el texturómetro se realizaron con las siguientes características:

- **Tipo de Sonda:** Aguja P2N
- **Velocidad de ensayo:** 2 mm/s
- **Distancia:** 4mm – plátano/2mm-guayaba
- **Fuerza:** 100g
- **Tiempo:** 4.50 seg
- **Retorno:** 80 mm

6.2.2 Perfil de temperatura experimental del deshidratador de referencia

Para determinar el perfil de temperatura experimental del modelo previo, se midieron las temperaturas de deshidratación en diferentes puntos de la cabina y en las charolas donde se colocaba el producto. En las diferentes pruebas se registró la temperatura en la primera charola ($x= 0$ cm) y en la última ($x= 99$ cm), la temperatura del aire a la entrada del colector, a la salida de éste (entrada a la cabina de secado) y a lo largo de una misma charola, en $x= 0$ cm, $x= 11$ cm y $x= 22$ cm. También se midieron las temperaturas a diferentes distancias dentro de la cámara ($x= 21, 37, 53, 68$ y 84 cm (Fig.15)); lo anterior se realizó con la finalidad de determinar si la cámara de secado era adiabática, así como para conocer la relación de la temperatura en relación a la distancia dentro de la cámara.

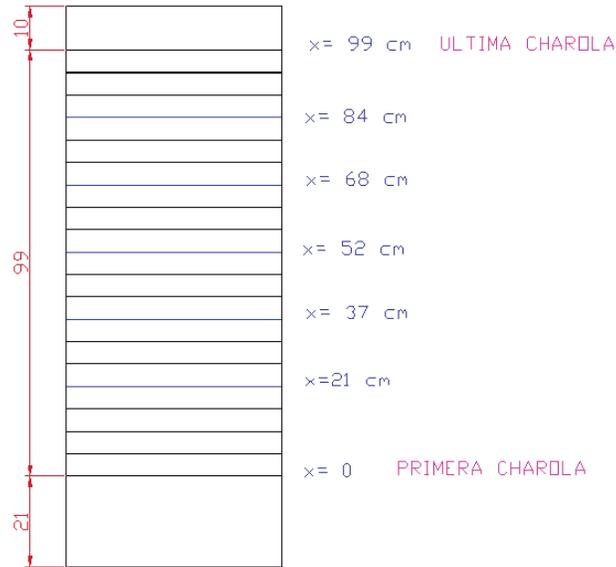


Fig. 15. Esquema de monitoreo de temperaturas en cabina de secado de modelo previo.

Finalmente se monitoreo la temperatura en la superficie interior y exterior de las paredes de la cámara, ésto con la finalidad de determinar si existe pérdida de calor a través de las paredes del deshidratador. Durante todas las pruebas anteriores se registró la humedad, temperatura del ambiente y la radiación solar (W/m^2).

6.2.3 Cinéticas de secado realizadas en el modelo previo

Se realizaron las cinéticas de secado en las rebanadas de guayaba y plátano. Se trabajó con lotes uniformes de producto. Para cada una de las frutas se realizó la cinética a 3 espesores de rebanada diferentes y cada prueba se realizó por triplicado.



Para llevar a cabo las cinéticas, se eligió una rebanada de entre el lote a deshidratar, a la cual se le monitoreó el peso al inicio de la prueba y a intervalos de 20 min hasta que el peso no tuvo variaciones significativas (peso constante). Posteriormente se procedió a la elaboración del gráfico de las cinéticas donde se muestra la pérdida de humedad con respecto al tiempo.

6.2.4 Determinación de la eficiencia del secado

Se determinó la eficiencia del deshidratador solar que se utilizó como referencia y del nuevo modelo construido. La eficiencia se determinó en base a la siguiente fórmula:

Para realizar el cálculo correspondiente se colocó 1kg de fruta a deshidratar y se registró el tiempo total de secado del lote.

6.2.5 Cálculos termodinámicos para dimensionar el deshidratador solar

Entre los cálculos correspondientes realizados se encuentran:

1. Pérdida de calor por convección y conducción en cada rebanada y por charola.
2. Disminución de temperatura que sufre el aire al fluir sobre cada rebanada.
3. Gradiente máximo posible de temperatura del aire entre la primera y la última charola para evitar que la velocidad de secado varíe significativamente tomando en cuenta el número de charolas del nuevo modelo y su área.
4. Humedad del aire al fluir sobre cada charola para comprobar que no existe condensación.

5. Número de charolas que pueden adicionarse al equipo cuando la temperatura promedio del aire aumenta 5 y 10°C con referencia a la temperatura promedio de la jornada de secado utilizada para realizar los cálculos.
6. Espesor de la capa de aire que separa a las láminas de policarbonato.

En base a estas determinaciones se calculó el número total de charolas del deshidratador, así como su área y la separación que debe haber entre cada una de ellas.

Para dichas determinaciones se realizaron algunos cálculos estadísticos para verificar la variación existente entre los resultados y que tan significativa era, para lo cual se utilizó el programa estadístico JMP 6.0. El parámetro utilizado para evaluar las diferencias fue el Coeficiente de Variación (CV), ya que de acuerdo con Narvaiza, (2005) es adecuado para evaluar la diferencia estadística entre dos muestras distintas.

6.2.6 Evaluación de la pérdida de calor a través de las paredes del deshidratador con diferentes modelos

Una vez que se determinaron las dimensiones del nuevo deshidratador solar, se evaluó que materiales serían los más indicados para construir la cabina y reducir así la pérdida de calor a través de las paredes. Los cálculos se realizaron para 4 diferentes modelos, todos usando como base doble capa de policarbonato y utilizando para separarlas un aislante diferente que varía de acuerdo al modelo. Los modelos evaluados fueron:

1. Policarbonato/Aire/Policarbonato
2. Policarbonato/Fibra de vidrio/Policarbonato
3. Policarbonato/Caucho/Policarbonato
4. Policarbonato/Espuma de poliuretano/Policarbonato

6.2.7 Diseño del deshidratador solar

Para realizar el diseño del deshidratador solar se utilizó el software AUTOCAD 2009. El prototipo completo se elaboró en versión 3D, además se elaboraron las vistas ortogonales (frontal, lateral y top) del equipo.

6.2.8 Perfil de temperatura analítico del deshidratador solar

Se elaboró el perfil de temperatura analítico de la cabina de secado utilizando las condiciones y los materiales del modelo 1. El análisis térmico se realizó utilizando el programa ANSYS 11.0, a través de un modelo conductivo y convectivo combinado de transferencia de calor. El modelo se resolvió usando el método de elementos finitos.

Las condiciones utilizadas para generar el modelo fueron:

- Geometría del modelo: rectangular
- Cabina de secado con doble lámina de policarbonato separadas por capa de aire (Fig.16)
- Modelo conductivo-convectivo isotrópico
- Elemento: *Plane55*
- Enmallado a 0.025
- Flujo convectivo exterior en paredes laterales de la cabina de secado.
- Flujo convectivo interior
- $T_{\text{aire entrada}} = 60^{\circ}\text{C}$
- $h_{\text{Interior}} = 25 \text{ W/m}^2\text{C}$
- $h_{\text{exterior}} = 45 \text{ W/m}^2\text{C}$
- $k_{\text{aire}} = 0.026 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$
- $k_{\text{policarbonato}} = 0.18 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$

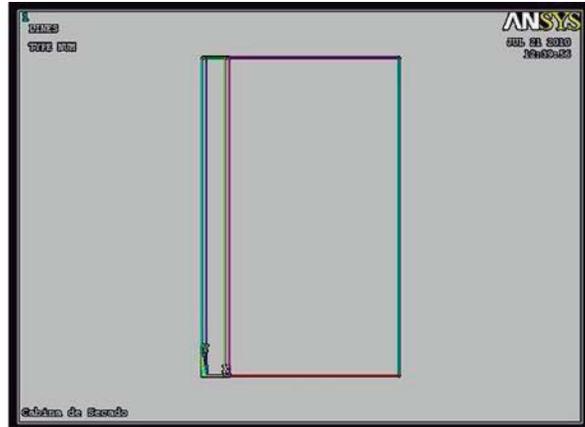


Fig. 16. Modelado de la cabina de secado en ANSYS

6.2.9 Construcción del deshidratador solar

De acuerdo a las pruebas experimentales y los cálculos teóricos que se desarrollaron a lo largo del proyecto, se llevó a cabo la construcción definitiva del deshidratador en base a las características establecidas en el presente documento.

6.2.10 Cinéticas de secado realizadas en el nuevo modelo

Se realizaron las cinéticas de secado en las rebanadas de guayaba y plátano utilizando el nuevo equipo. Se trabajó con lotes uniformes de producto. Para el plátano se realizó la cinética a un espesor de 2 mm y para la guayaba de 3 mm. Los espesores de rebanada con los que se trabajó fueron debido a que anteriormente se habían determinado como óptimos en función de la velocidad de secado.

Para elaborar las cinéticas, se eligió una rebanada de entre el lote a deshidratar, a la cual se le monitoreó el peso al inicio de la prueba y a intervalos de 20 min hasta que el peso no tuvo variaciones significativas (peso constante).

Cada cinética se realizó por triplicado. Posteriormente se procedió a la elaboración de los gráficos de las cinéticas.

6.2.11 **Pruebas de secado para evaluar el nuevo modelo**

Se llevaron a cabo diferentes pruebas para evaluar el funcionamiento del nuevo deshidratador solar y para corroborar que funciona de acuerdo a lo predicho por los cálculos teóricos realizados. Entre estas pruebas se encuentran:

- ❖ Prueba de secado comparativa utilizando ambos modelos simultáneamente y bajo las mismas condiciones de secado.
- ❖ Perfil de temperatura experimental de la cabina de secado para evaluar el gradiente de temperatura dentro de la cabina.
- ❖ Prueba de secado con capacidad máxima de producto.
- ❖ Secado de mango y nopal, para evaluar el funcionamiento y la eficiencia del deshidratador con otros productos.

6.2.12 **Evaluación microbiológica y textural de producto deshidratado**

Se realizó la evaluación microbiológica del plátano deshidratado en el nuevo modelo para verificar que éste no promueve la contaminación de los productos. Los análisis se realizaron por triplicado y el producto se tomó de diferentes puntos de la cabina en cada análisis: primera charola, última y del centro. Las determinaciones se realizaron en base a la Norma Oficial Mexicana y fueron las siguientes:

1. NOM-110-SSA1-1994. Bienes y servicios. Preparación y dilución de muestras de alimentos para el análisis microbiológico.
2. NOM-111-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos.
3. NOM-113-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en placa.
4. NOM-114-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la determinación de *Salmonella* en alimentos.
5. NOM-115-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la determinación de *Staphylococcus aureus* en alimentos con adecuación.

6. NOM-092-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la cuenta de bacterias aerobias en placa. NOM-112-SSA1-1994. Bienes y servicios. Método para la cuenta de microorganismos coliformes totales en tubo.

Se compararon estadísticamente las diferencias en la textura y el color de los productos deshidratados con respecto al producto fresco a través de una prueba de comparación de medias con $\alpha = 0.05$ que se realizó utilizando el programa JMP 6.0.

6.2.13 Error sistemático del equipo

Para calcular el error sistemático del equipo se monitoreo el tiempo de secado de 30 rebanadas de plátano. Las rebanadas se tomaron de diferentes puntos de la cabina del deshidratador en diferentes puntos de cada charola y tenían 3 mm de espesor y diámetro de 3cm aproximadamente. Esto se hizo para evaluar el error provocado por la posición de las piezas independientemente del producto del que se trate. Después se calculó el tiempo de secado teórico de una rebanada bajo las mismas condiciones. El cálculo del error de acuerdo con Marban y Pellecer (2002) se realizó a través de la siguiente ecuación:

Donde:

ES= Error sistemático del equipo.

μ = Media de todas las mediciones realizadas (tiempo de secado c/rebanada).

x= Valor teórico del tiempo de secado/rebanada.

7 RESULTADOS

7.1 Estandarización de grados de madurez

Las tablas 5 y 6 concentran los valores de color, textura y contenido de sólidos solubles asociados a cada estado de madurez:

Tabla 5. Grados de madurez de plátano Tabasco.

Grado de madurez	Características físicas	Color	Textura (g)	°Bx
1		L= 75.99, σ= 2.51 a= 1.85, σ= 0.27 b= 16.17, σ= 1.91	C/cáscara= 96.47 σ= 1.36 S/cáscara= 64.36 σ= 0.96	2.9 σ= 0.26
2		L= 80.06, σ= 1.75 a= 1.61, σ= 0.40 b= 14.28, σ= 1.70	C/cáscara = 94.06 σ= 0.78 S/cáscara= 62.11 σ=3.26	4.7 σ= 0.20
3		L= 75.79, σ= 1.46 a= 2.32, σ= 0.14 b= 15.93, σ= 0.57	C/cáscara = 91.77 σ= 2.03 S/cáscara= 60.55 σ=1.29	24.7 σ= 0.44
4		L= 58.52, σ= 0.39 a= 4.05, σ= 0.25 b= 19.36, σ= 0.50	C/cáscara = 87.10 σ= 1.50 S/cáscara= 57.28 σ= 0.30	36.4 σ= 0.40

Tabla 6. Grados de madurez de guayaba blanca.

Grado de madurez	Características físicas	Color	Textura (g)	°Bx
1		L= 74.91, σ= 2.20 a= 4.23, σ= 1.07 b= 21.80, σ= 0.39	C/cáscara = 95 σ= 0.62 S/cáscara= 93.27 σ= 0.96	0.7 σ= 0.26
2		L= 76.38, σ= 1.23 a= 4.59, σ= 0.41 b= 21.19, σ= 0.52	C/cáscara = 92.06 σ= 0.42 S/cáscara= 91.16 σ= 3.26	1.8 σ= 0.36
3		L= 68.46, σ= 2.21 a= 6.58, σ= 0.52 b= 24.47, σ= 0.43	C/cáscara = 89.63 σ= 0.45 S/cáscara= 88.43 σ= 1.29	7.2 σ= 0.26
4		L= 66.44, σ= 2.15 a= 6.77, σ= 0.73 b= 24.96, σ= 0.93	C/cáscara = 88 σ= 0.56 S/cáscara= 87.67 σ= 0.30	12.6 σ= 0.46

Se evaluaron las diferencias estadísticas significativas entre los diferentes estados de madurez en cada fruto (Tabla 7 y 8). Las filas que se encuentran coloreadas corresponden al estado de madurez elegido para realizar las pruebas de secado:

Tabla 7. Análisis estadístico de estados de madurez en plátano.

Estado de madurez	Color			Textura c/cáscara	Textura s/cáscara	°Brix
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>			
1	75.99 ± 2.51 a	1.45 ± 0.27 b	13.17 ± 1.91 b	96.47 ± 1.36 a	64.36 ± 0.96 a	2.9 ± 0.26 d
2	80.06 ± 1.75 a	1.61 ± 0.40 b	14.28 ± 1.70 b	94.06 ± 0.78 ab	62.11 ± 3.26 a	4.7 ± 0.20 c
3	75.79 ± 1.46 a	2.32 ± 0.14 b	15.93 ± 0.57 ab	91.77 ± 2.03 b	60.55 ± 1.29 ab	24.7 ± 0.44 b
4	58.52 ± 0.39 b	4.05 ± 0.25 a	19.36 ± 0.50 a	87.10 ± 1.50 c	57.28 ± 0.30 b	36.4 ± 0.40 a

Tabla 8. Análisis estadístico de estados de madurez en guayaba.

Estado de madurez	Color			Textura c/cáscara	Textura s/cáscara	°Brix
	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>			
1	74.91 ± 2.20 a	4.23 ± 1.07 b	21.80 ± 0.39 b	95.0 ± 0.62 a	93.27 ± 0.96 a	0.7 ± 0.26 d
2	76.38 ± 1.23 a	4.59 ± 0.41 b	21.19 ± 0.52 b	92.06 ± 0.42 b	91.16 ± 3.26 a	1.8 ± 0.36 c
3	68.46 ± 2.21 b	6.58 ± 0.52 a	24.47 ± 0.43 a	89.63 ± 0.45 c	88.43 ± 1.29 b	7.2 ± 0.26 b
4	66.44 ± 2.15 b	6.77 ± 0.73 a	24.96 ± 0.93 a	88.0 ± 0.56 d	87.67 ± 0.30 b	12.6 ± 0.46 a

Se puede apreciar en la tablas anteriores, como en el color, para ambos frutos, el valor en los parámetros *a* y *b* aumenta conforme el fruto se encuentra más maduro, ésto es congruente con la pérdida del color verde ("*a*" más positivo) y el aumento del color amarillo ("*b*" más positivo) conforme el fruto se vuelve más maduro. Sin embargo, estadísticamente no se encuentran bien diferenciados los estados de madurez 1,2 y 3 en el plátano y 1 y 2 y 3 y 4 en guayaba ya que no se consideran significativamente

distintos. De acuerdo a lo anterior, el color de los estados de madurez de interés para este proyecto no se encuentra bien diferenciado, por lo cual no puede ser utilizado como parámetro de referencia para reproducir las condiciones de trabajo del proyecto. Esto es desfavorable ya que actualmente en muchas industrias que trabajan con frutas y hortalizas se utiliza el color como un parámetro de control de calidad de recepción de materia prima tomando en cuenta que los índices de madurez, frescura, humedad, envejecimiento, pureza o calidad de un alimento pueden determinarse de forma indirecta por medio de la medida del color (Osorio, 2007).

En cuanto a la textura, también se aprecia claramente como la fuerza requerida para penetrar al fruto disminuye conforme aumenta el grado maduro del fruto, debido al ablandamiento de éste. A éste respecto y para el caso de la guayaba con cáscara, podría ser utilizado como un parámetro de selección de materia prima, lo cual no sería tan recomendable para el caso del plátano, ya que no se presentan diferencias significativas entre los tres primeros grados de madurez. Por otro lado, para ambos frutos sin cáscara, no se recomienda la prueba de textura para seleccionar el producto ya que las diferencias entre los diferentes estados no son muy claras.

Se aprecia en las tablas como el contenido de sólidos totales aumenta conforme avanza el estado de madurez en los frutos debido al rompimiento del almidón en azúcares de cadena corta (Saltveit, 1999). Este parámetro sí se encuentra estadísticamente bien diferenciado para los diferentes grados de madurez, por lo que podría ser ampliamente recomendado como un índice para seleccionar la materia prima.

El análisis anterior resulta de suma importancia debido a que se debe tener en cuenta que una adecuada selección de la materia prima es uno de los puntos críticos de control de cualquier proceso (Geankoplis, 2006).

7.2 Caracterización del modelo previo

Para conocer el perfil de temperatura experimental del modelo previo del deshidratador solar, primeramente se monitoreo la temperatura del aire a la entrada del colector solar y a la salida (Tabla 9) para conocer el incremento que sufre la temperatura del aire durante su trayecto dentro del colector y determinar así la efectividad del colector solar.

Tabla 9. Monitoreo del incremento de la temperatura del aire al interior del colector solar.

t (min)	T _{amb} (°C)	T _{aire entrada colector} (°C)	T _{aire salida colector} (°C)	Incremento ΔT (°C)	Rad (W/m ²)
0	20.1	21.4	28.9	7.5	239
15	20.2	26.4	35.5	9.1	245
30	21.0	29.9	43.7	13.8	277
45	22.2	32.3	48.4	16.1	265
60	21.9	33.9	51.3	17.4	293
75	22.3	30.9	51.2	20.3	422
90	23.6	36.1	51	14.9	546
105	23.3	36.4	53	16.6	611
120	23.5	35.2	53.7	18.5	598
135	23.3	36.7	53.6	16.9	567
150	23.3	34.9	55.2	20.3	569
165	23.9	37.1	55.6	18.5	635
180	24.1	28.5	44.7	16.2	566
195	23.3	24.7	39.3	14.6	507
210	23.8	23	34.2	11.2	369
225	23.1	21.7	31.7	10	143
240	21.3	20.2	28.2	8	113

*Los datos de radiación y T_{amb.} se obtuvieron de: <http://www.oopas.gob.mx/html/estacionmet.asp>.

De acuerdo con los resultados anteriores el incremento promedio de la temperatura del aire es de 14.7°C≈ 15°C. De acuerdo con Piacentini y Cortes (1989), un colector de eficiencia alta puede estar definido por aquél que logra incrementos de la temperatura del aire, superiores a 15 °C, por lo que de acuerdo a éste criterio el colector puede ser considerado de alta eficiencia.

Cengel, (2003) define un proceso adiabático como aquél en el cual el sistema no intercambia calor con su entorno, debido a que existen elementos que lo impiden. Por lo tanto, en un sistema adiabático la diferencia de temperatura no debe ser significativa.

En una segunda prueba se monitoreo la temperatura del aire al interior de la cabina en la primera charola (No.1) y la última (No.20) para determinar el gradiente de temperatura existente en el aire (Tabla 10) y corroborar si el sistema es adiabático.

Tabla 10. Monitoreo de temperatura del aire en primera y última charola de la cabina de secado.

t (min)	T _{amb} (°C)	T _{cabina- charola 1} (°C)	T _{cabina - charola 20} (°C)	C.V. (%)	Rad (W/m ²)
0	20.1	29.9	20.2	27.38	239
15	20.2	41.4	33.5	14.91	245
30	21	48.2	40.4	12.45	277
45	22.2	50.3	45.5	7.08	265
60	21.9	54.1	49.2	6.70	293
75	22.3	52.4	46.9	7.83	422
90	23.6	57	46.7	14.04	546
105	23.3	59.1	51.8	9.30	611
120	23.5	58.4	50.6	10.12	598
135	23.3	58.4	50.2	10.67	567
150	23.3	61.4	51.2	12.81	569
165	23.9	58.4	50.8	9.84	635
180	24.1	56.6	46.2	14.30	566
195	23.3	47.8	39.4	13.62	507

*Los datos de radiación y T_{amb.} se obtuvieron de: <http://www.ooapas.gob.mx/html/estacionmet.asp>.

De acuerdo con Narvaiza et al., (2005) en pruebas comparativas de carácter técnico científico es inaceptable que el coeficiente de variación sea mayor al 10%, esto para poder indicar que no existen diferencias significativas entre las muestras analizadas. En base a dicho criterio, en la tabla anterior en más del 60% de los casos el C.V.> 10%, por lo tanto se puede afirmar que la temperatura al interior de la cámara es estadísticamente distinta y el sistema no es adiabático. Lo anterior, representa un problema ya que las velocidades de secado son diferentes dentro de la cabina y deshidratación no se lleva a cabo uniformemente.

Los gradientes de temperatura existentes en el colector solar (entrada y salida) y en la cámara de secado (primera y última charola) fueron graficados (Figura 17):

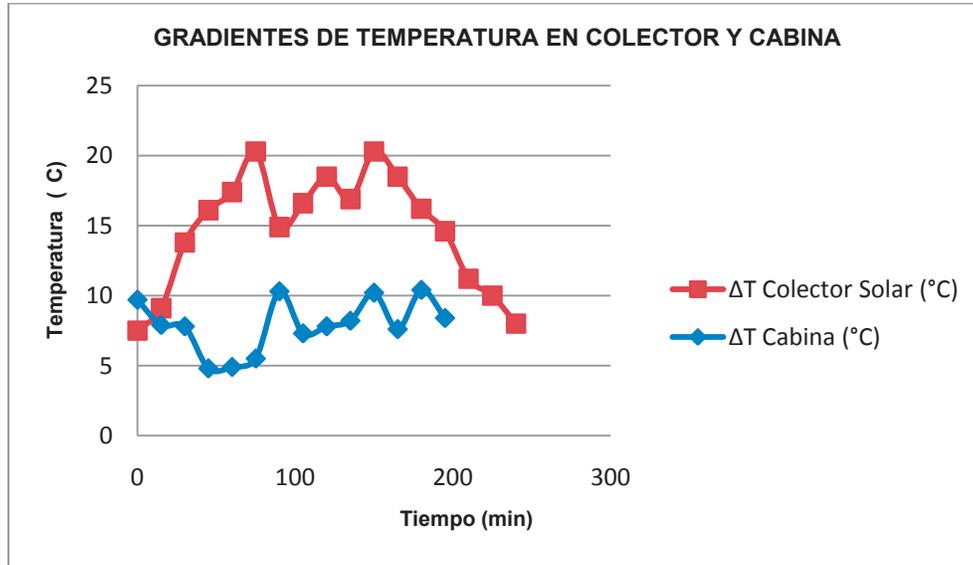


Fig. 17. Gradientes de temperatura en colector y cabina.

Se puede observar claramente en el gráfico que el gradiente de temperatura dentro de la cabina se mantiene oscilando entre los 5 y 10°C, razón por la cual la velocidad de secado no es uniforme y por lo tanto no se obtienen lotes uniformes.

En otra prueba se monitoreo la temperatura interior y exterior de las paredes de la cabina de secado (Tabla 11) para determinar si existía diferencia de temperatura entre ambas y conocer así si había pérdida de calor a través de éstas.

Tabla 11. Monitoreo de temperatura interior y exterior de las paredes de la cabina de secado.

MONITOREO	T. PARED 1 (°C)		T. PARED 2 (°C)		T. PARED 3 (°C)		T _{amb.} (°C)	Rad (W/m ²)
	Interior	Exterior	Interior	Exterior	Interior	Exterior		
1	23.4	20.1	26.1	20.5	27.1	22.6	17.6	596
2	23.9	20.4	26.7	21.1	27.2	22.1	19.1	647
3	25.1	20.3	27.8	22.2	29.6	23.7	20	668
4	25.9	21.3	29.1	22.7	30.3	24.4	21.2	701
5	27.2	21.6	30.9	22.9	32.6	24.9	21.4	747
6	28.1	23.1	31.5	24.3	34.6	25.1	22.3	768
7	29.5	24.8	33.1	24.7	34.9	25.5	22.8	793
8	31	25.1	33.1	25.7	36.6	26.4	23.1	809
9	31.1	24.1	33.2	25.2	37.1	26.5	23.6	821
10	32.3	24.5	34.9	26	37.8	28.1	24.2	830
11	32	26.3	34.4	28.1	38.6	29.3	24.3	835

En base a los resultados anteriores, se observa que sí existe una pérdida de calor a través de las paredes ya que la temperatura de las paredes externas e internas es distinta; el flujo, de acuerdo con la segunda Ley de la Termodinámica (Cengel, 2003), se da desde el interior al exterior de la pared, ya que esta ley expresa como el flujo de calor siempre se da desde la zona de mayor a menor temperatura, hasta que éstas se igualan. Esta pérdida contribuye a que el sistema no sea adiabático como ya se demostró anteriormente.

Se realizaron las cinéticas de secado utilizando lotes de 1 kg de fruta. Se decidió cortar la fruta en rebanadas, ya que de acuerdo con Fito (2001), el trozado en rebanadas es una de las mejores alternativas para la deshidratación de frutos ya que aumenta el área de transferencia (relación superficie/volumen) y reduce la distancia que debe recorrer el agua del centro a la superficie del fruto, con lo cual se obtiene una mayor velocidad de secado, principalmente en el periodo de velocidad decreciente, con respecto a otras formas de trozado. Además, permite un rendimiento industrial conveniente, ya que se puede utilizar la mayor cantidad posible de material aprovechable. Los resultados obtenidos se presentan a continuación (Tabla 12 y 13):

Tabla 12. Tiempo de secado de plátano a diferentes espesores de rebanada.

Espesor (mm)	Tiempo de Secado (hr)	H_{final} (%)
2	6.2	7.9
3	5.6	8.1
5	7.6	8.1

Tabla 13. Tiempo de secado de guayaba a diferentes espesores de rebanada.

Espesor (mm)	Tiempo de Secado (hr)	H_{final} (%)
3	5.6	7.7
4	6.6	7.8
5	7.0	7.8

En base a los resultados anteriores se encontró que comparativamente entre los dos frutos la guayaba se deshidrata más rápidamente, lo cual se aprecia si comparamos la deshidratación a un espesor de rebanada de 5 mm en ambos frutos (Fig. 18), donde el tiempo de secado es menor para la guayaba, aunado a esto debe tomarse en cuenta que las rebanadas de guayaba eran de mayor diámetro, que la humedad final de la guayaba fue menor y que la guayaba tiene un mayor contenido de agua. Por lo tanto, la razón por la que la guayaba deshidrata más rápidamente es, de acuerdo con Geankoplis (2006), debido a la naturaleza de su pulpa que es considerada como un sólido semiporoso, cuyos poros actúan como canales por los que el agua emigra hacia la superficie con mayor velocidad que en un sólido que no es poroso.

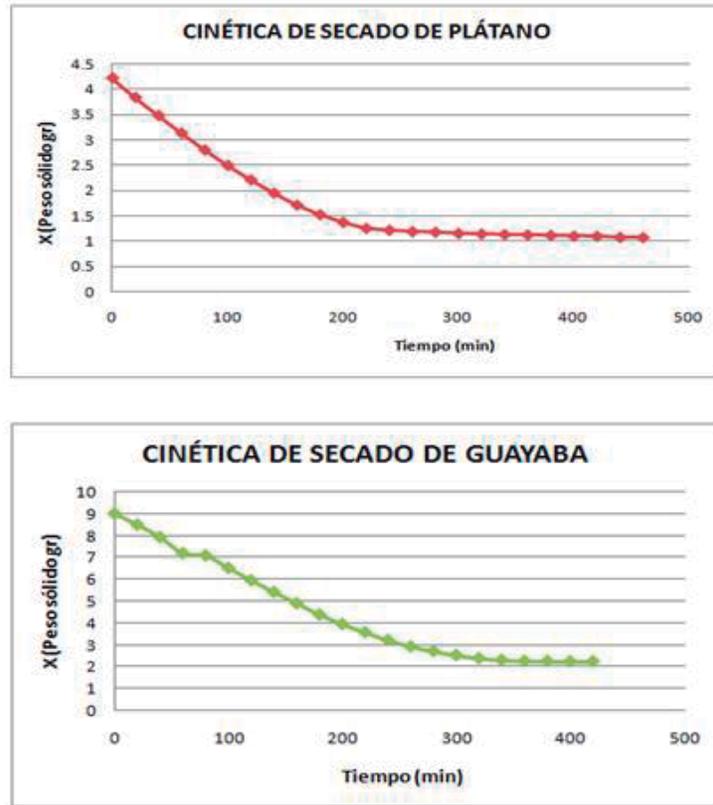


Figura 18. Cinéticas de Secado de plátano y guayaba a espesor de rebanada de 5 mm.

De acuerdo con las Tablas 6 y 7 y en función de las velocidades de secado, los espesores óptimos de rebanada para la deshidratación son 2 y 3 mm para plátano y guayaba respectivamente.

A continuación se realizaron los gráficos de las cinéticas de secado a los espesores óptimos para ambos frutos (Fig.19 y 20):

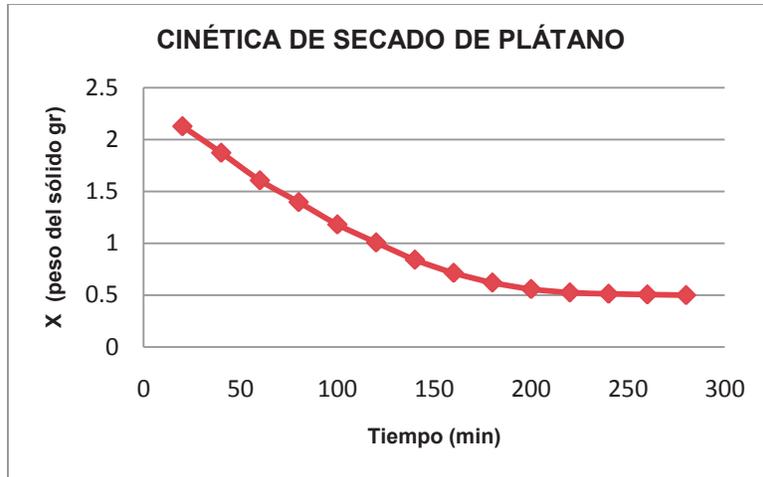


Figura 19. Cinética de Secado de plátano a espesor de rebanada de 2 mm.

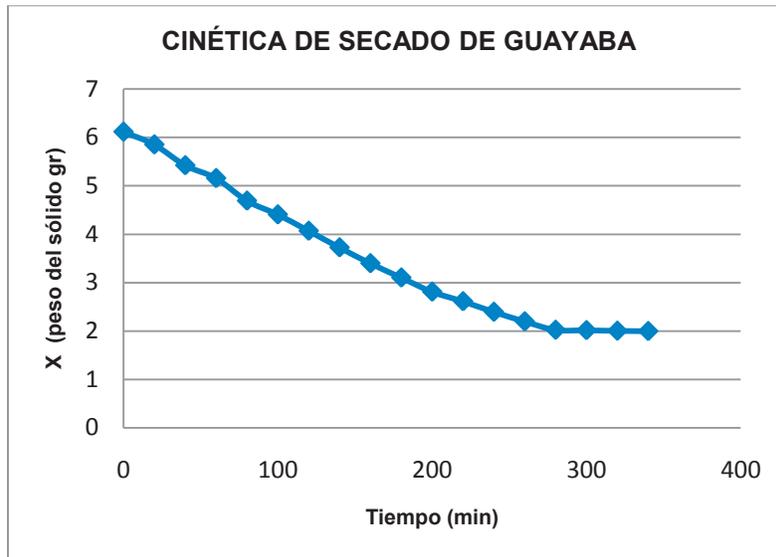


Figura 20. Cinética de Secado de guayaba a espesor de rebanada de 3 mm.

Comparando los gráficos anteriores con la curva de secado típica (Fig. 3), se observan claramente las etapas de velocidad constante y velocidad decreciente. Se observa que el periodo de velocidad decreciente no es muy prolongado, esto es debido a que debe controlarse su duración para evitar daños al producto que pueden ir desde propiedades organolépticas desagradables, hasta la pérdida de nutrientes, principalmente vitamina C y A, debido a que estas vitaminas son muy sensibles a la

temperatura y el oxígeno. Reyes y Guzmán (2009) reportan pérdidas hasta de 53 % de vitamina A y 86% de vitamina C en el plátano deshidratado.

Se calculó la eficiencia de secado del deshidratador con el que se hicieron las pruebas (modelo previo). El cálculo se realizó para el plátano a un espesor de rebanada de 2 mm y para guayaba a un espesor de rebanada de 3 mm (Ver Anexo1):



7.3 Optimización de nuevo modelo

A continuación se procedió a realizar los cálculos correspondientes para determinar las dimensiones del deshidratador. Para dichos fines se utilizaron los espesores de rebanada óptimos mencionados anteriormente.

Primeramente se calculó la pérdida de calor por convección, a partir de la fórmula:

Donde:

- Q** = Calor transferido por convección (W)
- h_c** = Coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m²°C)
- A_s** = Área de superficie del sólido (m²)
- T_m** = Temperatura del medio (°C)
- T_s** = Temperatura de superficie (°C)

De acuerdo con Treybal (1991), el coeficiente de transferencia de calor por convección (h_c) está relacionado con el número de Reynolds y otras correlaciones adimensionales a partir de las cuales puede ser calculado. A partir de este se puede calcular Q por rebanada y por charola. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 14:

Tabla 14. Pérdida de calor por convección para plátano y guayaba.

Fruto	Re	G (Kg/m ² s)	h_c (W/m ² °C)	Q _{reb} (W)	Q _{charola} (W)
Plátano	21,557.63	-----	45.82	0.0863	3.89
Guayaba	21,557.63	4.914	43.56	0.2463	11.57

Nota: los cálculos se encuentran desarrollados en el Anexo 1

Los cálculos por charola se hicieron tomando en cuenta que de acuerdo a las pruebas experimentales una charola puede contener aproximadamente 45 rebanadas de plátano y 47 de guayaba.

Posteriormente, se obtuvo la transferencia de calor por conducción (Tabla 15) a partir de la Ecuación de Fourier de la conducción de calor (Cengel, 2003):

Donde:

- Q = Calor transferido por conducción (W)
- k= Conductividad térmica del material (W/m°C)
- A_s= Área transversal (m²)
- T₁= Temperatura de entrada (°C)
- T₂= Temperatura de salida (°C)
- L= Espesor de rebanada (m)

Tabla 15. Pérdida de calor por conducción para plátano y guayaba.

Fruto	ΔT (°C)	Q_{reb} (w)	$Q_{charola}$ (w)
Plátano	0.01	0.1530	6.89
Guayaba	0.01	0.1826	8.58

Nota: los cálculos se encuentran desarrollados en el Anexo 1

En base a los cálculos realizados anteriormente y a las mediciones experimentales con que se contaba, se pudo determinar que la diferencia de temperatura entre la primera y la última charola del deshidratador puede ser de **5°C** de tal forma que no se altere significativamente la transferencia de calor (ver Anexo 1).

Tomando en cuenta lo anterior y que la disminución de temperatura del aire por cada charola fue de 0.34 y 0.38 °C para el plátano y la guayaba, respectivamente, se logró calcular el número de charolas que puede existir en el deshidratador:

$$\frac{5}{0.34} = 14.7$$

$$\frac{5}{0.38} = 13.2$$

Por razones de optimización se elige el resultado con menor número de charolas, es decir, el deshidratador tendrá 14 charolas.

Los cálculos anteriores fueron realizados en base al deshidratador con el que se estuvo trabajando el cual contenía 20 charolas con una separación de 5.5 cm entre una y otra y un área de 0.18 m² (largo= 45 cm y ancho= 40 cm). Una vez que se logró la optimización en el número de charolas se procedió a calcular que tanto puede aumentar el área de las charolas sin afectar significativamente la velocidad de secado (Tabla 11). La relación se da de acuerdo con Geankoplis (2006), en la ecuación:

Donde:

—

V= Velocidad total de secado de superficie de evaporación (m/s)

A= Área de la charola (superficie de evaporación) (m²)

R_c= Velocidad de secado (m/s)

λ_w= Calor latente a la temperatura T_w (J/kg)

T= Temperatura del gas (°C)

Para realizar el cálculo se fue aumentando 3 cm el largo y el ancho a partir del área con la que se trabajó, se calculó el área nuevamente y la velocidad (Ver Anexo 1). Después se compararon los valores de velocidad a través del Coeficiente de Variación (CV < 10%).

Tabla 16. Cálculo del área de las charolas.

Largo (m)	Ancho (m)	A (m ²)	V (m/s)	CV (%)
0.45	0.4	0.18	0.1240	0
0.48	0.43	0.2064	0.1422	9.66
0.51	0.46	0.2346	0.1616	13.18
0.54	0.49	0.2646	0.1822	16.42

*El CV se obtuvo utilizando el programa JMP 6.

*Los cálculos se desarrollaron utilizando el programa Excel.

De acuerdo a los resultados anteriores (Tabla 16) se observa que el área óptima es de 0.2064 m² con un largo de 48 cm y un ancho de 43 cm.

Sin embargo, el área de las charolas del nuevo deshidratador aumentó con respecto al área de las charolas donde se realizaron las pruebas, por lo tanto, caben más piezas en cada charola y fue necesario calcular nuevamente el número de charolas. Primeramente, el número de piezas por charolas aumentó:

PLÁTANO		
45 REBANADAS	→	53 REBANADAS APROX.
GUAYABA		
47 REBANADAS	→	54 REBANADAS APROX.

El aumento de piezas por charola, conlleva a una mayor disminución de temperatura del aire de la calculada anteriormente, por lo que se realizó nuevamente el cálculo del gradiente de temperatura máxima permitido entre la primera y última charola, así como el número de charolas. El procedimiento realizado fue el mismo que se siguió anteriormente.

Se encontró que el gradiente nuevamente es de 5°C (Ver Anexo 1). Así, se calculó entonces el número de charolas:

—
—

Por lo tanto, **el número definitivo de charolas es de 13**, cuando la temperatura promedio de deshidratación es de 55°C.

Se procedió a calcular la separación entre las charolas. Esta separación representa el volumen del aire que fluye sobre las charolas. De acuerdo a la relación (Felder y Rousseau, 2004):

—

Donde:

ρ = densidad (kg/m³)

m = masa (kg)

v = volúmen (m³)

Esta relación nos indica que la densidad del aire cambia en función del volumen. Si cambia la densidad también cambia el valor de G requerido para calcular h_c y esto a su vez hace que cambien el valor de $Q_{convecc}$. Por lo tanto, los cálculos se hicieron partiendo de un volumen de 0.01186 m^3 (resultante de una separación de 5.5 cm entre cada charola). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 17:

Tabla 17. Cálculo de la separación entre las charolas.

Separación (cm)	ρ (Kg/m ³)	G (Kg/m ² s)	h (W/m ² °C)	Q_{reb} (W)	$Q_{charola}$ (W)	CV (%)
5.5	1.092	4.914	43.558	0.32842	15.4358	0
5	1.09184	4.91327	43.554	0.32839	15.4342	0.11
4.5	1.09156	4.91204	43.546	0.32833	15.4314	0.12

*Los cálculos fueron realizados utilizando el programa Excel

Observando los resultados anteriores se puede observar que la variación es casi insignificante, sin embargo, se decidió solo reducir la separación 0.5 cm, es decir, con una separación de 5 cm entre cada charola, debido a que es importante que exista una separación adecuada para que exista una distribución del aire adecuada entre cada charola y así evitar variaciones de temperatura.

Todos los cálculos anteriores, se realizaron tomando en cuenta una temperatura promedio de 55°C . Se calculó cuantas charolas podrían aumentarse al deshidratador solar cuando la temperatura promedio del aire aumente 5 y 10°C , es decir, durante los meses donde se registra una mayor temperatura ambiente y mayor incidencia de la radiación solar.

Para realizarlo, se obtuvo el tiempo total de secado a una temperatura de 55°C . El tiempo de secado por área de superficie de secado se puede obtener de acuerdo con Geankoplis (2006) por medio de la siguiente ecuación:

—

Donde:

t = Tiempo de secado (hr)
L_s = Peso del sólido seco (kg)
A = Área de la superficie de secado (m²)
R_c = Velocidad de secado (m/s)
X₁ = Contenido de humedad inicial (kg H₂O/kg sólido seco)
X₂ = Contenido de humedad final (kg H₂O/kg sólido seco)

Después, se calculó cuantas charolas podrían aumentarse para una temperatura de 60 y 65°C sin que se supere el tiempo de secado obtenido a los 55°C (Tabla 18):

Tabla 18. Aumento del número de charolas con el aumento de la temperatura del aire.

T (°C)	No. Charolas	t secado por charola (hr)	t total secado (hr)
55	13	0.6410	8.33
60	14	0.5926	8.30
65	16	0.5054	8.09

*Ver cálculos desarrollados en el Anexo 1.

De acuerdo a los resultados anteriores, el deshidratador tendrá 16 charolas, sin embargo, se trabajará normalmente con 13, únicamente se aumentará el número de charolas cuando aumente la temperatura promedio del aire de acuerdo a lo referido en la Tabla 18.

Finalmente se determinó la pérdida de calor a través de las paredes del deshidratador con 4 modelos diferentes (Tabla 19), buscando el que reduce al máximo las pérdidas. Todos los modelos contienen doble lámina de policarbonato. Se eligió el policarbonato ya que de acuerdo a Keyser (1992), presenta grandes ventajas como son: alta resistencia, buena estabilidad dimensional, ductilidad y tenacidad, excelente aislamiento, transparencia, está aprobado para estar en contacto con alimentos y tiene baja absorción de agua. Además, su costo no es muy elevado.

Tabla 19. Evaluación de pérdida de calor en las paredes del deshidratador a través de distintos modelos.

Modelo	Q* (w)
1. Policarbonato - Aire - Policarbonato	17.13
2. Policarbonato – Fibra de vidrio - Policarbonato	22.66
3. Policarbonato - Caucho - Policarbonato	20.55
4. Policarbonato - Poliuretano - Policarbonato	15.97

*Pérdida de calor.

En los resultados se observa que los modelos 1 y 4 resultaron los más adecuados debido a que reducen en un mayor grado la pérdida de calor. Sin embargo, se realizó una comparación de costos y el modelo 1 resulto más viable económicamente, por lo que se para realizar la construcción definitiva del prototipo.

Una vez elegido el modelo definitivo, se evaluaron 2 espesores diferentes para la capa de aire que separa las dos capas de policarbonato (Tabla 20), para evaluar a que espesor se favorece el efecto aislante del modelo:

Tabla 20. Evaluación de efecto aislante del aire a espesores de capa distintos.

Espesor de capa de aire (m)	Q* (w)
0.02	19.26
0.025	15.83

*Ver cálculos desarrollados en Anexo 1.

De acuerdo con Cengel (2003) y a lo reportado en los resultados anteriores, el efecto aislante es proporcional al espesor, por lo tanto, se eligió un espesor de 0.025m.

Se llevó el cálculo para corroborar que no exista condensación dentro de la cabina. Para realizar los cálculos se partió de una humedad relativa del aire de 55% y una temperatura de 50 °C. Se eligió un valor alto de humedad y bajo de temperatura por razones de optimización y considerando las estaciones del año de mayor humedad y de menor temperatura.

La humedad absoluta de acuerdo con Geankoplis, 2006 se obtiene mediante la ecuación:

Donde:

H_a = Humedad absoluta (kg/kg aire seco)

P_v = Presión de vapor (KPa)

T = Temperatura (K)

Tabla 21. Cálculo del volumen húmedo del aire al fluir sobre cada charola en la cabina de secado.

# charola	T (°C)	T (K)	P_v (Kpa)	H_{absoluta} (kg/kg aire seco)	V^* (m ³ /kg aire seco)
1	50.00	323.15	15.665	0.0404	0.9154
2	49.64	322.79	15.665	0.0394	0.9140
3	49.28	322.43	11.679	0.0388	0.9133
4	48.92	322.07	11.679	0.0383	0.9125
5	48.56	321.71	11.679	0.0373	0.9111
6	48.20	321.35	11.106	0.0368	0.9104
7	47.84	320.99	11.106	0.0363	0.9090
8	47.48	320.63	10.561	0.0354	0.9083
9	47.12	320.27	10.561	0.0344	0.9069
10	46.76	319.91	10.561	0.0340	0.9062
11	46.40	319.55	10.037	0.0335	0.9055
12	46.04	319.19	10.037	0.0326	0.9040
13	45.68	318.83	10.037	0.0316	0.9026
14	45.32	318.47	9.537	0.0311	0.9019
15	44.96	318.11	9.537	0.0306	0.9012
16	44.60	317.75	9.537	0.0300	0.8998

*Los cálculos desarrollados se hicieron utilizando el programa Excel.
 **Volumen específico. Fuente: <http://www.devatec.com/humidificacion/pdf>

En base a los resultados anteriores (Tabla 21) y haciendo uso del diagrama psicométrico de vapor de agua (Fuente: Felder y Rousseau, 2008), obtenemos:

$T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $H = 0.030\text{ kg/kg aire seco}$

$H_R = 83\%$

Con lo anterior se demuestra, que aún deshidratando a carga máxima, con temperaturas relativamente bajas y humedades altas, no existiría condensación dentro de la cabina, ya que el aire aún no estaría saturado.

7.4 Modelado y diseño del equipo

Se simularon todas las condiciones de la cabina de secado utilizando el programa ANSYS para conocer la distribución de temperaturas dentro del equipo (Fig.21).

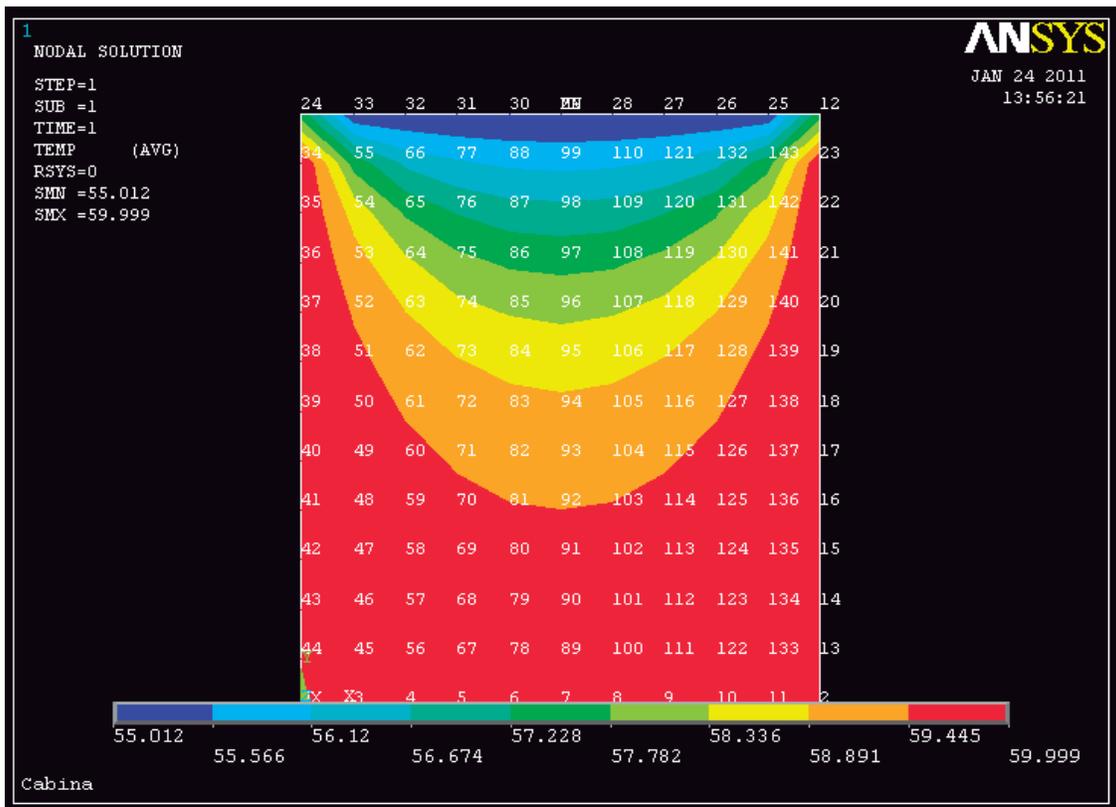


Figura 21. Distribución de temperaturas de la cabina de secado del nuevo modelo.

En la Figura 21 se observa como la temperatura tiende a disminuir hacia arriba y al centro de la cabina de secado. La disminución de la temperatura hacia la zona central es debido a que las paredes de la cabina se encuentran aisladas y hacia arriba ya que a medida que el aire recorre la cabina y fluye sobre cada charola disminuye su temperatura. Sin embargo, si se comparan los valores de temperatura entre la zona de más calor $T= 59.9^{\circ}\text{C}$ y la de menos calor $T= 55.0^{\circ}\text{C}$ se puede concluir que el sistema es estadísticamente adiabático, ya que el gradiente existente no supera los 5°C .

El gráfico tiene asociado a las diferentes zonas de la cabina un número que corresponde a cada uno de los nodos creados para resolver el sistema. El software asocia un valor de temperatura a cada nodo (Ver Anexo 2).

Una vez que se obtuvieron las dimensiones definitivas del deshidratador solar, se modeló en 3D utilizando el software AUTOCAD 2009 (Fig.22). Las vistas ortogonales del deshidratador también fueron elaboradas (Ver Anexo 3).



Figura 22. Diseño del deshidratador solar en 3D.

La construcción del deshidratador solar se llevó a cabo de acuerdo a todos los parámetros establecidos en el presente documento y presenta las siguientes características (Fig. 23 y 24):



Figura 23. Vista frontal de nuevo modelo del deshidratador solar.



Figura 24. Deshidratador solar, nuevo modelo.

El colector solar tiene una inclinación de 20° , esto ya que de acuerdo con Sarmiento, 2006, la mayor captación de la radiación solar en los colectores se da cuando éstos se orientan a un ángulo cercano al de la latitud del lugar donde se encuentran, por lo tanto, y tomando en cuenta que la latitud de Morelia es de $19^\circ 42' 10''$ se eligió el ángulo mencionado.

7.5 Evaluación del nuevo modelo

Se llevó a cabo una prueba comparativa entre los dos modelos (Fig. 25), donde se deshidrató 1 kg de plátano en cada uno de los equipos, bajo las mismas condiciones.



Figura 25. Prueba comparativa de deshidratación de plátano utilizando ambos modelos.

Durante la prueba se monitoreó la temperatura al interior de la cámara en cada deshidratador (Tabla 22) con el objetivo de conocer la diferencia de temperatura existente entre ambos modelos. Al final de la prueba se determinó la eficiencia de secado:

Tabla 22. Monitoreo de la temperatura interna de la cámara en ambos modelos.

T (min)	T _{amb} (°C)	Modelo base T _{int} (°C)	Nuevo modelo T _{int} (°C)	ΔT (°C)	Radiación (W/m ²)	H _{aire} (%)
20	14.6	47.5	49.1	1.6	582	42
40	17.1	51.5	53.1	1.6	628	36
60	18.2	53.2	54.7	1.5	666	30
80	19.3	56.3	57.7	1.4	686	29
100	20.2	56.6	58.7	2.1	686	24
120	20.5	57.4	63.3	5.9	714	24
140	21.6	57.6	65.3	7.7	722	20
160	21.8	52.8	64	11.2	719	19
180	22.1	55.9	64.8	8.9	710	17
200	22.8	52.1	64.8	12.7	689	17
220	22.9	51.9	64.3	12.4	661	16
240	23.2	52.9	62.5	9.1	633	15
260	23.4	53.3	62.3	9.6	596	15
280	24.2	53.1	---	---	545	15
300	23.9	51.8	---	---	492	14
320	23.7	51.3	---	---	455	13
340	23.9	50.9	---	---	396	12
360	22.7	50.1	---	---	377	12

En base a los resultados de la tabla anterior, se puede observar que durante toda la prueba se obtuvieron temperaturas más elevadas en el nuevo modelo, alcanzándose incluso gradientes de 12 °C, lo que se vio reflejado finalmente en las eficiencias de secado, que se obtuvieron al finalizar la prueba (Ver cálculo Anexo 1):

De acuerdo a los resultados anteriores se calculó que el nuevo modelo y para el plátano, mejora la eficiencia en un 43.75%, lo que demuestra la optimización del nuevo modelo.

En cuanto a las características organolépticas de los productos finales, el plátano deshidratado en el modelo previo presentó un color más oscuro que el deshidratado en el nuevo modelo (Fig.26 y 27):

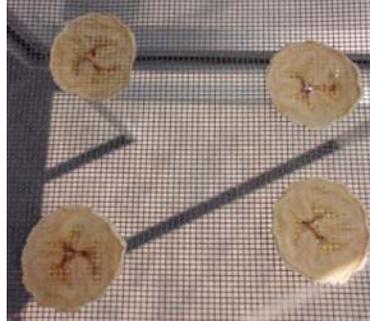


Figura 26. Plátano deshidratado en nuevo modelo.



Figura 27. Plátano deshidratado en modelo previo.

Existen enzimas como la fenoloxidasas, tirosinas, catecolasa, polifenoloxidasas, polifenolasa y fenolasa que provocan el oscurecimiento y el pardeamiento de ciertos alimentos de origen vegetal que han sufrido cambios físicos y que exponen su tejido al aire. La intensidad del oscurecimiento está en función de la actividad de la enzima y para eliminar su acción se debe evitar el contacto con el aire o aplicar temperaturas superiores a los 50°C para inactivar a la enzima (Ramírez, 2006). La razón por la que se oscureció más el producto en el modelo previo es debido a que el modelo nuevo alcanza temperaturas más elevadas más rápidamente, lo que inactiva a la enzima antes y se detiene así el pardeamiento enzimático.

Se realizó el perfil de temperatura experimental dentro de la cabina de secado del nuevo deshidratador con la finalidad de corroborar que ésta es realmente adiabática. En la prueba se deshidrataron 3 kg de plátano con espesor de rebanada de 2 mm y se monitoreo la temperatura del aire a la entrada y salida del colector solar (Tabla 23), en la primera charola, la última y en la charola 6 que representa el centro (Tabla 24):

Tabla 23. Monitoreo de la temperatura de colector solar en nuevo modelo.

t (min)	T_{ent-col} (°C)	T_{sal-col} (°C)	ΔT (°C)	Radiación (W/m²)
0	25.0	36.0	11.0	381
20	28.5	45.1	16.6	431
40	31.3	51.3	20.0	478
60	32.6	54.8	22.2	527
80	34.8	57.2	22.4	570
100	35.6	58.8	23.2	597
120	37.1	54.9	17.8	611
140	38.2	55.6	17.4	628
160	38.7	57.3	18.6	647
180	39.1	59.9	20.8	652
200	40.2	60.8	20.6	674
220	42.7	56.4	13.7	649
			*μ = 18.7°C	

*Gradiente de temperatura promedio en el colector solar durante la jornada.

El aumento promedio de la temperatura del aire al fluir sobre el colector solar es mayor con relación al del modelo previo (18.7°C > 14.7°C). Y de acuerdo con Piacentini y Cortes (1989) puede ser considerado como un colector solar de alta eficiencia.

Tabla 24. Monitoreo de la temperatura interna de la cámara en nuevo modelo.

t (min)	T _{charola 1} (°C)	T _{charola 6} (°C)	T _{charola 13} (°C)	Radiación (W/m ²)	ΔT (°C)
0	38.0	36.1	36.4	381	1.6
20	44.7	41.8	43.1	431	1.6
40	47.9	45.7	46.4	478	1.5
60	51.3	48.2	49.1	527	2.2
80	54.2	52.0	52.3	570	1.9
100	55.7	52.5	53.9	597	1.8
120	57.2	54.2	55.2	611	2.0
140	58.7	57.4	56.6	628	2.1
160	60.3	57.5	58.5	647	1.8
180	62.0	59.6	60.6	652	1.4
200	63.0	60.1	61.9	674	1.1
220	62.0	60.0	61.1	649	0.9
					*μ = 1.6

*Gradiente de temperatura promedio al interior de la cabina de secado durante la jornada.

En la figura 28 se muestra graficado el gradiente de temperatura existente entre la primera y la última charola del nuevo modelo. Se observa que puede considerarse a la cabina como estadísticamente adiabática, ya que el gradiente de temperatura nunca supera los 5 °C lo cual de acuerdo a los cálculos realizados anteriormente, representa que la temperatura no es significativamente distinta.

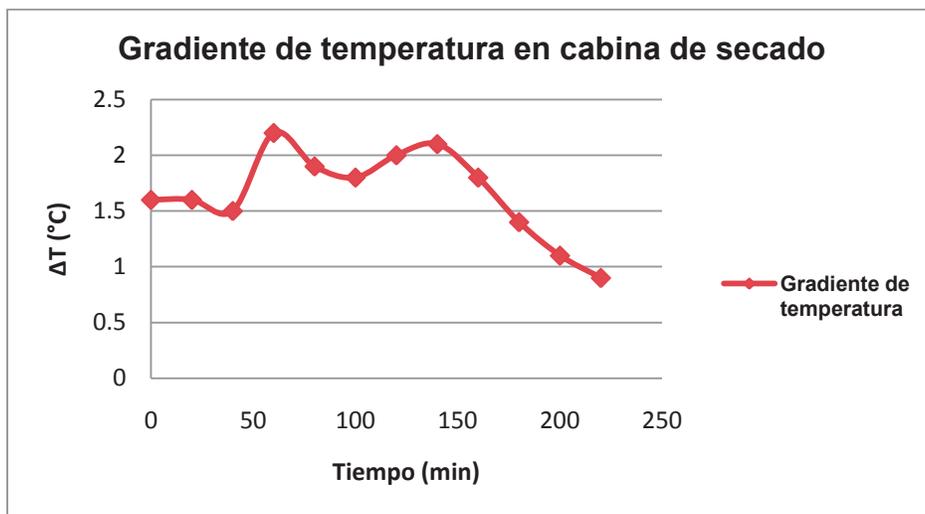


Figura 28. Monitoreo del gradiente de temperatura entre la primera y la última charola en la cabina de secado del nuevo modelo.

Una vez que se comprobó que el sistema es adiabático, se procedió a realizar las cinéticas de secado de las rebanadas de plátano y guayaba. Los espesores de rebanada con los que se trabajó fueron 2 mm para el plátano y 3 mm para la guayaba. Estos espesores se eligieron ya que se demostró anteriormente que son los óptimos en función de la velocidad de secado.

Las figuras 29 y 30 muestran comparativamente las cinéticas realizadas en el modelo previo y en el nuevo deshidratador. Para la cinética de plátano se observa que el producto se deshidrató más rápidamente en el modelo previo, con una diferencia de 40 min, sin embargo, esto puede explicarse si se toma en cuenta que la cinética en el modelo previo se realizó en el mes de abril con una radiación promedio en la jornada de 860 W/m^2 con relación a la realizada en el nuevo modelo que se realizó en el mes de diciembre con una radiación promedio en la jornada de 551 W/m^2 .

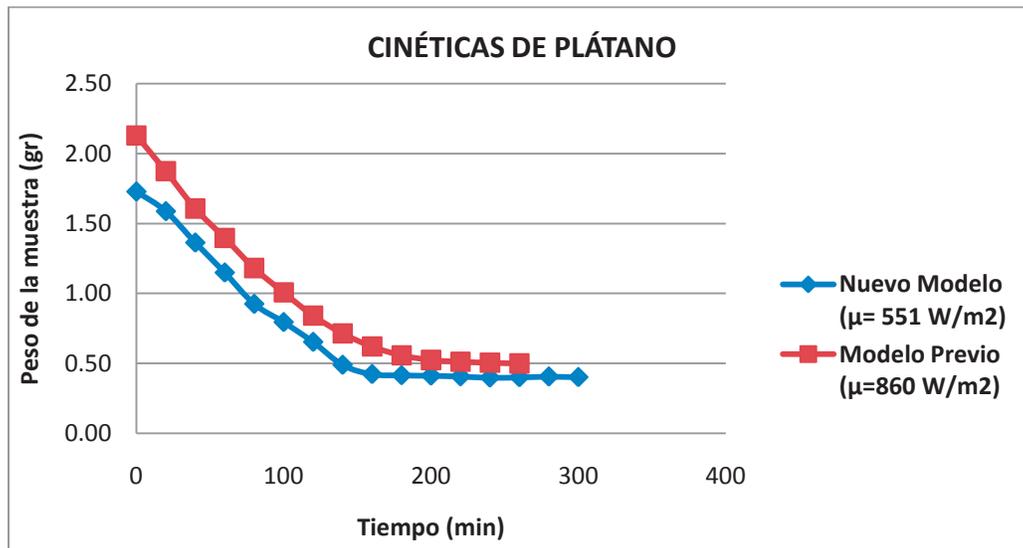


Figura 29. Cinéticas de plátano en ambos modelos.

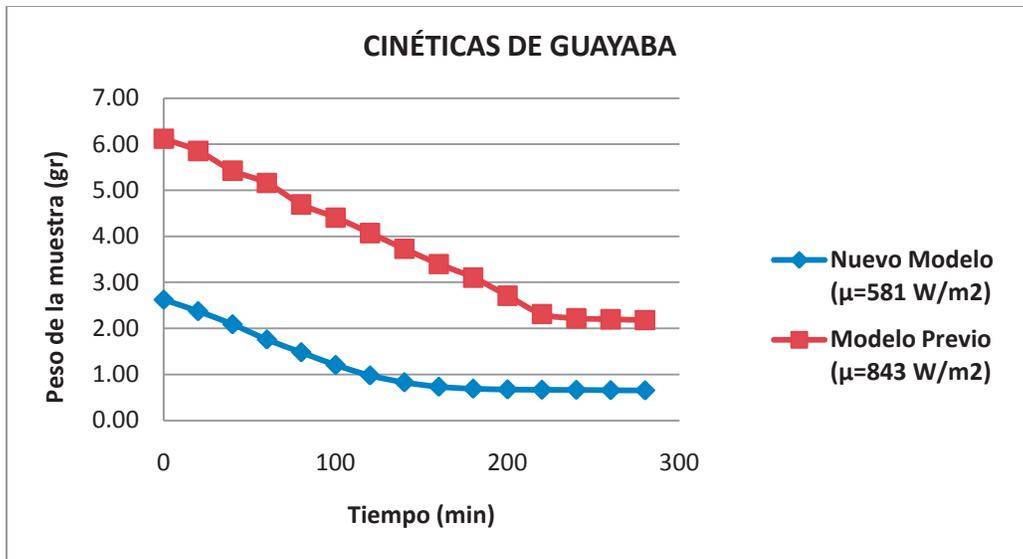


Figura 30. Cinéticas de guayaba en ambos modelos.

En las cinéticas de guayaba, se observaron tiempos de secado iguales, sin embargo, nuevamente debe tomarse en cuenta que las jornadas de secado se llevaron a cabo en épocas distintas del año (invierno en el nuevo modelo y primavera en el modelo previo) y que la radiación promedio fue mayor en un 45% en el modelo previo.

Otra característica importante, es que en las cinéticas realizadas en el nuevo modelo se alcanza más rápidamente la etapa de velocidad decreciente, lo cual indica, de acuerdo con Geankoplis (2006), que aún a menor temperatura del aire el agua de la superficie de los frutos se evapora más rápidamente. La superficie de las rebanadas de plátano contiene aproximadamente del 30 al 40% de la humedad total del producto (Phoungchandang y Woods, 2000)

Se llevo a cabo una prueba de secado donde se colocaron 6 kg de plátano con lo que se llenaron de producto las 13 charolas del deshidratador (Tabla 25). El plátano se trabajó en rebanadas de 2 mm de diámetro. Durante el secado se monitoreó la temperatura en la primera y última charola así como la humedad relativa del ambiente y al interior de la cabina en la charola 13.

Tabla 25. Monitoreo de gradiente de temperatura y humedad dentro de la cabina de secado a capacidad máxima.

t (min)	T _{ambiente} (°C)	T _{charola 1} (°C)	T _{charola 13} (°C)	H _{R ambiente} (%)	H _{R cámara} (%)	Radiación (W/m ²)	ΔT (°C)
0	16.9	49.9	46.2	41	37	381	3.70
20	17.5	52.4	48.3	41	37	462	4.10
40	18.4	53.6	49.2	39	36	483	4.40
60	20.2	55.7	51.6	37	35	511	4.10
80	21.1	56.8	52.1	37	35	569	4.70
100	21.8	58.2	54.6	35	32	598	3.60
120	22.5	59.4	54.9	33	32	611	4.50
140	22.8	61.3	56.5	33	31	624	4.80
160	23.4	61.9	58.4	32	29	646	3.50
180	22.6	59.5	55.6	31	29	652	3.90
200	23.1	60.3	56.8	31	27	683	3.50
220	23.6	61.4	57.7	30	27	677	3.70
240	24.2	60.8	57.9	30	25	655	3.10
260	24.2	60.1	57.2	29	25	653	2.90
280	24.0	59.6	57.2	29	24	665	2.40
							*μ = 3.8

*Gradiente de temperatura promedio al interior de la cabina de secado durante la jornada.

Se puede observar en la tabla 9 que cuando el deshidratador se utiliza a su máxima capacidad la media del gradiente de temperatura dentro de la cabina de secado aumenta más de 2°C en relación con los resultados de la tabla 8, sin embargo, no supera los 5 °C, con lo cual puede considerarse al sistema como adiabático aún trabajando con cargas máximas de producto, ya que la temperatura no varía significativamente (es decir, no supera los 5°C). Por otro lado, también se observa que de acuerdo al valor de la humedad relativa dentro de la cámara no existe condensación (HR< 100%).

En la figura 31 se muestra graficado el gradiente de temperatura existente entre la primera y la última charola con carga máxima de producto. Se puede observar que durante las primeras mediciones el gradiente se mantiene entre los 4 y 5 °C, después disminuye y se mantiene entre los 3 y 4 °C hasta los 2 °C.

Esta disminución se debe a que cuando el secado pasa a la etapa de velocidad decreciente, la cantidad de agua liberada por cada pieza disminuye, ya que el agua de la superficie se termina y la humedad debe comenzar a migrar desde el centro de la pieza (Geankoplis, 2006), con lo que se reduce a su vez la disminución en la temperatura del aire y con esto el gradiente existente a lo largo de la cabina se hace más pequeño.

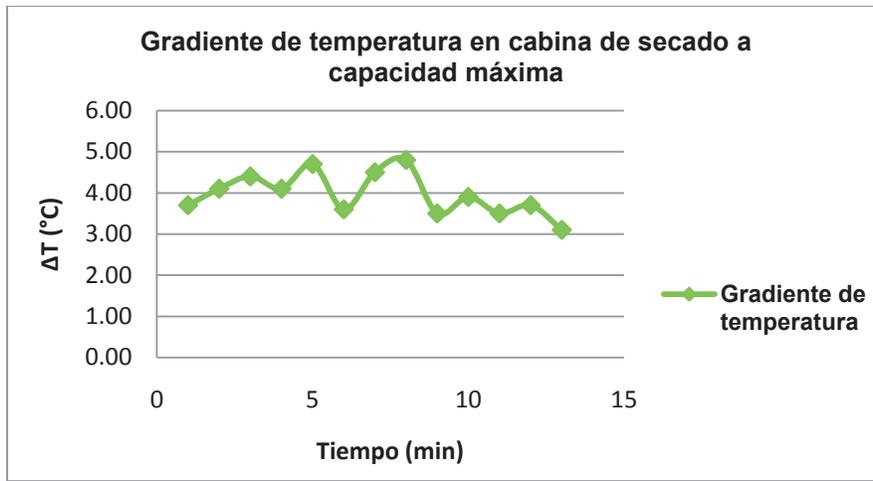


Figura 31. Monitoreo del gradiente de temperatura en la cabina de secado del nuevo modelo cuando tiene capacidad máxima de producto.

Se determinó la eficiencia del secado de la prueba (Ver Anexo 1):

Comparando este resultado, con la eficiencia si se deshidrata 1 Kg (0.23 Kg/hr) se encuentra que la eficiencia se reduce en un 8.7% lo cual, en términos de velocidad de secado representa 20 min mas al tiempo total se secado.

Se evaluó la diferencia estadística entre las dos eficiencias de secado (deshidratación de 1 kg y 6kg de plátano) a través del Coeficiente de variación y se obtuvo un CV=6.43%, por lo tanto y de acuerdo con Narvaiza (2005), las eficiencias no son significativamente distintas, por lo tanto se puede afirmar que la velocidad de secado no se altera significativamente cuando se trabaja con capacidades mínimas o máximas de producto.

7.6 Evaluación del deshidratador con otros productos

Se llevaron a cabo pruebas de deshidratación con mango y nopal para corroborar que el deshidratador solar funcionaba correctamente y de acuerdo a lo predicho con productos diferentes a plátano y guayaba y que aún con otros frutos podría considerarse al equipo como de alta eficiencia. En la tabla 26 se presentan los tiempos de secado reportados:

Tabla 26. Tiempos y eficiencias de secado de nopal y mango.

Producto	Tiempo de secado (hr)	Eficiencia de secado
Nopal	5	0.20 kg/hr
Mango	7.5	0.13 kg/hr

Se observa en la tabla 26 que los tiempos de secado no son mayores a 10 hrs con lo que puede considerarse al equipo como de alta eficiencia para mango y nopal también.

Se elaboro la el gráfico de la cinética de secado del mango (Fig.32):

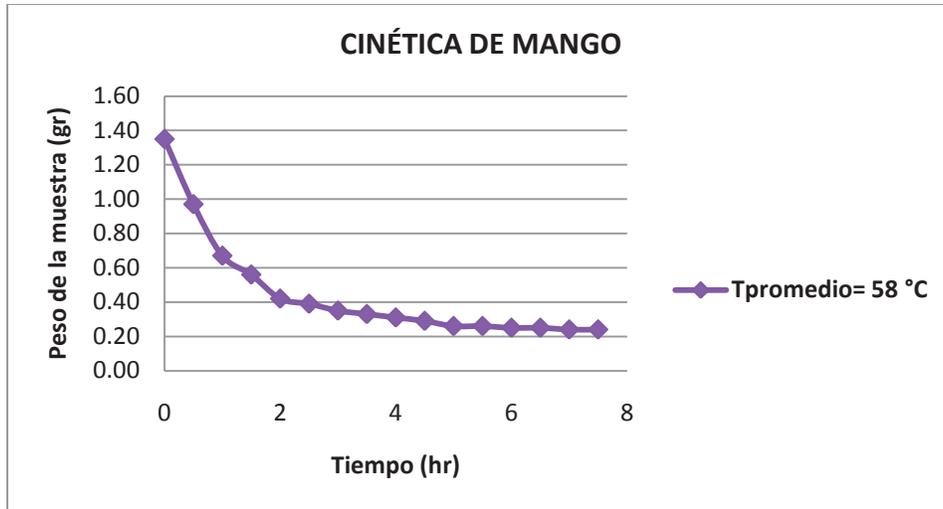


Figura 32. Cinética de secado de mango.

Comparativamente con otros deshidratadores solares de mango que se ofertan en el mercado, el modelo es competitivo ya que deshidrata el producto en tiempos similares o hasta menores (tabla 27):

Tabla 27. Deshidratadores solares de mango.

Fuente	Deshidratador solar	Tiempo de secado (hr)
www.icyt.df.gob.mx	Directo	9
www.bretconenergiasolar.com	Mixto	<10
www.sitiosolar.com	Mixto	8

*Tiempos considerando cargas menores a 9 kg.

7.7 Análisis Microbiológico, de color y textural del producto deshidratado

Se realizaron los análisis microbiológicos del plátano deshidratado (Fig. 33). Se observa en los resultados (Tabla 28) que en todos los casos el recuento es < 100 UFC y negativo para *Salmonella* y *Staphylococcus aureus*, lo cual y de acuerdo con la NOM-45092-SSA1-1994 sitúa al producto dentro de los límites permisibles.



Figura 33. Análisis microbiológico de plátano deshidratado en el nuevo modelo

Tabla 28. Análisis microbiológico de plátano deshidratado.

Análisis	Bacterias Mesofílicas aerobias (UFC*)	Coliformes totales en placa (UFC)	Coliformes totales en tubo	Hongos y levaduras (UFC)	<i>Salmonella</i>	<i>Staphylococcus aureus</i> (NMP/g)
1	13	0	N/C	0	Negativo	Negativo
2	8	18	N/C	11	Negativo	Negativo
3	21	3	N/C	0	Negativo	Negativo

*UFC= Unidades formadoras de colonias, N/C = No crecimiento, NMP= Número más probable/g.

El hecho de que en todas las determinaciones realizadas la cuenta de microorganismo salgan dentro de lo permitido por las Normas Oficiales Mexicanas, indica que el modelo no promueve la contaminación microbiológica, por lo cual los productos deshidratados en éste pueden ser considerados como inocuos. El resultado favorable de los análisis es consecuencia también del envasado al vacío que se le dio al producto una vez terminada la deshidratación.

Se evaluaron las diferencias en el color de los productos deshidratados con respecto al producto en fresco (Tabla 29):

Tabla 29. Comparación en el color del producto fresco y deshidratado.

Producto	Color en producto fresco			Color en producto deshidratado		
	L	a	b	L	a	b
Plátano	75.79 ± 1.46 a	2.32 ± 0.14 a	15.93 ± 0.57 a	63.44 ± 2.26 b	3.11 ± 0.36 a	14.17 ± 1.97 a
Guayaba	76.38 ± 1.23 a	4.59 ± 0.41 a	21.19 ± 0.52 a	61.56 ± 2.29 b	5.67 ± 0.50 a	23.75 ± 1.26 a

De acuerdo a lo reportado en la Tabla 29, se observa que el color únicamente presenta variaciones significativas en el parámetro “L”, lo cual es congruente con el obscurecimiento del producto deshidratado (L menos positivo). El color final de los productos es uno de los principales parámetros de aceptación por parte del consumidor. El tipo de secado, los tratamientos pre-secado y las condiciones del proceso son determinantes para obtener un color deseable en el producto final (Magdalini y col. 2001)

Se realizó el análisis textural de las rebanadas del producto deshidratado (Tabla 30) y se estableció la comparación con el producto fresco para evaluar las diferencias estadísticas a través de una prueba de comparación de medias:

Tabla 30. Comparación en la textura del producto fresco y deshidratado.

Producto	Textura en producto fresco (g)	Textura en producto deshidratado (g)
Plátano	60.55 ± 1.29 b	71.29 ± 1.96 a
Guayaba	91.16 ± 3.26 b	113.44 ± 3.55 a

En la Tabla 30 se observa como para ambos frutos deshidratados la textura si varía significativamente ($CV.>10\%$), esto se debe a que la textura de los alimentos se encuentra determinada principalmente por el contenido de agua, grasa y de algunas proteínas y carbohidratos estructurales (celulosa, almidones y diversas pectinas). Los cambios en la textura de los frutos se producen principalmente por la pérdida de agua (Ramírez, 2006).

Finalmente se calculó el error sistemático del equipo:

$$\mu_{\text{monitoreos}} = 4.28 \text{ hr}$$

$$X=\text{Tiempo}_{\text{teórico}} = 4.40 \text{ hr}$$

De acuerdo con Juran y col. (2009) $ES= 0.12$ es un error no significativo ($ES < 5$), este valor es exacto con un margen de ± 0.107 unidades, donde la variación es generada por la posición del producto dentro de la cabina de secado.

8 DISCUSIÓN

Relacionando todos los resultados anteriores y estableciendo las comparaciones pertinentes entre los cálculos realizados antes de la construcción del deshidratador y las pruebas realizadas con el nuevo modelo, se puede afirmar que se logró la optimización del modelo.

Esto se afirma debido a que se demostró que el sistema puede considerarse estadísticamente adiabático lo que permite tener lotes de secado uniformes, aunado a que al menos para los productos con los que se trabajó: plátano, guayaba, mango y nopal el deshidratador se puede considerar de alta eficiencia energética (en relación con www.bretconenergiasolar.com y www.sitiosolar.com), ya que se ha logrado su deshidratación en jornadas menores a 10 h.

Para el caso del mango, se comparó con otros deshidratadores de mango que se encuentran a la venta en el mercado y se demostró que es competitivo en tiempos de secado.

Se mejoraron las eficiencias de secado en relación con el modelo previo hasta en un 43.75% en deshidratación de plátano.

Se demostró a su vez que el modelo no favorece la contaminación microbiológica con lo que se obtienen productos inocuos.

Se encontró que el error sistemático del equipo no es significativo, por lo cual el equipo puede considerarse como confiable.

9 REFERENCIAS

- Abascal F. E. y Grande I. 2009. **Fundamentos y técnicas de investigación comercial**. 10^{ma} edición. ED. ESIC. Madrid, España. pp.241.
- Baltasar, G.A., Martínez, F.H., Vargas, M.J., Rosa María Cortéz, G.R.M., Nieto, P.J. **Análisis Experimental de la eficiencia y curvas de secado solar para el quelite cenizo (*Chenopodium album*)**. 1er. Congreso Nacional de Energías Alternativas. Realizado del 2 al 4 de julio de 2007. Querétaro, Qro, México. ISBN 978-970-36-0420-3.
- Cengel A.Y. 2003. **Transferencia de Calor**. Segunda edición. ED. McGraw-Hill, México.
- Cortéz, G. M., Vargas, M.J., Martínez, F.H., Baltazar A.G., Nieto, P.J. 2007. **Análisis experimental de la cinética, eficiencia y viabilidad del secado solar de mango (*Mangifera indica* L.) en el Estado de Michoacán**. 1er. Congreso Nacional de Energías Alternativas. Realizado del 2 al 4 de julio de 2007. Querétaro, Qro. México. ISBN 978-970-36-0420-3.
- Felder R. M. y Rousseau R.W. 2004. **Principios elementales de los procesos químicos**. 4^{ta}. Edición. ED. Addison Wesley, México.
- Fernández E. E. 2008. **Microbiología e Inocuidad de los Alimentos**. Segunda edición. Departamento de Investigación y Posgrado en Alimentos, Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Qro. México.
- Fito M.P. 2001. **Introducción al secado de alimentos por aire caliente**. Primera edición. ED. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Geankoplis, C.J. 2006. **Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias**, 4^{ta}. Edición, Ed. CECSA, México.
- Jay, J.M. 2000. **Microbiología Moderna de los Alimentos**. Editorial Acribia. España. 159-343 pp.
- Juárez H. E., 2006. **Uso de la energía solar en deshidratación de frutas y verduras**. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Puebla.

- Juran J.M., Gryna F.M. y Bingham R.S. 2009. **Manual de control de calidad**. Segunda edición. ED. Reverté.
- Keyser, A.C., 1992. **Ciencia de Materiales para Ingeniería**. 3ra. Edición. ED. Limusa. México.
- <http://www.bretconenergiasolar.com>
- <http://www.cedagro.col.gob.mx/platano2>
- <http://www.grupopm.com/downloads/trade/michparte4.pdf> (Ficha Técnica: Con Sabor a Michoacán/ La Guayaba). 2005.
- <http://www.icyt.df.gob.mx>
- <http://www.infoagro.com>
- <http://www.limonmexicano.gob.mx>
- <http://www.lillywolfensberger.com>
- <http://portal.veracruz.gob.mx>
- <http://www.sitiosolar.com>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Herramientas_de_diseño_asistido
- <http://es.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>
- López E. E. y Mercado S. E. 2007. **Cambios fisiológicos y de calidad en guayaba mínimamente procesada**. Universidad Autónoma de Querétaro. Facultad de Química.
- Lugones, L.B. y Linares, C.S. 1998. **Método Gráfico para el Diseño de Secadores Solares**. ISPJAE. Ciudad de La Habana, Cuba.
- Macazaga, A.R. 2008. Tesis “**Evaluación de las propiedades nutricionales y fisicoquímicas del hongo *Pleurotus ostreatus* deshidratado usando diferentes métodos y condiciones de secado**”. U.M.N.S.H. Facultad de Biología. Morelia, Michoacán.
- Magdalini K.K., Zacharias B. y Saravacos G.D. 2001. **The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products**. International Journal of Food Science and Technology. Vol.36. 53-59.
- Marban R. M. y Pellecer C J.A. 2002. **Metrología para no-metrólogos**. Segunda edición. Organización de los estados americanos.

- Marín R.V.M. 2008. Tesis “**Evaluación de las propiedades sensoriales, texturales y de control de calidad sanitaria en plátano (*Musa Paradisiaca*) deshidratado por un proceso de secado solar**”. Escuela de Quimicofarmacobiología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Meza J.J., et al., 2009. **Low-cost solar thermodynamic drying system for the dehydration of roselle (*Hibiscus sabdarifa L.*)**. Instituto Tecnológico de Colima.
- Mott R.L. 2000. **Mecánica de fluidos aplicada**. 4ta edición. ED. Prentice Hall. México.
- Narvaiza, J. L. y otros. 2005. **Estadística descriptiva y Probabilidad**. 4ta edición. ED. DESCLEE DE BROUWER.
- Osorio, C., Franco, M.S. y col. 2007. **Colour and flavour changes during osmotic dehydration of fruits**. Innovative Food Science and Emerging Technologies 8(3), 353-359.
- Piacentini y Cortes, A. 1989. **Colectores solares a flujo de aire empleados en el secado de productos agrícolas**. Seminario sobre SECAGEM de productos agrícolas con energía solar. pp. 87-132.
- Phoungchandang S. y Woods J.L. 2000. **Solar drying of bananas: Mathematical model, laboratory simulation and field data compared**. Food Engineering and Physical Properties. Vol. 65, No. 6.
- Plaza M.J. y Cornejo, Z.F., 2006. **Implementación de un equipo de secado para alimentos**. Maestría en Ciencia en Alimentos. Escuela Superior Politécnica de Litoral.
- Ramírez E.N., et al., 2007. Memorias: **Secado en lote de plátano macho verde (*Musa paradisiaca L.*) a tres temperaturas**. IX Congreso de Ciencia de los Alimentos y V Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos. 22 de diciembre de 2008, Guanajuato, Gto.
- Ramírez N.J.S. 2006. **Fundamentos de reología de alimentos**. Ingeniería de Alimentos. Colombia.
- Rangel, M.V.M., Martínez-Flores, H.E., Vargas, M.J., Yahuaca, J.B. **Evaluación de propiedades sensoriales y de control de calidad sanitaria en plátano (*Musa paradisiaca*) deshidratado por un proceso de secado solar**. 4to. Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología. 30-31 de octubre del 2008, Morelia, Mich.

- Reyes de C., Guzmán R. y Camargo C. 2009. **Deshidratación de banano y cambios químicos ocurridos durante el proceso.** Revista Colombiana de Química. Universidad Nacional de Colombia.
- Saltveit M.E. 1999. **Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables.** Department of vegetable Crops, University of California. USA. Postharvest Biology and technology, vol. 15. pp. 279-292.
- Sañudo B. J. A. y Siller C. J. 2008. **Solubilización y despolimerización de pectinas durante el ablandamiento de frutos de papaya.** Revista Fitotecnia Mexicana, año/vol. 31, numero 002. Chapingo, México. pp. 149-155.
- Sarmiento, S.A., Pelierl, M.C., 2006. **Influencia de la orientación de los colectores solares en la captación de energía.** Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Ciudad de La Habana, Cuba.
- Sturz, A.V., Christie B.R. and Nowark J. 2000. **Bacterial endophytes: potential role in developing sustainable systems of crop production.** Crit. Rev. Plant Sci. 19: 1-30.
- Thipayarat, A. 2007. **Quality and physiochemical properties of banana paste under vacuum dehydration.** International Journal of Food Engineering, 3(4):1-10.
- Treybal, R.E. 1991. **Operaciones de transferencia de masa.** 3ra. Edición, ED. McGraw-Hill, México.
- Vlachos N.A., et al., 2002. **Design and testing of a new solar tray dryer.** Department of Food Technology of Technological Educational Institution of Thessaloniki.

10 GLOSARIO

Calor latente de vaporización (λ_w). Es el calor absorbido por un líquido para pasar a la fase gaseosa sin variar su temperatura.

Cinética de Secado. Es el gráfico donde se relaciona la pérdida de humedad con respecto al tiempo. Permite observar el comportamiento de los sólidos durante el secado.

Conductividad térmica (κ). Velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. Es una medida de la capacidad del material para conducir calor.

Transferencia de calor por conducción. Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre estas partículas.

Transferencia de calor por convección. Es la transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos.

Gradiente de temperatura. Es la diferencia que existe en el valor de la temperatura entre dos medios o sistemas distintos.

Humedad absoluta. Es el número de gramos de vapor de agua contenido en un metro cúbico de aire a una temperatura y presión determinadas.

Humedad relativa. Es la relación entre la cantidad de vapor de agua que contiene un metro cúbico de aire a determinadas condiciones de temperatura y presión y la que tendría si estuviera saturado a la misma temperatura y presión.

Inocuo. Inofensivo, que no causa daño. Un alimento inocuo es aquél que tenga garantía de que no causará alteraciones a la salud del consumidor.

Método de Elementos Finitos. Es una técnica numérica en donde el dominio (sólido en cuestión) se divide en un número finito de formas simples denominadas elementos. Las propiedades y relaciones gobernantes del fenómeno estudiado se asumen sobre estos elementos y se expresan matemáticamente en términos de valores desconocidos en puntos específicos de los elementos denominados nodos.

Presión de vapor (P_v). Es la presión de la fase gaseosa de un sólido o un líquido sobre la fase líquida, para una temperatura determinada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentra en equilibrio dinámico.

Sistema adiabático. Es aquél que no intercambia calor con su entorno ya que existen elementos que lo impiden.

Radiación. Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

Velocidad de transferencia de calor. Es la cantidad de calor transferido de un medio a otro, por unidad de tiempo.

11 ANEXOS

11.1 Anexo 1. Cálculos

Cálculo de la eficiencia de secado en deshidratador (modelo previo).

1 kg plátano

6 hrs y 15 min = 6.25 hr

Entonces:

1 kg guayaba

5 hrs 40 min = 5.67 hr

Entonces:

*Las pruebas se llevaron a cabo en el mes de Noviembre, en día de escasa nubosidad.

Transferencia de calor por convección.

Primeramente se determinó el número de Reynolds para así poder determinar las correlaciones que pueden ser utilizadas para los cálculos posteriores. De acuerdo con Geankoplis (2006), el N_{Re} para conductos no circulares se determina a partir de la ecuación:

Donde:

N_{Re} = número de Reynolds

μ = viscosidad del aire (Kg/ m- s)

ρ = densidad del aire (Kg/m³)

v = velocidad del aire (m/s)

R = _____ (m)

Para el aire las propiedades a 55°C:

$$\mu = 1.963 \text{ E}^{-5} \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho = 1.059 \text{ Kg/m}^3$$

$$v = 4.5 \text{ m/s (velocidad promedio monitoreada)}$$

$$R = \text{---} \text{ m}$$

*Datos obtenidos de Cengel (2003), Tabla A-15.

Entonces:

Como se cumple la condición de $2600 < Re < 22\ 000$, entonces se puede utilizar la siguiente relación para calcular G y h_c (Mott, 2000):

Donde:

h_c = coeficiente convectivo (W/m^2C)

G = velocidad de masa (Kg/m^2s)

d_e = Diámetro equivalente calculado (m) = 0.05 m para la guayaba

De esta forma se calculó para la guayaba:

Y así:

Para el caso del plátano no se realizó el cálculo de G ni de h_c ya que de acuerdo al trabajo de Plaza y Cornejo (2006) se tiene que $h_c = 45.82 \text{ w/m}^2\text{c}$ a una velocidad de 4.5 m/s y temperatura de 60°C.

Para realizar los cálculos se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Plátano	Guayaba
D= 0.03 m	D= 0.05 m
L= 0.002 m	L= 0.003 m
A= $1.8850E^{-4} \text{ m}^2$	A= $4.7124E^{-4} \text{ m}^2$
$T_s = 45^\circ\text{C}$	$T_s = 43^\circ\text{C}$
$T_m = 55^\circ\text{C}$	$T_m = 55^\circ\text{C}$

Las temperaturas T_s y T_m se obtuvieron experimentalmente. Para calcular el área, de acuerdo a Cengel (2003), la rebanada puede considerarse como un cilindro y se calcula como: $A = \pi DL$

Teniendo ya los coeficientes de transferencia y los datos presentados anteriormente fue posible calcular el calor transferido por convección como se presenta a continuación:

—

—

De acuerdo a las pruebas experimentales se determinó que una charola puede contener aproximadamente 45 rebanadas de plátano y 47 de guayaba, entonces:

Trasferencia de calor por conducción.

Para poder realizar los cálculos se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

Plátano	Guayaba
D= 0.03 m	D= 0.05 m
L= 0.002 m	L= 0.003 m
A= 7.069 E ⁻⁴ m ²	A= 1.96 E ⁻³ m ²
T ₁ = 55°C	T ₁ = 55°C
k=0.481 Kw/m°C	k=0.310 Kw/m°C

El valor de las conductividades térmicas se obtuvo de Cengel (2003). La diferencia de temperatura entre T1 y T2 se midió experimentalmente y no fue detectable, por lo menos hasta el tercer dígito después del punto decimal en el termómetro, para lo cual se tomó un valor de $\Delta T = 0.0009 \text{ }^\circ\text{C}$ que es un valor casi despreciable. Para calcular el área transversal las rebanadas por su configuración geométrica son consideradas como círculos y se calcula: $A = 1/4\pi D^2$.



Disminución máxima posible de la temperatura del aire.

De las pruebas experimentales que se realizaron con anterioridad en donde se monitoreó la temperatura en cada charola se obtuvo que existía un gradiente de temperatura en el aire entre cada charola de aproximadamente $\Delta T = 0.34^\circ\text{C}$ y 0.38°C para el plátano y la guayaba, respectivamente. Por lo tanto, por rebanada sería:

Para el plátano= $0.34^\circ\text{C} / 45 = 7.55 \text{ E}^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / \text{rebanada}$

Para la guayaba= $0.38^\circ\text{C} / 47 = 8.08 \text{ E}^{-3} \text{ }^\circ\text{C} / \text{rebanada}$

A partir de estos valores se realizó el cálculo de que tanta variación existiría en Q por cada charola que se introdujera y se evaluó el coeficiente de variación y la varianza entre los valores (acumulativamente) para saber cuántos grados puede disminuir la temperatura del aire antes de que variara significativamente. Para realizar esto se tomó el valor de la guayaba por ser el mayor y buscando optimizar:

Tabla 31. Evaluación del cambio en la transferencia de calor con respecto a la disminución de temperatura del aire.

Charolas	T _{medio} (°C)	ΔT (°C)	Q _{charola} (W)	CV (%)
1	55	0	0.3011	0
2	54.62	0	0.2907	1.13
3	54.24	1	0.2803	2.48
4	53.86	1	0.2699	2.96
5	53.48	2	0.2595	3.57
6	53.1	2	0.2491	4.28
7	52.72	2	0.2387	4.7
8	52.34	3	0.2283	5.33
9	51.96	3	0.2179	5.86
10	51.58	4	0.2075	6.42
11	51.2	4	0.1971	7.07
12	50.82	4	0.1867	7.66
13	50.44	5	0.1763	8.32
14	50.06	5	0.1659	8.97
15	49.68	5	0.1555	9.62
16	49.3	6	0.1451	10.97
17	48.92	6	0.1347	12.38
18	48.54	7	0.1243	13.84
19	48.16	7	0.1139	16.96
20	47.78	7	0.1035	18.63

*Los coeficientes de variación fueron calculados utilizando el programa JMP 6.0

De acuerdo a lo anterior, el coeficiente de variación máximo, es decir menor al 10%, se encuentra cuando la temperatura del aire ha disminuido 5°C, por lo tanto, es el gradiente máximo posible, para evitar variaciones significativas en la velocidad de secado.

Cuando el área de las charolas aumenta y con esto aumenta el número de piezas por charola se calcula nuevamente el gradiente de temperatura. Para el plátano el número de piezas por charola aumenta a 53 rebanadas aproximadamente y para la guayaba aumenta a 54 rebanadas aproximadamente. Por lo tanto, el gradiente de temperatura del aire entre cada charola cambia, $\Delta T = 0.36^{\circ}\text{C}$ y 0.40°C para el plátano y la guayaba, respectivamente. En base a estos nuevos gradientes se calculo nuevamente el gradiente máximo permitido entre la primera y última charola de la cabina:

Tabla 32. Cálculo del gradiente de temperatura máximo posible en la cabina de secado con el área nueva de las charolas.

Charolas	T _{medio} (°C)	Q _{rebanada} (W)	ΔT (°C)	CV (%)
1	55	0.3011	0	0
2	54.6	0.2901	0	1.79
3	54.2	0.2792	1	2.63
4	53.8	0.2682	1	3.12
5	53.4	0.2573	2	3.77
6	53	0.2463	2	4.36
7	52.6	0.2354	3	4.97
8	52.2	0.2244	3	5.54
9	51.8	0.2135	3	6.2
10	51.4	0.2025	4	6.86
11	51	0.1916	4	7.48
12	50.6	0.1806	5	8.17
13	50.2	0.1697	5	8.81
14	49.8	0.1587	5	9.53
15	49.4	0.1478	6	10.21

*Los coeficientes de variación fueron calculados utilizando el programa JMP 6.0

Cálculo del área de las charolas

Las operaciones fueron realizadas con el programa Excel, sin embargo éstas fueron las consideraciones que se tomaron en cuenta:

$\lambda_w = 2,395 \text{ kJ/Kg}$ (Este dato se obtuvo de Cengel (2003) Tabla A-9).

$T_w = 45^\circ\text{C}$

$T = 55^\circ\text{C}$

$h = 45.82 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Ecuación de Velocidad de secado:

Separación entre las charolas.

Las operaciones fueron realizadas con el programa Excel, sin embargo éstas fueron las consideraciones que se tomaron en cuenta:

Para 5cm de separación:

$v = 0.01078 \text{ m}^3$

$m = 0.01177 \text{ kg}$

Para 4.5cm de separación:

$v = 0.00972 \text{ m}^3$

$m = 0.01061 \text{ kg}$

Aumento del número de charolas.

Para realizar el cálculo se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

$A = 0.00062832 \text{ m}^2$

$L_s = 0.00004761 \text{ kg}$

$X_1 = 6.0152 \text{ g}$

$X_2 = 0.4761 \text{ g}$

$\Delta_x = 5.54 \text{ g}$

$L_s/A = 0.075773491 \text{ m}$

Primeramente se calcularon:

Tabla 33. Pérdida de calor por convección a diferentes temperaturas del aire.

T (°C)	ρ (Kg/m ³)	G (Kg/m ² s)	h (W/m ² °C)	Q _{reb} (W)	Q _{charola} (W)
55	1.092	4.914	43.5582	0.3011	14.1495
60	1.059	4.7655	42.6194	0.4285	20.1375
65	1.0435	4.6958	42.1759	0.5565	26.1555

*Los cálculos desarrollados se realizaron utilizando el programa Excel

Se tomo como referencia el tiempo de secado a 55°C:

$\lambda_w = 2395000$ kJ/Kg (Este dato se obtuvo de Cengel (2003) Tabla A-9)

T = 55°C

T_w = 45°C



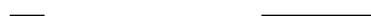
Se realizó lo mismo para 60 y 65°C y se calculó cuántas charolas más podrías agregarse sin que el tiempo de secado supere al obtenido a 55°C con 13 charolas:

Para 60°C:

$\lambda_w = 2383000$ kJ/Kg

T = 60°C

T_w = 49°C



Para 65°C:

$$\lambda_w = 2377000 \text{ KJ/Kg}$$

$$T = 65^\circ\text{C}$$

$$T_w = 52^\circ\text{C}$$

Cálculo de pérdidas de calor a través de las paredes de la cabina con diferentes modelos.

Los sistemas se resolvieron como resistencias térmicas (Figura 34):

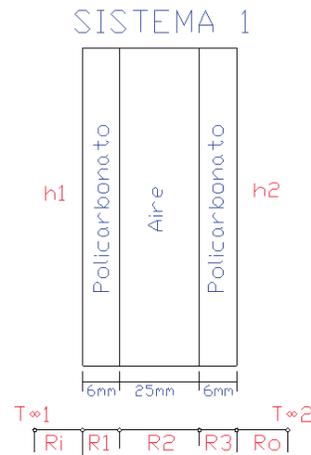


Figura 34. Modelo 1 de paredes de cámara de secado del deshidratador.

Las consideraciones tomadas en cuenta para realizar los cálculos son:

$$h_1 = h_{int} = 45.82 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_2 = h_{ext} = 30 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La cabina tiene una altura de 1.0 m y un ancho de .52m, por lo tanto, el área:

Las temperaturas interior y exterior serán:

Las conductividades térmicas para los diferentes materiales son:

$$K_{\text{fibra de vidrio}} = 0.043 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$K_{\text{policarbonato}} = 0.18 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

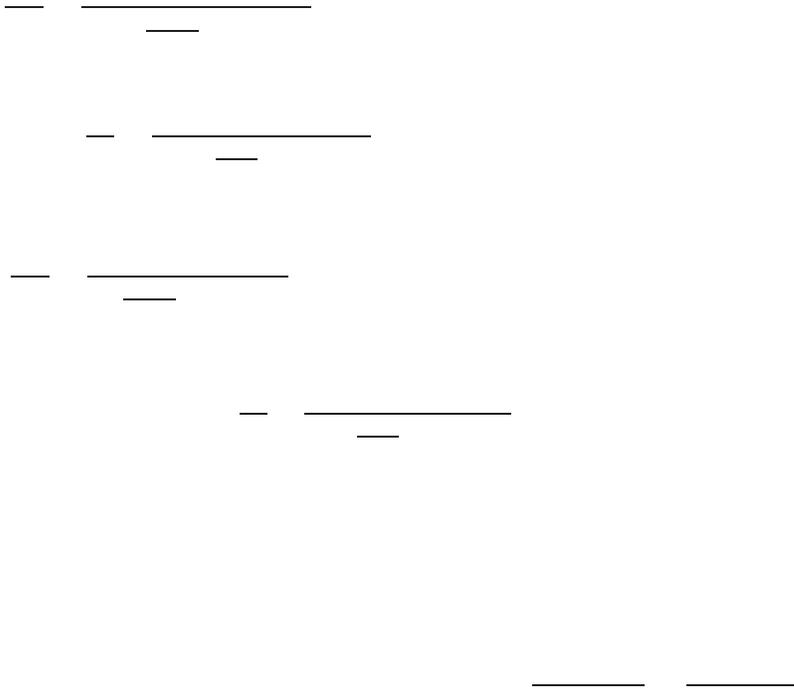
$$K_{\text{aire}} = 0.026 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$K_{\text{caucho}} = 0.032 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$K_{\text{poliuretano}} = 0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

*Las conductividades se obtuvieron de Cengel, 2003.

Modelo 1: policarbonato/aire/policarbonato



Para los cálculos de los siguientes modelos los valores de R_1 , R_3 , R_o y R_i no variarán por lo que solo se estará calculando R_2 en función del material empleado.

Modelo 2: policarbonato/ fibra de vidrio /policarbonato

$$R_1 = R_3 = 0.059 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_o = 0.059 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_i = 0.039 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$



Modelo 3: policarbonato/caucho/policarbonato

$$R_1 = R_3 = 0.039 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_o = 0.059 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_i = 0.039 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

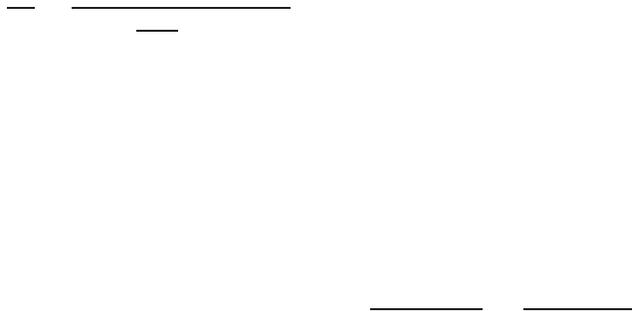


Modelo 4: policarbonato/poliuretano/policarbonato

$$R_1 = R_3 = 0.059 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

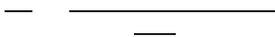
$$R_o = 0.059 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_i = 0.039 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$



Espesor de la capa de aire.

A un espesor de 0.02m:



A un espesor de 0.025m:

Cálculo de las eficiencias en prueba comparativa entre ambos modelos.

Modelo previo:

1 kg plátano

6 hrs 20 min = 6.33 hr

Entonces:

Nuevo modelo:

1 kg plátano

4 hrs 20 min = 4.33 hr

Entonces:

*Las pruebas se llevaron a cabo en el mes de Diciembre, en día de escasa nubosidad.

Comparación de la eficiencia:

Tomando en cuenta que 0.16 kg/hr representará el 100%, entonces:

$$(0.23 - 0.16) \text{ kg/hr} = 0.07$$

La eficiencia aumenta:

$$(0.07)(100)/ 0.16 = 43.75\%$$

Eficiencia de secado con capacidad máxima de producto:

6 kg plátano

4 hrs 40 min = 4.67 hr

Entonces:

—

Eficiencia de secado de mango y nopal:

1 kg mango

7 hrs 30 min = 7.5 hr

Entonces:

—

1 kg nopal

7 hrs 30 min = 5 hr

Entonces:

—

11.2 **Anexo 2****2.1 Valor nutrimental de mango Haden y nopal *Opuntia***

Tabla 34. Valor nutrimental del mango Haden.

Nutrimento	Unidad	Valor por 100g de porción comestible
Agua	g	81.8
Energía	Kcal	59
Proteínas	g	0.5
Grasa total	g	0.6
Carbohidratos totales	g	16.4
Fibra dietética	g	0.8
Calcio	mg	12
Hierro	mg	0.8
Tiamina	mg	0.05
Fósforo	mg	12
Riboflavina	mg	0.06
Niacina	mg	0.04
Vitamina C	mg	53
Vitamina A	UI	1100

Tabla 35. Valor nutrimental del nopal *Opuntia*.

Nutrimento	Unidad	Valor por 100g de porción comestible
Agua	g	93
Energía	Kcal	27
Proteínas	g	1.7
Grasa total	g	0.3
Carbohidratos totales	g	5.6
Fibra dietética	g	0.8
Calcio	mg	93
Hierro	mg	1.6
Tiamina	mg	0.03
Riboflavina	mg	0.06
Niacina	mg	0.03
Vitamina C	mg	8.0

2.2 Estandarización de grado de madurez de plátano y guayaba

Tabla 36. Evaluación de color, textura y °Bx para caracterizar estados de madurez en plátano Tabasco y guayaba blanca.

Producto	Grado de madurez	L	a	b	Textura (g) c/cáscara	Textura (g) s/cáscara	°Bx
Plátano	1	75.08	2.02	18.12	97.7	65.4	2.6
		74.05	1.54	14.29	95.0	63.5	3.1
		78.83	1.99	16.09	96.7	64.2	3.0
		$\mu= 75.99$ $\sigma= 2.51$	$\mu= 1.85$ $\sigma= 0.27$	$\mu= 16.17$ $\sigma= 1.91$	$\mu= 96.47$ $\sigma= 1.36$	$\mu= 64.36$ $\sigma= 0.96$	$\mu= 2.9$ $\sigma= 0.26$
	2	81.94	2.0	15.88	94.3	65.5	4.9
		79.76	1.19	12.50	93.2	61.8	4.5
		78.47	1.65	14.48	94.7	59.0	4.7
		$\mu= 80.06$ $\sigma= 1.75$	$\mu= 1.61$ $\sigma= 0.40$	$\mu= 14.28$ $\sigma= 1.70$	$\mu= 94.06$ $\sigma= 0.78$	$\mu= 62.11$ $\sigma= 3.26$	$\mu= 4.7$ $\sigma= 0.2$
	3	75.31	2.32	15.51	90.4	61.6	24.9
		74.64	2.18	15.71	90.8	59.1	24.2
		77.43	2.45	16.58	94.1	60.9	25.0
		$\mu= 75.79$ $\sigma= 1.46$	$\mu= 2.32$ $\sigma= 0.14$	$\mu= 15.93$ $\sigma= 0.57$	$\mu= 91.77$ $\sigma= 2.03$	$\mu= 60.55$ $\sigma= 1.29$	$\mu= 24.7$ $\sigma= 0.44$
	4	58.23	3.76	19.80	88.7	57.2	36.1
		58.96	4.20	19.46	86.9	57.6	36.8
		58.37	4.19	18.82	85.7	57.0	36.1
		$\mu= 58.52$ $\sigma= 0.39$	$\mu= 4.05$ $\sigma= 0.25$	$\mu= 19.36$ $\sigma= 0.50$	$\mu= 87.10$ $\sigma= 1.50$	$\mu= 57.28$ $\sigma= 0.30$	$\mu= 36.4$ $\sigma= 0.40$
Guayaba	1	76.70	3.20	21.60	94.5	92.7	0.5
		72.45	5.33	21.54	94.8	94.2	0.6
		75.60	4.17	22.25	95.7	92.9	1.0
		$\mu= 74.91$ $\sigma= 2.20$	$\mu= 4.23$ $\sigma= 1.07$	$\mu= 21.80$ $\sigma= 0.39$	$\mu= 95$ $\sigma= 0.62$	$\mu= 93.27$ $\sigma= 0.81$	$\mu= 0.7$ $\sigma= 0.26$
	2	77.81	4.12	22.62	91.6	90.6	1.5
		75.72	4.83	21.62	92.2	91.2	2.2
		75.63	4.82	22.35	92.4	92.0	1.7
		$\mu= 76.38$ $\sigma= 1.23$	$\mu= 4.59$ $\sigma= 0.41$	$\mu= 21.19$ $\sigma= 0.52$	$\mu= 92.06$ $\sigma= 0.42$	$\mu= 91.16$ $\sigma= 0.70$	$\mu= 1.8$ $\sigma= 0.36$
	3	68.42	6.78	23.99	89.6	89.5	6.9
		70.70	5.99	24.62	90.1	87.6	7.4
		66.27	6.97	24.82	89.2	88.2	7.3
		$\mu= 68.46$ $\sigma= 2.21$	$\mu= 6.58$ $\sigma= 0.52$	$\mu= 24.47$ $\sigma= 0.43$	$\mu= 89.63$ $\sigma= 0.45$	$\mu= 88.43$ $\sigma= 0.97$	$\mu= 7.2$ $\sigma= 0.26$
	4	68.34	7.52	25.78	88.1	87.9	12.1
		64.10	6.73	23.95	87.4	86.4	13.0
		66.88	6.06	25.16	88.5	88.71	12.7
		$\mu= 66.44$ $\sigma= 2.15$	$\mu= 6.77$ $\sigma= 0.73$	$\mu= 24.96$ $\sigma= 0.93$	$\mu= 88$ $\sigma= 0.56$	$\mu= 87.67$ $\sigma= 1.17$	$\mu= 12.6$ $\sigma= 0.46$

2.3 Valor de la temperatura asociado a cada nodo en cabina de secado

Tabla 37. Temperatura asociada a cada nodo en el perfil de temperatura.

Nodo	Temperatura (°C)								
1	59.999	31	55.014	61	59.416	91	59.572	121	56.181
2	59.999	32	55.020	62	59.201	92	59.450	122	59.821
3	59.910	33	55.039	63	58.891	93	59.272	123	59.795
4	59.830	34	59.962	64	58.431	94	59.024	124	59.748
5	59.767	35	59.982	65	57.706	95	58.682	125	59.675
6	59.726	36	59.989	66	56.545	96	58.221	126	59.568
7	59.712	37	59.993	67	59.755	97	57.619	127	59.416
8	59.726	38	59.995	68	59.718	98	56.865	128	59.201
9	59.767	39	59.996	69	59.653	99	55.978	129	58.891
10	59.830	40	59.997	70	59.554	100	59.712	130	58.431
11	59.910	41	59.998	71	59.409	101	59.669	131	57.706
12	57.500	42	59.998	72	59.203	102	59.593	132	56.545
13	59.999	43	59.999	73	58.917	103	59.476	133	59.906
14	59.999	44	59.999	74	58.517	104	59.307	134	59.891
15	59.998	45	59.906	75	57.958	105	59.069	135	59.866
16	59.998	46	59.891	76	57.185	106	58.741	136	59.828
17	59.997	47	59.866	77	56.181	107	58.294	137	59.771
18	59.996	48	59.828	78	59.712	108	57.700	138	59.690
19	59.995	49	59.771	79	59.669	109	56.939	139	59.573
20	59.993	50	59.690	80	59.741	110	56.023	140	59.401
21	59.989	51	59.573	81	59.476	111	59.755	141	59.132
22	59.982	52	59.401	82	59.307	112	59.718	142	58.663
23	59.962	53	59.132	83	59.069	113	59.653	143	57.552
24	57.500	54	58.663	84	58.741	114	59.554		
25	55.039	55	57.552	85	58.294	115	59.409		
26	55.020	56	59.821	86	57.700	116	59.203		
27	55.014	57	59.795	87	56.939	117	58.917		
28	55.012	58	59.748	88	56.023	118	58.517		
29	55.012	59	59.675	89	59.697	119	57.958		
30	55.012	60	59.568	90	59.652	120	57.185		

2.4 Textura y color de producto deshidratado

Tabla 38. Determinación de textura en guayaba y plátano deshidratados.

Producto	Repetición	Textura (g)
Plátano	1	73.1
Plátano	2	69.2
Plátano	3	71.5
		71.29 ± 1.96
Guayaba	1	116.4
Guayaba	2	109.5
Guayaba	3	114.4
		113.44 ± 3.55

Tabla 39. Determinación de color en guayaba y plátano deshidratados.

Producto	Repetición	Color		
		L	a	b
Plátano	1	65.25	2.86	14.23
Plátano	2	60.90	3.52	12.17
Plátano	3	64.17	2.95	16.11
		63.44 ± 2.26	3.11 ± 0.36	14.17 ± 1.97
Guayaba	1	59.41	5.72	22.36
Guayaba	2	61.29	5.14	24.07
Guayaba	3	63.98	6.15	24.82
		61.56 ± 2.29	5.67 ± 0.50	23.75 ± 1.26

2.5 Tiempos de secado de rebanadas de plátano

Tabla 40. Monitoreo de tiempos de secado por rebanada.

Monitoreo	Tiempo (hr)	Monitoreo	Tiempo (hr)	Monitoreo	Tiempo (hr)
1	4.33	11	4.5	21	4.25
2	4.16	12	4.16	22	4.25
3	4.33	13	4.16	23	4.16
4	4.33	14	4.33	24	4.16
5	4.16	15	4.25	25	4.50
6	4.16	16	4.33	26	4.25
7	4.25	17	4.50	27	4.33
8	4.25	18	4.25	28	4.33
9	4.33	19	4.25	29	4.16
10	4.50	20	4.25	30	4.25

$$\mu = 4.28 \pm 0.107$$

11.3 Anexo 3. Diseño del deshidratador solar en AUTOCAD

Se realizaron las vistas ortogonales de los diferentes componentes del deshidratador solar. La escala empleada fue 1:1 y todos los valores de las acotaciones están dados en cm.

Colector Solar: Vista Superior

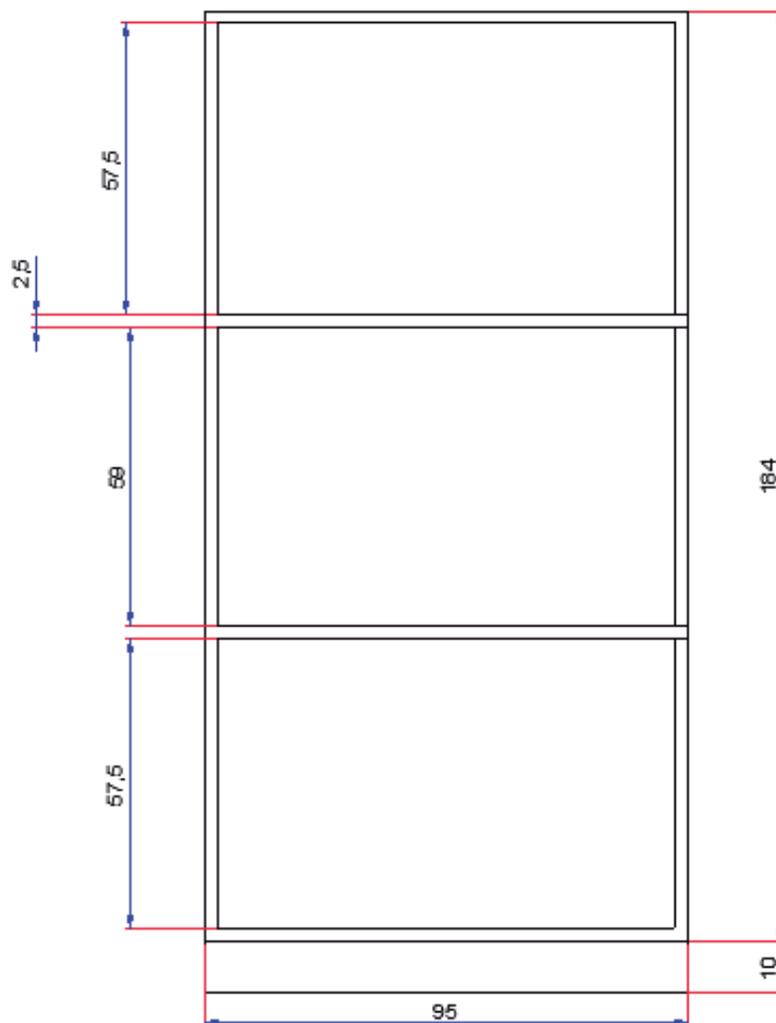


Figura 35. Colector solar: vista superior.

Colector Solar: Vista Lateral

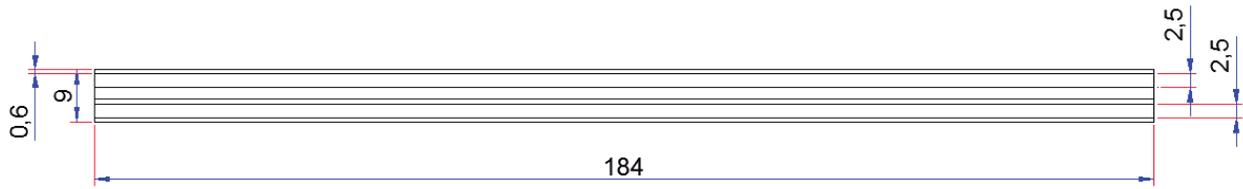


Fig. 36. Colector solar: vista lateral.

Cabina de Secado: Vista Frontal

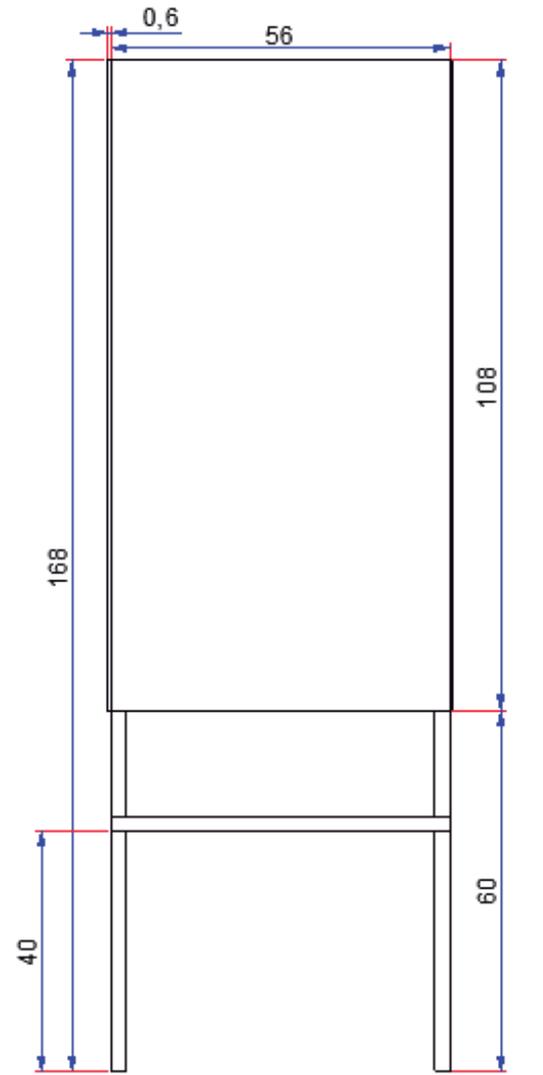


Fig. 37. Cabina de secado: vista frontal.

Cabina de Secado: Vista Lateral

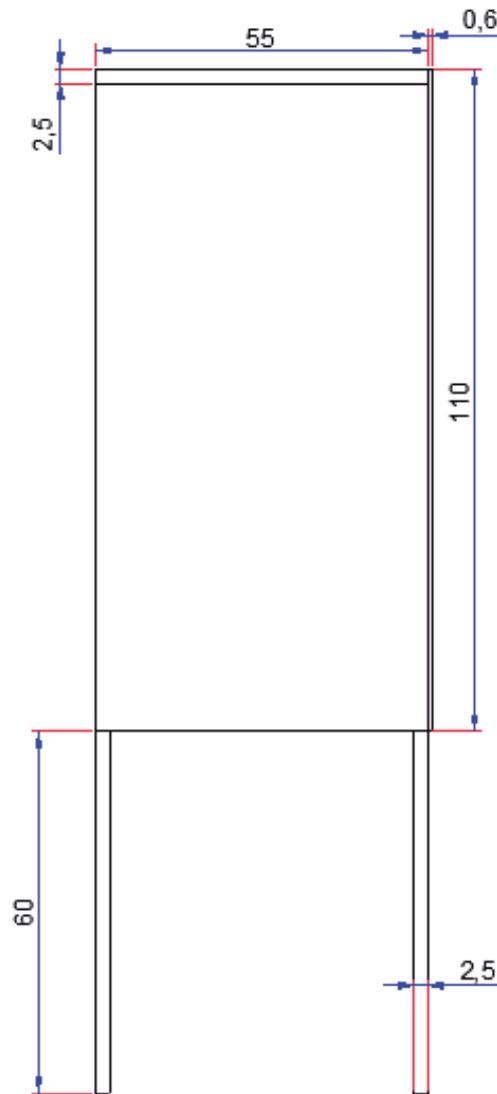


Fig. 38. Cabina de secado: vista lateral.

Tapa: Vista Lateral

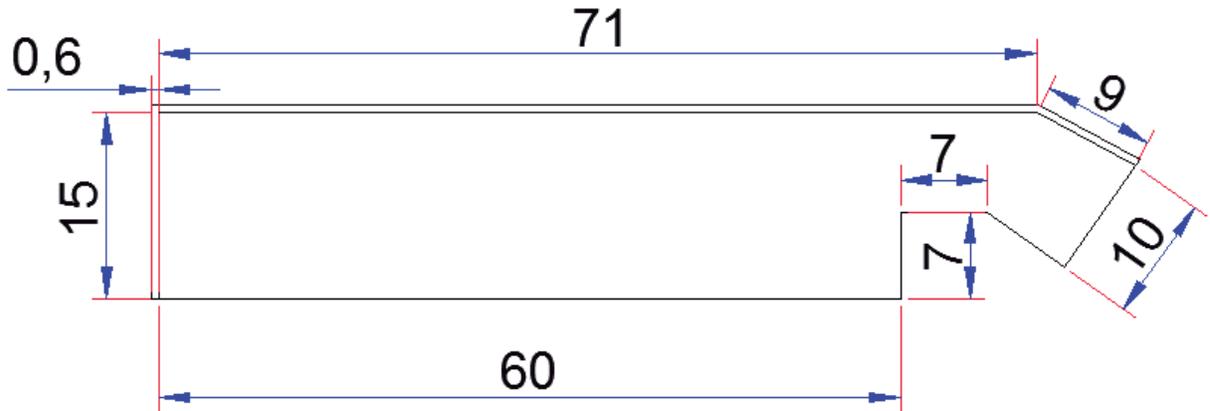


Fig. 39. Tapa: vista lateral.

Tapa: Vista Superior

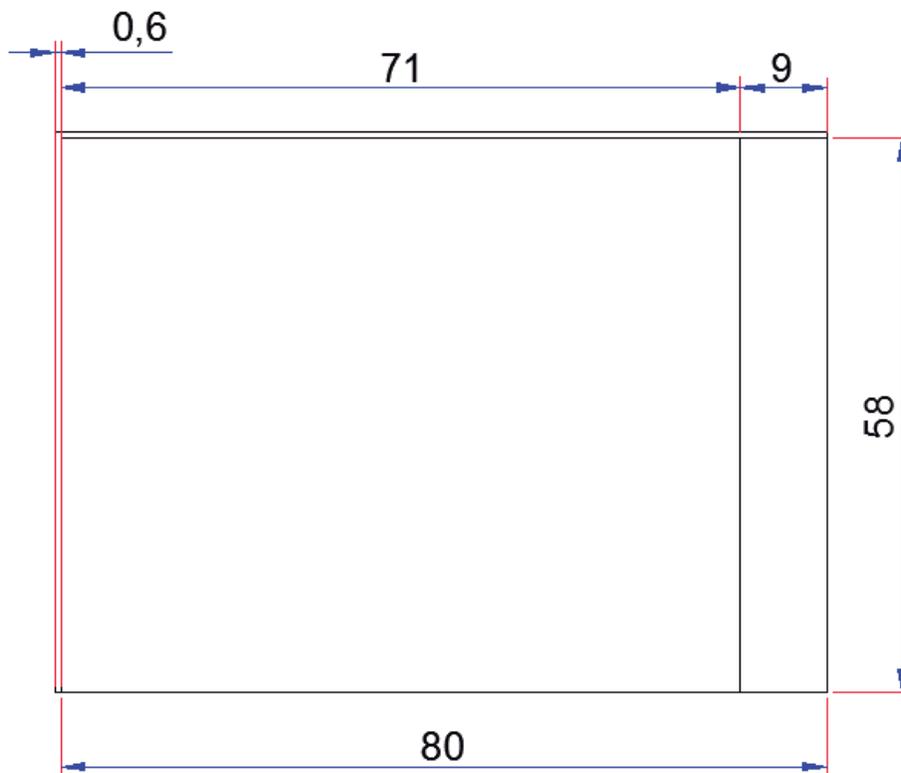


Fig. 40. Tapa: vista superior.