



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO

CAPACIDAD DE DESHIDRATACIÓN SOLAR CON FLUJO NATURAL

TITULACIÓN INTEGRAL TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERÍA MECATRÓNICA

PRESENTA:
HERNÁN RAMÍREZ XOLOCOTZI

NOMBRE DEL ASESOR:
MTRO. EFRÉN SÁNCHEZ FLORES



APIZACO, TLAX., AGOSTO 2023



Apizaco, Tlaxcala, **05/Junio/2023.**

Oficio No.: MM/335/2023.

ASUNTO: Liberación de Titulación por Tesis.

MARTIN ROJAS RAMÍREZ
JEFE DEL DEPTO. DE DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
P R E S E N T E

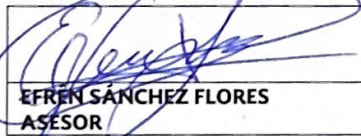
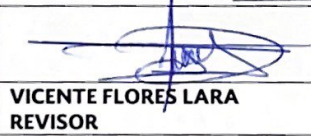
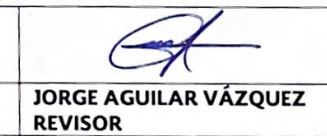
Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para Titulación integral:

Alumno:	HERNÁN RAMÍREZ XOLOCOTZI
Carrera:	INGENIERÍA MECATRÓNICA
No. De Control:	16370904
Nombre del Proyecto:	CAPACIDAD DE DESHIDRATACIÓN SOLAR CON FLUJO NATURAL.
Producto:	TITULACIÓN INTEGRAL POR TESIS.

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros egresados.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
Pensar para Servir, Servir para el Bienestar

LUZ FABIOLA SÁNCHEZ PARRA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
SUBDIRECTORA ACADÉMICA

 EFREN SÁNCHEZ FLORES ASESOR	 VICENTE FLORES LARA REVISOR	 JORGE AGUILAR VÁZQUEZ REVISOR
--	--	--

- C.p. Oficina de Titulación.-
C.p. Departamento de servicios escolares
C.p. Expediente.- Jefe de proyectos de vinculación Metal-Mecánica





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Apizaco
División de Estudios Profesionales

Apizaco, Tlax., **10/agosto/2023**
No. OFICIO: DEP-CT/538/2023

ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

HERNAN RAMIREZ XOLOCOTZI
EGRESADO DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
CON NÚMERO DE CONTROL: 16370904
P R E S E N T E

Por este medio, me permito informar a usted que por aprobación de la comisión revisora asignada para valorar el trabajo que mediante la opción **TITULACIÓN INTEGRAL POR TESIS** cuyo tema es: **"CAPACIDAD DE DESHIDRATACIÓN SOLAR CON FLUJO NATURAL"**, conforme a lo establecido en el procedimiento para la obtención del Título Profesional en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios Profesionales a mi cargo le otorga:

AUTORIZACIÓN DE IMPRESION

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica
Pensar para Servir, Servir para Triunfar*




MARTÍN ROJAS RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
DIVISION DE
ESTUDIOS PROFESIONALES

c.p. archivo



Av. Instituto Tecnológico No. 418, San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec,
Tlaxcala, Mex. C.P. 90491 Tel. (241) 4172010 Ext. 304,
e-mail: dep_titulación@apizaco.tecnm.mx



2023
Francisco
VILA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres.

María y Felipe, por siempre brindarme su apoyo a lo largo de toda mi vida y estar a mi lado en todo momento, por llenarme de valores los cuales hoy en día me hacen ser la persona que soy, no tengo palabras para describir el amor que les tengo porque en cada paso de mi vida ellos se encuentran presentes, todos mis logros son de ellos porque siempre me mostrare agradecido por lo que han ofrecido a lo largo del tiempo.

A mis hermanos.

Raúl y Nataly, que, sin importar la situación, siempre me sacan una sonrisa y me motivan a siempre seguir adelante ya que su apoyo es más de lo que uno como hermano puede esperar, están conmigo en los momentos difíciles y siempre con una sonrisa.

A mi novia.

América, Es un eslabón importante hoy en día, siempre se ha mostrado presente en todos los objetivos que tengo en mente, me anima en todo momento y me fortalece a seguir adelante, a no rendirme por más dura que sea la situación, siempre ha confiado en mí, me ayuda a recordar mis capacidades cuando, cuando tengo un mal día no se preocupa por otra cosa más que hacerme sentir bien y siempre animándome a más.

A mi asesor de tesis

Al DR. Vicente Flores Lara, que me dio la oportunidad de trabajar a su lado y con sus consejos tener un panorama más amplio de lo que implica un trabajo de tal magnitud, siempre impulsando a ser dedicados y poner un extra en todo lo que uno tiene pensado.

Hernán Ramírez Xolocotzi

RESUMEN

La presente tesis se centra en desempeño y evaluación de un deshidratador solar de convección natural destinado a aplicaciones agroalimentarias. El objetivo principal es desarrollar un sistema para el secado de productos agrícolas, aprovechando la energía solar y los principios de convección natural.

El deshidratador solar diseñado consta de una cámara tipo gabinete con una cubierta de vidrio transparente que permite el ingreso de la radiación solar al interior. El aire caliente generado por la radiación solar calienta los productos agrícolas dispuestos en bandejas perforadas dentro del deshidratador. La convección natural se encarga de mover el aire caliente desde la parte inferior hacia la superior, garantizando así un secado uniforme de los productos.

Para la evaluación del deshidratador, se llevaron a cabo pruebas experimentales utilizando diferentes tipos de productos agrícolas, como frutas y verduras. Se midieron parámetros clave como la temperatura interna, la humedad y la tasa de secado de los productos.

Los resultados de las pruebas experimentales indican que el deshidratador solar de convección natural es capaz de lograr un secado efectivo de los productos agrícolas. Se observó una reducción significativa en el contenido de humedad de los productos con una temperatura promedio de 53 °C al interior de la cámara y una radiación promedio de 6600/6900 (W^h/m^2).

En conclusión, la tesis demuestra que un deshidratador solar de convección natural es una alternativa viable y sostenible para el secado de productos agrícolas. Su diseño simple y su operación de bajo costo lo convierten en una opción atractiva para comunidades rurales y pequeñas empresas agroalimentarias que buscan una manera eficiente de conservar sus productos.

ABSTRACT

This thesis focuses on the performance and evaluation of a natural convection solar dehydrator for agri-food applications. The main objective is to develop a system for drying agricultural products, taking advantage of solar energy and the principles of natural convection.

The designed solar dehydrator consists of a cabinet-type chamber with a transparent glass cover that allows solar radiation to enter the interior. The hot air generated by solar radiation heats the agricultural products arranged in perforated trays inside the dehydrator. Natural convection is responsible for moving hot air from the bottom to the top, thus ensuring uniform drying of the products.

For the evaluation of the dehydrator, experimental tests were carried out using different types of agricultural products, such as fruits and vegetables. Key parameters such as internal temperature, humidity and the drying rate of the products were measured.

The results of the experimental tests indicate that the natural convection solar dehydrator is capable of achieving effective drying of agricultural products. A significant reduction in the moisture content of the products was observed with an average temperature of 53 °C inside the chamber and an average radiation of 6600/6900 (Wh/m^2).

In conclusion, the thesis demonstrates that a natural convection solar dehydrator is a viable and sustainable alternative for drying agricultural products. Its simple design and low-cost operation make it an attractive option for rural communities and small agri-food businesses looking for an efficient way to preserve their products.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

ÍNDICE

1. INTRODUCCION.....	8
1.1 Planteamiento del Problema	9
1.2 Justificación	15
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo General.....	17
1.3.2 Objetivos Específicos.....	17
1.4 Metodología General	18
1.5 Alcance	19
1.6 Limitaciones	19
2. ESTADO DE LA TÉCNICA.....	20
2.1 Secadores Solares en Otras Regiones	21
2.2 Diseño, Desarrollo y Rendimiento de Diversos Tipos de Secadores.....	23
2.3 Clasificación de los Secadores Solares	26
2.4 Secado en Horas sin Sol.....	29
2.5 Sistema de deshidratación	31
3. MARCO TEÓRICO.....	33
3.1 Técnicas de Eliminación de Agua en Productos Agroalimentarios	34
3.2 El Consumo de Energía en la Deshidratación de Alimentos y Productos Agrícolas	35
3.3 Fuentes de Energía Utilizadas en la Deshidratación de Alimentos.....	36
3.3.1 Generación de Aire Caliente	37
3.3.2 Transporte de Calor por Conducción	37
3.3.3 Utilización de Energía Radiante	38

3.4 Cinética de Secado.....	40
3.5 Principios de Secado.....	41
3.5.1 Tasa de Secado.....	42
3.5.2 Actividad del Agua.....	44
3.5.3 Contenido de Humedad de Equilibrio.....	45
3.5.4 Isotermas de Sorción.....	45
3.5.5 Secado en la Capa Final y Secado en el Lecho Profundo.....	46
3.6 Sistema de Secado.....	48
3.6.1 Tipos de Secadores.....	48
3.6.2 Partes de un Deshidratador Solar.....	49
3.7 Proceso de Deshidratación de Alimentos.....	50
3.7.1 Calculo de la Masa del Producto Húmedo.....	50
3.7.2 Calculo de la Masa del Producto Seco.....	50
3.7.3 Calculo del Porcentaje de Solidificación en el Producto.....	51
3.8 Técnicas de Secado Solar.....	52
3.8.1 Temperatura Adecuada.....	52
3.8.2 Pretratamiento del Producto.....	53
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	54
4.1 Configuración del Sistema.....	54
4.1.1 Características del Deshidratador Solar.....	54
4.1.2 Geometría del Deshidratador Solar.....	56
4.1.3 Dimensiones del Deshidratador Solar.....	56
4.2 Evaluación de las Condiciones Ambientales.....	58
4.2.1 Lugar de Implementación del Deshidratador.....	58
4.2.2 Factores Ambientales del Lugar.....	58
4.3 Instrumentación.....	60
4.4 Proceso de Deshidratación de Alimentos.....	62
4.4.1 Sección de Lavado y Proceso de los Alimentos.....	62

4.4.2 Operaciones de Partida Para el Proceso de Deshidratación.....	62
4.4.3 Carga del Deshidratador y Proceso de Secado.....	63
4.4.4 Temperatura Adecuada en el Deshidratado de Alimentos.....	63
4.4.5 Tiempo de Deshidratación.....	64
4.4.6 Evaluación del Final del Deshidratado.....	65
4.5 Variables Estudiadas	66
4.5.1 Variación del Peso de las Muestras: Plátano y Jitomate.....	67
4.5.2 Eficiencia del Deshidratador Solar a Diferentes Condiciones Ambientales.....	67
4.5.3 Análisis de la Variación de la Temperatura Ambiental vs la Temperatura Interior de la Cámara de Deshidratación.....	68
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	68
5.1 Análisis del Flujo de Aire Dentro del Colector.....	68
5.2 Muestreo del Producto en una Balanza Analizadora de Humedad.....	69
5.3 Eficiencia del Deshidratador Solar.....	71
5.4 Proceso de Deshidratación Solar.....	72
5.5 Operación Térmica.....	72
5.6 Análisis de Datos de las Pruebas Experimentales.....	73
5.7 Análisis de la Perdida de Humedad.....	74
5.8 Curvas de Secado.....	75
6. CONCLUSIONES.....	80
7. REFERENCIAS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Porcentaje de Comida Desperdiciada.....	11
Figura 1.2 Porcentaje de desperdicio de alimento en América Latina.....	12
Figura 2.1 Clasificación de los secadores solares.....	27
Figura 3.1 Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de a_w	33

Figura 3.2 Curva de velocidad de secado, Fase 1,2,3.....	44
Figura 3.3 Isotermas de sorción. (A) Curva de absorción. (B) Curva de desorción.....	45
Figura 3.4 Zonas de secado de lecho profundo. D: Altura de la cama, P: Asamblea Plenaria, A: Secado.....	47
Figura 3.5 Diseños de secadores de energía solar.....	49
Figura 4.1 Cámara de deshidratación	54
Figura 4.2 Características de la cámara de deshidratación	55
Figura 4.3 Dimensiones de la cámara de deshidratación	57
Figura 4.4 Ubicación de las bandejas en la cámara de deshidratación.....	57
Figura 4.5 Radiación Solar en México.....	58
Figura 4.6 Temperatura del Aire en el Último Año.....	59
Figura 4.7 Velocidad del aire.....	60
Figura 5.1 Pruebas en la balanza analizadora de humedad (jitomate): a) Inicio de la prueba b) Final de la prueba.....	69
Figura 5.2 Pruebas en la balanza analizadora de humedad (Plátano): a) Inicio de la prueba b) Final de la prueba.....	70
Figura 5.3 Curva de secado de las pruebas del Plátano.....	76
Figura 5.4 Curva de secado de las pruebas del Jitomate.....	76
Figura 5.5 Curva de secado con mayor eficiencia del Jitomate.....	77
Figura 5.6 Curva de secado con mayor eficiencia del Plátano.....	78
Figura 5.7 a) jitomate fresco b) jitomate deshidratado.....	78
Figura 5.7 a) Platano fresco b) Platano deshidratado.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Instrumentos de medición empleados.....	61
Tabla 4.2 Tabla con valores de deshidratado de Agro alimentos.....	66
Tabla 5.1 Valores de las pruebas realizadas en la balanza analizadora de humedad.....	69
Tabla 5.2 Temperatura promedio al Interior y Exterior de la cámara sin producto.....	71
Tabla 5.3 Datos de las muestras durante el proceso de deshidratación (Jitomate).....	73
Tabla 5.4 Datos de las muestras durante el proceso de deshidratación (Plátano).....	73
Tabla 5.5 Porcentaje de pérdida de humedad en las pruebas.....	74

Capítulo 1. Introducción

El proceso de deshidratación de alimentos a lo largo del tiempo ha sido útil para la conservación de productos agroindustriales conservando propiedades como peso, volumen, sabor entre otras características de este, debido a que es un procedimiento que elimina cierto contenido de humedad procedente del cultivo y la cosecha, la gran mayoría de sus propiedades se mantienen conservando así sus características propias para el consumo y de igual manera ayudando a prolongar su vida útil. Con el paso del tiempo, se han modificado dichos mecanismos debido a la variedad de alimentos tratados, la diversidad de productos cosechados y las diferentes presentaciones de estos que se ofrecen en el mercado.

Existen distintas técnicas para la conservación de los alimentos, dependiendo cual sea el motivo de la preservación. Una de las principales dificultades que se espera resolver es el crecimiento inadecuado de microorganismos. Además, existen otros problemas que se deben resolver en el área de la conservación de alimentos, como la oxidación de las grasas (que causan la rancidez) y el pardeamiento de productos como frutas y verduras, que aparte de los efectos en la salud y nutrición humana pueden generar pérdidas económicas de gran envergadura.

El análisis que se plantea sobre el método de deshidratación depende de los requerimientos para el diseño del prototipo y las variables o parámetros fundamentales a las cuales se vaya a someter el equipo como temperaturas, humedad relativa, velocidad de flujo de aire, y características propias del fruto a tratar. Por esto, la presente investigación tiene como objeto el diseño de un colector solar para deshidratar productos agrícolas, que realice un proceso confiable y eficiente, donde el producto final tenga los resultados esperados.

En la actualidad se destaca el uso de la energía solar como una opción viable, económica y que contribuye a la conservación del medio ambiente. El proceso de deshidratación solar

mediante flujo natural se caracteriza principalmente por ser un método simple el cual aproveche las condiciones ambientales naturales, y de esta manera poder generar la remoción de humedad.

Se pretende comprobar la utilidad de construir una cabina tipo gabinete que utiliza el flujo de aire de forma natural de manera eficiente para la obtención de alimentos deshidratados con productos de una calidad aceptable demostrando así la efectividad de la cámara de deshidratación.

1.1 Planteamiento del Problema

El porcentaje de humedad que se encuentra en las frutas en promedio es del 80% [1], y varía dependiendo del producto que se desee tratar se clasifican como productos altamente perecederos, esto un problema de gran importancia en todo el campo de la industria alimenticia; la acción del agua en dichos alimentos tiende con el tiempo a afectar y deteriorar la fruta para su consumo, perjudicando la vida útil y dificultando su comercialización sin llegar a ser consumidos con una gran pérdida alimenticia.

El porcentaje del agua en las frutas involucra diferentes factores y variables que se deben tomar en cuenta para su conservación y almacenamiento tales como la temperatura, porcentaje de humedad, calidad del aire y otras más que están involucradas dentro del proceso de obtención del producto agroindustrial, por tal motivo es fundamental para el método de deshidratación reducir el porcentaje de humedad que poseen los alimentos con el fin de preservar las características para obtener un mayor beneficio al momento de ser almacenados y su posteriormente para su consumo.[2]

La humedad ocasiona gran afectación en dichos productos, aumentando el costo del cultivo, cosecha y por consiguiente el costo de las hortalizas, conduciendo a una pérdida en la producción y una devaluación del producto en el mercado, por tal motivo el proyecto se centra

en la postcosecha del alimento, la deshidratación es un mecanismo que se tiene presente para la conservación de productos agrícolas, estos beneficios se ven evidenciados en aspectos económicos si se consideran cultivos tipo exportación y preservación de propiedades alimenticias como vitaminas y nutrientes. Debido algunas investigaciones en el tema han puesto en marcha diferentes métodos para la conservación del alimento y lograr minimizar las pérdidas que se producen por la oxidación de la fruta a causa del agua [3]. Dentro de estas investigaciones realizadas se obtuvo que existen varios métodos para la conservación de los productos agrícolas como el análisis dimensional de colectores de calor para retirar el agua de la fruta causante de la pérdida del mismo, de igual forma se encontró que los productos como las frutas no reaccionan de la misma manera ante el proceso de deshidratación, debido a que cada uno de los productos agrícolas deben poseer un porcentaje mínimo de agua para poderse conservar, evidenciando que el sistema de intercambio de calor para retirar agua dependerá del fruto que se desee tratar, dando como resultado una excelente alternativa para tratar los alimentos [3,4].

Ya sea una fruta, un tubérculo o incluso carne, cada alimento existente se desperdicia hasta cierto punto. Por ello, resulta interesante averiguar cuántos alimentos de cada categoría se desperdician con relación al desperdicio total. Aquí, las frutas y verduras representan la mayor parte. Mirando la cantidad de alimentos que se producen y calculado el porcentaje desperdiciado por categorías, es posible ver como aproximadamente la mitad de las frutas y verduras, raíces y tubérculos son desperdiciados a lo largo de la cadena de suministro, mientras un tercio de todo el pescado y marisco nunca llega a nuestro plato [7].

Actualmente alrededor del mundo se cosechan 4,678 millones de toneladas de alimentos, pero desperdiciando más de un tercio del total cada año [8]. Es interesante saber cuántos alimentos de cada categoría se producen y calcular realmente cada porcentaje desperdiciado de esa producción [9]. Aquí, los datos muestran que casi la mitad de las frutas y verduras, raíces y

tubérculos producidas se desperdician a lo largo de la cadena de suministro y se observa el porcentaje de cada uno en la Figura 1.1.

- **Frutas y verduras:** 1400 millones de toneladas producidas (desperdicio del 46%)
- **Cereales:** 1197 millones de toneladas producidas (29%)
- **Raíces y tubérculos:** 598 millones de toneladas producidas (46%)
- **Lácteos:** 841 millones de toneladas producidas (17%)
- **Carne:** 352 millones de toneladas producidas (21%)
- **Semillas y raíces:** 227 millones de toneladas producidas (22%)
- **Pescado y marisco:** 63 millones de toneladas producidas (35%)

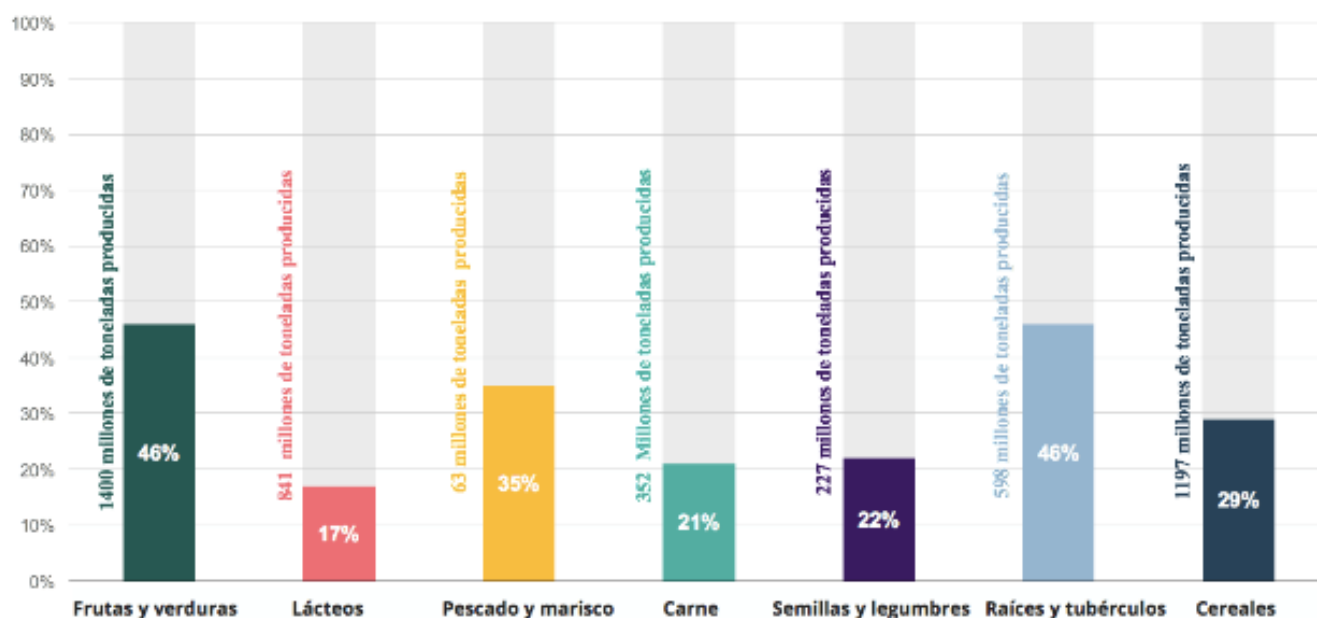


Figura 1.1 Porcentaje de Comida Desperdiciada [7].

Ahora que sabemos cuánta comida se produce y desperdicia por categorías, conviene dar un paso más allá y mirar estadísticas y razones por las que esto pasa realmente, al igual que cuánta comida se desperdicia a lo largo de las diferentes regiones. Todos los gráficos se han realizado basándose en los datos proporcionado por BCG [8] y FAO & National Geographic [9].

Jitomates: En Australia, casi un 90% de los jitomates son desperdiciados debido a su apariencia [10], en México se desperdician 125 mil toneladas por año.

Plátanos: Un reciente estudio de Suecia demostró que los plátanos son la fruta que más se desperdicia debido a sus pequeñas marcas negras o pequeños golpes [11]. En México se desperdicia el 53.76% de plátano generado [12].

La FAO calcula que en América Latina se pierden al año 127 millones de toneladas de alimentos, 10 veces la capacidad de la central de abastos de la capital mexicana [12], en la Figura 1.2 se observa que alrededor del 27% del despilfarro ocurre durante la producción, consumo, transporte, almacenamiento y distribución; en el procesamiento se desperdicia el 6% (13).

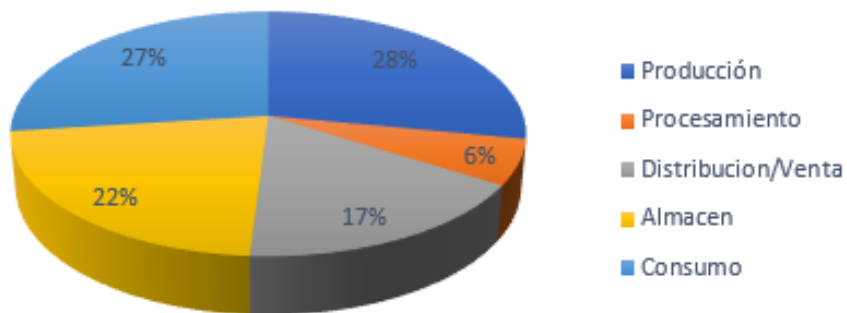


Figura 1.2 Porcentaje de desperdicio de alimento en América Latina [13].

Se pretende reducir el porcentaje de humedad para deshidratar frutas y verduras [5]. Basando este proyecto en análisis de eficiencia, desempeño y reducción de emisiones para el colector de calor buscando el intercambio de energía en forma calorífica entre el medio y el objeto en estudio (fruta). Se espera que los porcentajes de humedad en las frutas sea reducido.

De acuerdo con los diseños de los secadores solares, algunos utilizan energía eléctrica la cual es utilizada para dar energía y mover un ventilador que permite al aire caliente realizar su recorrido en el interior de la cámara de secado [6]. Los productos para deshidratar en zonas alejadas de la energía eléctrica requieren de ser transportados, esto ocasiona que el producto pierda su vida útil en el camino, sumándose a esto los costos por transportar grandes cantidades de producto.

Una alternativa para esta problemática son los secadores a convección natural que se utilizan en lugares donde los productos son cosechados y no requieren de energía eléctrica, para aprovechar al máximo el flujo de aire del medio ambiente se debe construir una cámara de deshidratación tipo gabinete el cual proporciona energía térmica.

Un deshidratador solar es un dispositivo que utiliza la energía del sol para evaporar el agua de los alimentos, lo que les permite conservarse durante más tiempo sin necesidad de refrigeración. Algunos de los beneficios de un deshidratador solar son:

- Conservación de alimentos: El deshidratador solar es una excelente manera de conservar los alimentos, ya que permite deshidratar frutas, verduras, hierbas y carnes sin necesidad de refrigeración. Esto permite que los alimentos se conserven durante mucho tiempo sin perder su valor nutricional ni su sabor.
- Ahorro de energía: Al utilizar la energía solar para deshidratar los alimentos, se reduce la dependencia de la energía eléctrica y, por tanto, se reduce el consumo de energía y los costos asociados.
- Accesibilidad: Los deshidratadores solares son fáciles de construir y usar, y no requieren una fuente de energía eléctrica para funcionar. Esto los hace accesibles a personas que viven en áreas remotas o que no tienen acceso a una fuente de energía eléctrica confiable.

- Salud: Los alimentos deshidratados son una excelente opción para aquellos que buscan una alimentación saludable, ya que son bajos en calorías y ricos en nutrientes. Además, la deshidratación solar no utiliza productos químicos, lo que significa que los alimentos deshidratados son libres de conservantes y otros aditivos artificiales.
- Sostenibilidad: La utilización de la energía solar para la deshidratación de alimentos es una práctica sostenible que contribuye a la conservación del medio ambiente, ya que no se utilizan combustibles fósiles ni se emiten gases de efecto invernadero.

Un deshidratador solar de convección natural es óptimo para la deshidratación porque utiliza la energía solar para calentar el aire dentro de una cabina cerrada. El aire caliente asciende y sale por una chimenea, lo que crea un flujo de aire que circula alrededor de los alimentos. A medida que el aire caliente circula, absorbe la humedad de los alimentos y la lleva hacia el exterior a través de la chimenea.

Estos deshidratadores son eficaces porque el aire caliente circula de manera uniforme alrededor de los alimentos, lo que permite que se sequen de manera uniforme y que se conserven de manera óptima. Además, al no necesitar electricidad, son ideales para áreas remotas donde no hay acceso a una fuente de energía eléctrica confiable.

1.2 Justificación

Según las investigaciones, alrededor del 15% de la población mundial está hoy desnutrida. El aumento de la población mundial reforzará el ya existente desequilibrio población-alimentación. Además de aumentar el suministro de alimentos y limitar el crecimiento de la población, reducir drásticamente las pérdidas de alimentos que se producen a lo largo de la producción, la postcosecha y la comercialización parece ser una opción viable.

La reducción de las pérdidas de alimentos es un problema especialmente para los países en desarrollo, que producen más del 80% de los alimentos.

El secado solar se practica desde tiempos inmemoriales para conservación de los alimentos y los cultivos agrícolas. Esto se hacía especialmente mediante el secado al sol bajo el cielo abierto. Dado que el secado al sol tradicional es un proceso relativamente lento, pueden producirse pérdidas considerables.

Además, se produce una reducción de la calidad del producto debido a infestación de insectos, reacciones enzimáticas, crecimiento de microorganismos y desarrollo de micotoxinas. Este proceso tiene varias desventajas como el deterioro del producto debido a condiciones climáticas adversas como la lluvia, el viento, la humedad y el polvo, la pérdida de material a causa de los pájaros y los animales, deterioro del material por descomposición, infestación de insectos y el crecimiento de hongos. Además, el proceso requiere mucha mano de obra, tiempo y requiere una gran superficie. Con el desarrollo cultural e industrial, se puso en práctica el secado mecánico artificial.

Este proceso requiere mucha energía y es caro, lo que en última instancia aumenta el coste del producto. Por ello, el secado solar es la mejor alternativa como solución a todos los inconvenientes del secado natural y del secado mecánico artificial

Los secadores solares utilizados en la agricultura para el secado de alimentos y cultivos son utilizados para los procesos de secado industrial. Se puede demostrar que son un dispositivo muy útil desde el punto de vista de la conservación de la energía.

Se ahorran energía y mucho tiempo, ocupa menos superficie, mejora la calidad del producto, hace que el proceso sea más eficiente y también protege el medio ambiente. Los secadores solares evitan algunas de las principales desventajas del secado clásico. El secado solar puede utilizarse para todo el proceso de secado o para complementar los sistemas de artificial, reduciendo así la cantidad total de energía combustible.

Los principales obstáculos para aumentar el uso del secado solar de cultivos son:

- El desconocimiento de la rentabilidad de los sistemas de secado solar de los sistemas de secado solar.
- La falta de buena información técnica.
- La falta de una buena experiencia práctica local.

El objetivo es abordar los tres obstáculos mencionados proporcionando información técnica y comercial y la experiencia adquirida en el diseño, la construcción y el funcionamiento de sistemas comercialmente viables para una variedad de cultivos y una serie de regiones geográficas, donde se espera que la energía solar tenga el mayor potencial.

Es sorprendente que un proceso tan utilizado, tan común como el secado solar haya recibido tan poco desarrollo técnico. No es descabellado creer que se podrían ahorrar millones de dólares al año mediante la reducción de los costes de secado, mejorando la calidad de los productos, y la reducción de las pérdidas por deterioro, retrasos en el transporte, y otros factores [14]. El secado solar puede ser un medio eficaz de conservación de los alimentos, ya que el producto está completamente protegido durante el producto contra la lluvia, el polvo, los insectos y los animales [15].

Muhlbauer revisó los desarrollos significativos de la última década en el área del secado solar de cultivos, afirmando que la energía solar se considera más aplicable a las temperaturas bajas, se considera más aplicable a los sistemas de secado de almacenamiento a baja temperatura, y que en la última década ha cobrado mayor importancia para el secado de grano y heno [16].

De acuerdo con los secadores que existen en la actualidad, para el secado de frutas y verduras se utilizan secadores de bandejas, debido a que en el secado de estos productos no se deben apilar más de 60 mm, ya que contienen un alto porcentaje de agua (mayor al 80%), el cual es un ambiente propicio para la oxidación del producto, la generación de hongos y por lo tanto degeneración de estos [17].

De acuerdo con la FAO [18], en México se desperdicia el 37% de los alimentos que se produce, debido a esto se generan pérdidas millonarias para los productores y consumidores. Por otro lado, nuestro país dispone de una oferta abundante de radiación solar para ser aprovechada con fines energéticos, entre otros para la deshidratación de productos alimenticios, los cuales podrían ser almacenados y en consecuencia permitirá una reducción de pérdidas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Estudiar el secado de platano y jitomate mediante el uso de un secador solar tipo gabinete en flujo natural para su conservación y calidad como alimento.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar el funcionamiento de la cámara de deshidratación tipo gabinete, integrando los sensores para la medición de los parámetros físicos.

- Analizar los resultados experimentales para determinar a qué condición termo física se debe encontrar el aire para un resultado optimo en la deshidratación de alimentos.
- Realizar las pruebas experimentales a las cuales se someterá el deshidratador solar de flujo natural para evaluar las condiciones termo físicas del aire.
- Preservar los alimentos eliminando la humedad y previniendo la proliferación de bacterias y hongos.
- Permitir que los alimentos se mantengan frescos durante un período prolongado de tiempo, un deshidratador solar ayuda a reducir el desperdicio de alimentos.

1.4 Metodología general

La metodología empleada para la elaboración de la cámara de deshidratación es la siguiente:

1. Revisión Bibliográfica. Búsqueda y consulta en bases de datos de antecedentes, trabajos, conceptos y normas acerca de deshidratación por medio de colectores solares.
2. Selección del Producto y cantidad para deshidratar. Para realizar el proceso de deshidratación, se optó principalmente por hortalizas tales como el jitomate y plátano, puesto que tiene un alto contenido de humedad y llevarla al porcentaje requerido facilitaría su almacenamiento y menos desperdicio de estas mismas.
3. Análisis Térmico y de Conservación de Energía. Para el análisis térmico se parte de ecuaciones principales con las leyes de la termodinámica. Con esto se busca hallar eficiencia, calor útil necesario, cantidad de agua a retirar, temperatura a la salida del colector, radio critico de aislamiento y el dimensionamiento de este mediante su área.

4. Experimentación. Se realizó una serie de pruebas experimentales con las cuales se obtuvo la termo física del aire.

5. Análisis de resultados. Con los resultados obtenidos mediante las pruebas realizadas se presentan los alcances y limitaciones del proyecto.

1.5 Alcance

1. Conservación de alimentos con un periodo de vida útil mayor al ser deshidratados.

2. Uso a favor de las condiciones atmosféricas para la deshidratación y conservación de alimentos.

3. Estudio del modelo geométrico para la deshidratación de alimentos.

4. Análisis de las condiciones atmosféricas.

5. Realizar pruebas experimentales.

6. Analizar los resultados.

1.6 Limitaciones

1. Las dimensiones de la cámara de deshidratación tipo gabinete no pueden tener alteraciones en su diseño por ningún motivo.

2. La capacidad de almacenamiento no tiene que sobrepasar el límite de carga para aprovechar las condiciones climáticas a favor.

3. La eficiencia está sujeta a condiciones climáticas del lugar.

Capítulo 2. Estado de la Técnica

Alrededor del 15% de la población mundial actual está desnutrida. El aumento de la población mundial fortalece el desequilibrio población-alimento aún existente. Además, aumentando el suministro de alimentos y limitando el crecimiento de la población drásticamente, el reducir las pérdidas de alimentos que se producen a lo largo de la producción de alimentos, cosecha, postcosecha y comercialización parece ser una opción viable.

La reducción de las pérdidas de alimentos es particularmente un problema para los pequeños agricultores de países en desarrollo que producen más del 80% de la comida. El secado solar se practica desde tiempos inmemoriales para conservación de cultivos alimenticios y agrícolas. Esto se hizo particularmente mediante el secado al sol al aire libre bajo el cielo abierto. El secado es un proceso relativamente lento, pueden ocurrir pérdidas considerables.

Los secadores solares utilizados en la agricultura para el secado de alimentos y cultivos son utilizados para procesos de secado industrial. Son un dispositivo muy útil desde el punto de vista de la conservación de la energía. Ahorra energía y también ahorra mucho tiempo, hace que el proceso sea más eficiente y también protege el medio ambiente. Los secadores solares eluden algunas de las principales desventajas del secado clásico. El secado solar se puede utilizar para todo el proceso de secado o para complementar los sistemas de secado artificial, reduciendo así la cantidad total de energía del combustible requerido.

Tres barreras clave para aumentar el uso del secado solar de cultivos son:

- La falta de conciencia de la rentabilidad del secado solar sistemas
- La falta de buena información técnica.
- La falta de buena experiencia práctica local

Es sorprendente que un proceso utilizado como comúnmente como el secado solar ha recibido tan poco desarrollo técnico. Con el enorme tonelaje de materiales procesados por este método, mayor esfuerzo en su desarrollo y mejora parecería estar en orden. No es descabellado creer que la anualidad se podría lograr un ahorro de millones de dólares reduciendo los costos de secado, mejorando la calidad de los productos y reducir las pérdidas por deterioro, retrasos en el transporte [19].

2.1 Secadores Solares en Otras Regiones

Los países en desarrollo fueron discutidos por Saif-UI-Rehman, presentando en detalle el análisis de las dificultades en el camino de la energía solar utilización debido a las limitaciones económicas en comparación con los combustibles convencionales [20].

El método tradicional de secado solar en la región de Asia-Pacífico es mediante secado al aire libre donde el producto se expone directamente al sol. Habiendo visitado una serie de países, Ong estudió los numerosos diseños disponibles para energía solar secándose en esta región. Tres tipos de secadores solares considerados por Ong por tener el mejor potencial de desarrollo en la región de Asia-Pacífico, a saber, el secador solar tipo armario de convección natural, el secador solar indirecto de convección forzada y el secador solar tipo invernadero, fueron discutidos en detalle [21].

Vecchia et al. describió la metodología seguida y los principales resultados de un estudio, que se limitó a las formas térmicas de los consumos de energía, realizados bajo el contrato para la Comisión de las Comunidades Europeas. Los resultados de la investigación y los experimentos prácticos obtenidos en los últimos 20 años en Europa mostraron que el uso de colectores solares de placa plana en los procesos de secado tiene un gran potencial y permite reducir el consumo de combustible estimuladores del desarrollo del mercado de secadores solares no son sólo las

ventajas económicas directas sino también las necesidades sociales definidas en el nivel local en Polonia y Europa [22].

Arinze et al. se dieron cuenta de la necesidad de aplicar técnicas de secado artificial para reducir los riesgos de deterioro de los cultivos en el secado de cultivos forrajeros en el campo en el proceso de producción de heno en América del Norte, como una importante herramienta de gestión en la producción.

Se investigó el contenido de humedad de almacenamiento y se encontró que se lograron ahorros de tiempo y energía del ventilador de aproximadamente 30% y 45% mediante el uso del sistema de secado de aire calentado por energía solar en lugar del aire natural sistema en junio y agosto respectivamente para Saskatoon [23].

La aplicación de sistemas de secado solar fue introducida en Nepal para la conservación de alimentos y actividades generadoras de ingresos. Una encuesta a nivel nacional reveló que tres tipos de sistemas de secado solar eran de uso común, a saber, tipo gabinete para uso doméstico, tipo rack para comercial y tipo túnel para propósitos industriales. Las modificaciones en el diseño, los materiales de construcción y la capacidad fueron realizadas por Joshi et al. para satisfacer las necesidades locales y mejorar el rendimiento de estos tres tipos de secadores [24].

Oztek et al. investigó el estado actual de las prácticas de secado de cultivos agrícolas en Turquía, lo que brinda una perspectiva amplia sobre el énfasis del secado en el valor de mercado, producción anual y valores de exportación de algunos cultivos comercialmente importantes [25].

Salihoglu et al. investigó para encontrar una solución económica al problema de la gestión de lodos en la ciudad de Bursa, Turquía y recomendó encalado limitado y secado solar como alternativa hasta encalar únicamente los lodos deshidratados mecánicamente. Fue encontrado que, si se aplicara el método limitado de encalado y secado solar después de la deshidratación mecánica en lugar del método de solo encalado, la cantidad total de lodo a eliminar se reduciría

en aproximadamente un 40%, lo que a su vez conduciría a una reducción en el coste de transporte, manipulación y vertido [26].

2.2 Diseño, Desarrollo y Rendimiento de Diversos Tipos de Secadores

Sharma et al. presentó una revisión exhaustiva de los diversos diseños, detalles de construcción y principios de funcionamiento de paneles solares sistemas de secado energético. También se desarrolló un enfoque sistemático para la clasificación de secadores de energía solar [27]. Sistemas de secado solar de diferentes diseños y los procedimientos de prueba para secadores solares fue revisado por Sodha y Chandra [28]. Augusto León et al. presentó una revisión detallada de los parámetros generalmente utilizados en las pruebas y evaluación de diferentes tipos de secadores solares de alimentos, destacó las insuficiencias de los parámetros generalmente informados y los parámetros adicionales sugeridos. Con base en la revisión, se estableció un procedimiento propuesto, dando la metodología, condiciones de prueba y una muestra hoja de evaluación, que ayudaría en una evaluación inequívoca del rendimiento del secador solar y facilitaría la comparación de diferentes secadores solares de alimentos [29]. Ramana Murthy revisó varios aspectos de secadores solares aplicados al secado de productos alimenticios a pequeña escala y los tipos populares de secadores que se encuentran en la región de Asia-Pacífico y se discutieron nuevos tipos de secadores con tecnologías mejoradas.

La evaluación del rendimiento de la secadora se discutió en detalle. y se encontró que existe una forma más corta de estimar el rendimiento de una secadora [30]. Arata y Sharma investigaron más tecnología de conservación de alimentos adecuada y rentable para la implementación con recursos financieros limitados, lo que significa que los diseños simples discutidos en el documento se pueden fabricar usando herramientas simples y materiales relativamente baratos y disponibles localmente por industrias de pequeña escala [31]. Sharma et

al. presentó una investigación experimental de tres tipos diferentes de secadores solares basados en el principio de la convección natural y forzada y los esfuerzos se hicieron para seleccionar el diseño más apropiado para ser utilizado en un hogar, una granja a escala industrial [32].

Diferentes tipos de aire activo tipo de colectores solares fueron examinados por Henriksson y Gustafsson, para dos aplicaciones principales a saber, el secado de cultivos agrícolas y calefacción de casas de animales [33]

Tipos de colectores solares de calentamiento de aire de circulación natural:

Modelo-1: solo acristalamiento de plástico, absorbente de aglomerado pintado de negro y paso frontal.

Modelo 2: acristalamiento de plástico simple, absorbente de placa plana pintado de negro andfront-pass.

Model-3: acristalamiento de plástico simple, pintado de negro en zigzag absorbedor de placa y paso frontal;

Modelo-4: acristalamiento de plástico simple, negro absorbedor de placa plana pintado y back-pass.

Modelo-5: acristalamiento de plástico simple, absorbedor de placa en zigzag pintado de negro y back-pass.

Modelo-6: doble acristalamiento de plástico, absorbedor de placa plana pintado de negro y back pass.

Los modelos mencionados fueron diseñados, contruidos y analizados para su actuación de Turhan Koyuncu. Se informó a partir de los resultados de la investigación que las actuaciones de Modelo-1, Modelo-2, Modelo-3, Modelo-4, Modelo-5 y Modelo-6 fueron 42,11%, 45,88%,

44,23 %, 39,76 %, 39,05 % y 36,94 % respectivamente, y el rendimiento del colector más eficiente (Modelo-2) es de aproximadamente 9 % más que el menos eficiente (Modelo-6) [34].

Othman et al. desarrolló cuatro sistemas de secado asistidos por energía solar, a saber, el Colector solar de ranura en V, el colector solar de doble paso con sistema de almacenamiento integrado, el sistema de deshumidificación asistido por energía solar para hierbas medicinales y el sistema colector térmico fotovoltaico (PVT), que tienen las ventajas de almacenamiento de calor, auxiliar fuente de energía, sistema de control de estructura integrado y se puede utilizar para una amplia gama de productos agrícolas [35].

Se instalaron calentadores de aire en granjas en Tennessee para suministrar calor para el secado de cereales y cultivos. Los calentadores fueron monitoreados telemáticamente por Womac et al. determinar el rendimiento térmico y permitir posteriores análisis de viabilidad económica. Los resultados del análisis térmico revelaron que los calentadores solares de aire funcionarán con éxito y proporcionan un aumento adecuado de la temperatura del aire durante la mayor parte del secado de cultivos [36].

Un colector solar simple con sistema de secado de cultivos fue descrito por Garg et al., con los objetivos categóricos de identificar un sistema de secado solar de capacidad media adecuado y estudiar analítica y experimentalmente las características de rendimiento de este sistema de secado solar recién fabricado [37].

Las ecuaciones de balance de energía para un secador de cultivo solar pasivo con lecho poco profundo, incluido el efecto de un reflector colocado sobre la pared de la chimenea se escribieron en términos de diseño y parámetros climáticos por Tiwari et al. Tomando en cuenta los efectos del almacenamiento térmico y el cultivo, análisis expresiones para la temperatura del aire de salida del colector y la temperatura del material de almacenamiento y el cultivo se

derivaron y en base a los resultados analíticos, se observó que el secado el tiempo se reduce significativamente debido al aumento de la energía térmica en el colector por el reflector [38].

Pitt consideró la relación entre la evaporación en bandeja y el secado de cultivos en el campo, después corte, y las fuentes de variabilidad en esa relación. La evaporación en bandeja se considera una medida climática que integra efectos de la temperatura, la velocidad del viento, la humedad y la intensidad solar sobre la velocidad de secado. El secado de cultivos se modeló como una difusión estocástica de moléculas de agua fuera de las superficies de cultivo. El modelo predijo la relación de humedad esperada es una función exponencialmente decreciente de la evaporación acumulada en la bandeja. Resultados de experimentos de campo mostró que la tasa de secado de cualquier muestra de forraje puede ser caracterizada con precisión por la constante de secado medida en relación con la evaporación en bandeja [39].

Chemkhi et al. presentó un estudio sobre comportamiento térmico de un calentador solar de aire como fuente de energía para el secado de productos agrícolas, con el propósito de calcular el fluido temperatura de salida, la energía de salida utilizada y la eficiencia térmica en función de la temperatura ambiente, la radiación solar incidente, el viento velocidad y caudal másico de aire [40].

2.3 Clasificación de los Secadores Solares

Hay una gran variedad de modelos de secadores solares. Básicamente, los secadores solares pueden clasificarse en tres grupos como se observa en la Figura 2.1.

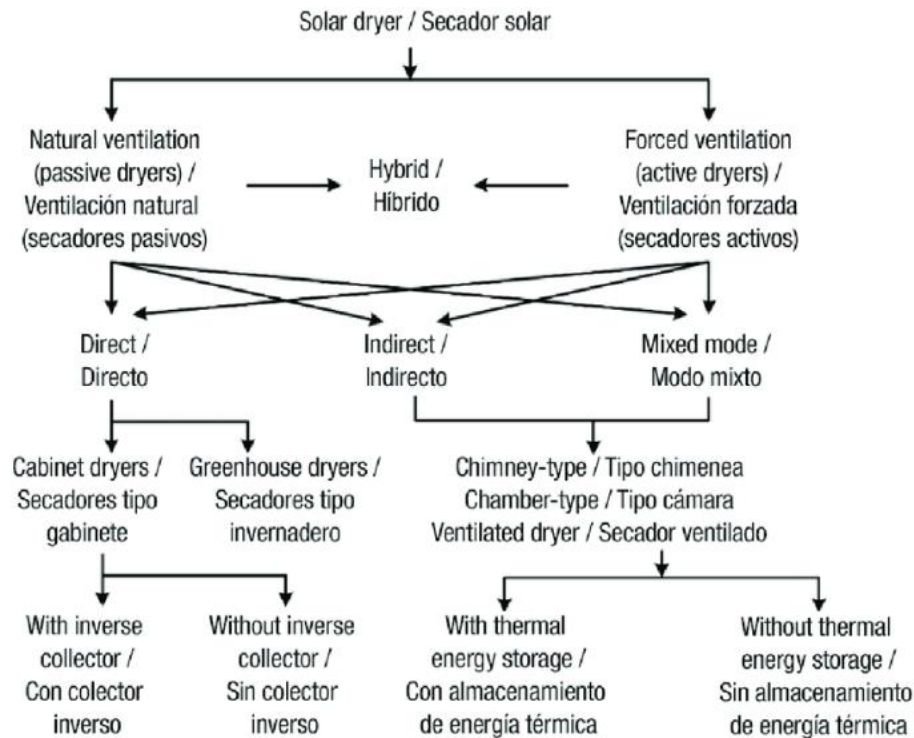


Figura 2.1 Clasificación de los secadores solares [41].

Secador Solar con Convección Natural. Los secadores solares utilizan la convección vertical natural que se produce cuando se calienta el aire. En general, los secadores de convección natural tienen un tamaño adecuado para su uso en la explotación.

La estructura consta de tres elementos principales: un colector solar, un depósito de secado y una chimenea solar. Los secadores de convección natural más pequeños son básicamente cajas de madera con rejillas de ventilación en la parte superior e inferior. Los alimentos se colocan en bastidores de alambre que se deslizan dentro de las cajas. En la parte inferior de las cajas se conecta un calentador solar de aire del tamaño adecuado con un panel de plástico orientado al sur y un absorbedor de metal negro. El aire entra por la parte inferior del secador solar y es calentado por el absorbedor de metal negro. El aire caliente sube a lo largo

de los alimentos y sale por las rejillas de ventilación de la parte superior. En funcionamiento, estos secadores producen temperaturas de 54 a 82°C.

Secador Solar de Convección Forzada. La convección se fuerza sobre los alimentos mediante el uso de un ventilador. En el caso de los secadores de convección forzada, la estructura puede ser relativamente similar. Sin embargo, el secador de convección forzada requiere una fuente de energía para que los ventiladores proporcionen el flujo de aire. El secador por convección forzada no requiere una inclinación para el flujo de aire, pero el colector puede colocarse horizontalmente con el ventilador en un extremo y la bandeja de secado en el otro.

Además, el secador de convección forzada depende menos de la energía solar, ya que proporciona el flujo de aire por sí mismo; esto permite que el diseño funcione en condiciones meteorológicas en las que el secador de convección natural no funciona. Dado que la ventilación inadecuada es una de las principales causas de pérdida de alimento en los secadores solares, y se ve agravada por el calentamiento intermitente, es esencial conseguir una ventilación adecuada. La adición de un flujo de convección forzada, por ejemplo, proporcionado por una célula solar fotovoltaica conectada a un ventilador, evitará la pérdida de alimentación [42].

Secador Solar de Convección Mixta. Son aquellos donde la colección de radiación se realiza tanto en el colector solar previo a la cámara de secado como en la misma cámara de secado.

El secador solar mixto presenta varias ventajas; en primer lugar, el control del proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores con circulación forzada de aire). Es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido. El tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara no permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite

secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder su calidad de aspecto por una exposición directa al sol.

Una desventaja de este tipo de secadores es el hecho de que, al añadir el colector previo a la cámara para recolectar energía solar, el tamaño del equipo y sus costos aumentan. Una segunda desventaja es que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita mover más kilogramos de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores directos [43].

2.4 Secado en Horas sin Sol

El diseño, la construcción y la evaluación del desempeño de un sistema pasivo de calefacción de aire alimentado por energía solar, que consta de un panel plano de acristalamiento simple de placas integrado con un material de cambio de fase (PCM), con un sistema de almacenamiento de calor para permitir el funcionamiento durante la noche y que tiene aplicaciones potenciales en el secado de cultivos y la incubación de huevos de aves de corral, fue presentado por Enibe. Los resultados mostraron que el sistema puede ser operado con éxito para aplicaciones de secado de cultivos [44].

Un prototipo de secador solar de frutas y verduras fue desarrollado por Akyurt y Selcuk, que comprende una cubierta de vidrio colector de placa plana que contiene virutas de metal, un secador con paredes translúcidas y un túnel aislado que los une. Pimientos y las uvas sultana se secaron a niveles de humedad comercialmente aceptables en varios tipos de condiciones climáticas y en varias velocidades del aire. Se llevó a cabo un análisis económico para investigar la posibilidad de utilizar varias fuentes de calor para un sistema de calefacción auxiliar que, al integrarse con el prototipo, permitirá operación en todo clima [45].

Sistemas de secado a base de desecante para funcionamiento nocturno.

El secado con aire calentado por energía solar es satisfactorio siempre que el sol está brillando. Para continuar este proceso durante la noche y los períodos nubosidad, es necesario almacenar parte de esta energía en una masa térmica o incorporar desecantes dentro del sistema de secado. Thoruwa et al. informó los resultados de los estudios realizados para desarrollar tres generadores solares de bajo costo basados en arcilla–CaCl₂ que son materiales desecantes sólidos. Establecieron su sorción de humedad y características de regeneración; evaluó su desempeño cuando en comparación con los desecantes comerciales y la integración de estos dentro de un sistema de secado solar de bajo costo para aldeas de pequeña escala secado de cultivos. Los resultados mostraron que la bentonita–CaCl₂ (tipo 1) el desecante dio una absorción de humedad máxima del 45% del peso seco (DWB) mientras que la bentonita–CaCl₂ (tipo 2) y la caolinita–CaCl₂ (tipo 3) cada uno de los desecantes sólidos dio valores de sorción de humedad del 30 % (DWB).

De las características de sorción de humedad y regeneración se concluyó que su aplicación en el secado solar de cultivos y la deshumidificación del aire es muy útil debido a sus bajas temperaturas de regeneración (por debajo de 100 °C) [46].

El modelo matemático del sistema Kathabar Spray-Cel desarrollado por Mahmouda y Ball se utilizó para predecir la relación de temperatura y humedad del aire en la entrada del silo de secado. El modelo de enfriamiento de grano inestable existente fue modificado y acoplado con el modelo de sistema desecante líquido para estudiar la factibilidad de usar el sistema de aire desecado en aplicaciones de secado y el modelo mostró la inviabilidad de usar aire desecado para el secado de granos. El sistema desecante líquido fue modificado para simular el funcionamiento adiabático y acoplado al secado modelo y el nuevo sistema dieron resultados mucho mejores, pero se predijo que el secado de granos sería económicamente inviable [47].

Thoruwa et al. describió algunas de las actuaciones de un secador de maíz desecante solar autónomo desarrollado para uso del pueblo en Kenia. Dado que la mayoría de los desecantes comerciales eran costoso, se fabricó un desecante sólido de bajo costo a partir de bentonita. Los materiales de arcilla y cloruro de calcio, que es capaz de regenerarse a 45 °C, tiene una alta absorción de humedad del 45% (DWB), significativamente prolonga el proceso de secado por la noche y reduce la contaminación del grano por aflatoxinas. Se realizaron pruebas de laboratorio y de campo para determinar el rendimiento de secado y los resultados mostraron que el secador prototipo tenía la capacidad de secar 90 kg de maíz fresco del 38 % (DWB) al 15 % (DWB) en 24 h [48].

2.5 Sistema de Deshidratación

Un deshidratador solar es un dispositivo que remueve la humedad de los alimentos para ayudar a su preservación por períodos prolongados. Una secadora de alimentos usa una fuente de calor y un flujo de aire para reducir el contenido de agua del alimento. La mayoría de las frutas y vegetales tienen un elevado contenido de agua, que va del 80 al 95% en la mayoría de los casos.

El funcionamiento de esta máquina es bastante sencillo. Mediante una rejilla inferior se introduce aire frío o templado (T aproximada 20° C) que pasa por un conducto donde mediante los rayos del sol se calienta (T aproximada 60° C). Luego se le hace circular por una serie de rejillas donde están depositados los alimentos que vamos a deshidratar. El calor evapora el agua depositada en los alimentos y posteriormente se vierte a la atmósfera.

Principalmente el aire entra fresco y con una humedad relativa media en el colector. El calor proporcionado por el sol hace que la temperatura del aire suba y que este adquiera la capacidad de contener más humedad. Como no hay aporte externo de humedad, su humedad relativa baja. Después de todo el proceso anterior el aire caliente y con baja humedad relativa

proveniente del colector solar eleva la temperatura de los productos y hace que en estos se evapore el agua que contienen. El aire cálido y seco absorbe con facilidad la humedad que ha soltado el producto.

Sistema de circulación del aire La circulación de aire en torno al producto a deshidratar es muy importante, ya que evacua la humedad ya extraída manteniendo un ambiente seco lo que acelera la deshidratación. Atendiendo a la técnica que se emplee para mover el aire existen dos sistemas:

- **Circulación por convección natural:** Se trata del movimiento natural de ascensión del aire caliente. El aire al calentarse disminuye su densidad y tiende a ascender sobre el medio más denso. Este fenómeno es llamado convección. En los deshidratadores solares se utilizan este movimiento natural del aire para hacerlo pasar por donde se encuentra el producto a desecar y posteriormente sacarlo del sistema. La salida del aire crea una depresión que provoca que el aire fresco del exterior entre en el sistema y sea de nuevo calentado reciclando el proceso. Mientras exista aporte de calor solar la circulación por convección se mantiene. Esta técnica es adecuada para pequeños sistemas de deshidratación natural.
- **Circulación por convección forzada.** Empleando medios eléctricos como un extractor o un ventilador se puede forzar el movimiento del aire. Este sistema es adecuado para sistemas más grandes y complejos. Tiene el inconveniente de que requiere un aporte externo de energía, aunque si se emplean paneles fotovoltaicos, toda la energía del sistema podría provenir del sol.

Capítulo 3. Marco Teórico

El secado (o deshidratación) es un proceso simple de exceso eliminación de agua (humedad) de un medio natural o industrial producto para alcanzar la especificación estándar de contenido de humedad. Es una operación intensiva en energía. Especialmente se encarga de reducir el contenido de humedad de los alimentos, estos tienen en general un contenido de agua mucho mayor (alrededor de 25% - 80%, pero generalmente para productos agrícolas alrededor 70%) que el adecuado para una larga conservación. Reduciendo el contenido de humedad de los alimentos hasta cierto nivel se ralentiza por la acción de enzimas, bacterias, levaduras y mohos. Por lo tanto, los alimentos se pueden almacenar y conservar durante mucho tiempo sin que se echen a perder.

El más amplio entre los métodos de secado es el secado por convección (donde el calentamiento tiene lugar por convección entre el aire caliente y la superficie de los productos), es decir, secado por flujo aire calentado que circula por el lado superior, inferior lado o ambos, o a través de su masa. El aire caliente calienta el producto y transporta la humedad liberada a la atmósfera [49].

Básica por la que el agua que contiene un sólido o una disolución (generalmente concentrada) se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los gradientes de actividad de agua (a_w) entre ambas fases (Fig.3.1) [50].

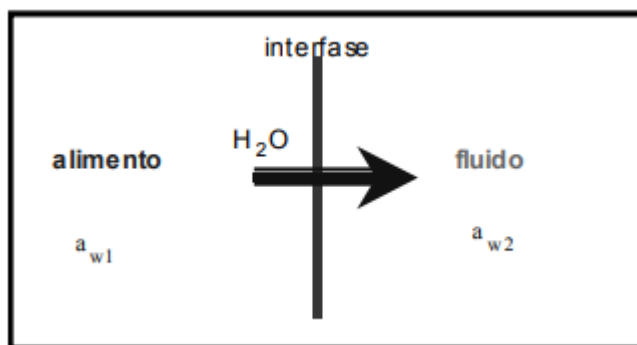


Figura 3.1 Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de a_w [50].

3.1 Técnicas de Eliminación de Agua en Productos Agroalimentarios

La desecación puede llevarse a cabo por diferentes métodos, mecánicos y fisicoquímicos. Veamos de manera resumida en qué consiste cada uno de ellos.

- **PRENSADO:** También llamado compresión, es una operación que tiene por finalidad separar un líquido de un sistema de dos fases sólido-líquido, comprimiendo el sistema en condiciones que permitan al líquido fluir y salir mientras el sólido queda retenido entre las superficies compresoras.

- **CENTRIFUGACIÓN:** Al aplicar a un material mojado una fuerza centrífuga suficientemente elevada, el líquido contenido en el material se desplaza en la dirección de la fuerza, produciendo así una separación del líquido y del sólido.

- **EVAPORACIÓN SUPERFICIAL:** Cuando un producto se somete a la acción de una corriente de aire caliente, el líquido que contiene se evapora aumentando su contenido en el aire. Se produce así una desecación. Este es el método más utilizado, también llamado deshidratación por aire caliente.

- **ÓSMOSIS:** Cuando un producto se sumerge en una disolución concentrada de sal o azúcar, se produce un flujo de agua desde el interior de las células del alimento hacia la disolución más concentrada a través de una membrana semipermeable (membrana celular). Este flujo se establece a causa de una diferencia de potencial químico del agua en el alimento y en la solución que lo rodea.

- **LIOFILIZACIÓN:** En esta operación, el líquido a eliminar, previamente congelado, se separa del producto que los contiene por sublimación. De ahí que sea necesario partir del material congelado y trabajar en condiciones de vacío.

- **ABSORCIÓN:** La absorción es una operación aplicada a gases, en la que uno o varios componentes de una mezcla gaseosa se disuelven en un líquido. En el caso de la desecación, el componente que se solubiliza es el vapor que se quiere eliminar del gas en cuestión. Como ejemplo puede citarse la desecación de gases mediante ácido sulfúrico.

- **ADSORCIÓN:** Es difícil una definición simple de adsorción por lo que nos limitaremos a dar un ejemplo: la eliminación del agua contenida en el aire mediante adsorbentes como el gel de sílice.

- **CONGELACIÓN:** Cuando se congela una sustancia que contiene un líquido, éste se separa paulatinamente en forma sólida produciendo una concentración del material que contenía disuelto o bien, cuando se encuentra en cantidades pequeñas, desecando el material.

De todas estas técnicas, las más utilizadas en la deshidratación de productos agroalimentarios son la **evaporación superficial** (secado por aire caliente, secado a vacío, secado solar y secado por microondas), la deshidratación osmótica (convencional, a vacío o propulso de vacío) y la **liofilización**. En ocasiones estas técnicas se combinan para la obtención de un determinado producto (Deshidratación osmótica + secado por aire caliente), o bien constituyen operaciones previas o pretratamientos en un proceso (ej. deshidratación osmótica como pretratamiento para la elaboración de mermeladas).

3.2 Consumo de Energía en la Deshidratación de Productos Agrícolas

Frente a otros procedimientos de preservación de alimentos, la deshidratación presenta algunas ventajas importantes tal y como se ha comentado anteriormente (fácil embalaje y almacenamiento; ahorros considerables en el transporte, facilidad de utilización con otros métodos combinados en la producción de alimentos de humedad intermedia). Estas ventajas son

especialmente interesantes en países en vías de desarrollo. Sin embargo, los consumos de energía utilizada en los actuales procesos de deshidratación son muy importantes.

Existen varias soluciones posibles:

a) Modificación de los procesos y las técnicas de deshidratación actualmente utilizadas. En este sentido, la “eficacia” de los deshidratadores industriales deberá ser modificada con objeto de buscar un máximo rendimiento energético en los mismos. Esta es la tendencia de los ensayos que actualmente se realizan para el secado de productos a temperatura ambiente.

b) Utilización de energías alternativas. De todas las energías alternativas, la utilización de subproductos agrícolas directamente como combustibles y de energía solar parecen ser las que más posibilidades presentan. Los subproductos agrícolas pueden dividirse en general en dos grandes grupos: restos de plantas que tras la recolección quedan habitualmente en el campo y subproductos de la industrialización de los productos agrícolas. La valoración de residuos sólidos orgánicos es una tendencia muy actual, que algunos consideran incluso como la energía del futuro.

Dada la importancia que tienen los aspectos energéticos en las operaciones de deshidratación se abordan en el siguiente apartado los aspectos más relevantes relacionados con las distintas fuentes de energía utilizadas en estos procesos.

3.3 Fuentes de Energía Utilizadas en Deshidratación de Alimentos

Uno de los criterios de clasificación de tipos de secadores se basa en la manera de transmitir el calor, fundamentalmente, por convección, conducción y radiación. Los distintos mecanismos de transporte de calor implicados en el secado van a repercutir notablemente en la

cinética del proceso y por tanto en los costes totales, pero para asegurar esto último deberá tenerse en cuenta además qué fuentes de energía pueden ser utilizadas para el funcionamiento de los equipos de secado.

3.3.1. Generación de Aire Caliente

En los secadores convectivos, el aire caliente es impulsado a través del secador por medio de ventiladores. Las fuentes de energía utilizadas para calentar el aire son muy variadas, entre ellas el gas natural ofrece mayor flexibilidad y una respuesta más rápida a menor coste, y también permite trabajar a temperaturas más altas. Sin embargo, los requerimientos de seguridad son muy estrictos o rigurosos. El propano tiene características similares al gas natural, pero es más caro.

La mayoría de los secadores son calentados con vapor evitando así el contacto del producto que se está secando con los productos procedentes de la combustión. Las temperaturas que se consiguen en este caso son limitadas (normalmente entorno a los 150°C), sin embargo, presentan con frecuencia problemas de mantenimiento por obstrucción de las aletas del intercambiador de calor debido a la formación de depósitos.

3.3.2. Transporte de Calor por Conducción

El transporte de calor por conducción o secadores indirectos son más apropiados para productos finos o sólidos muy húmedos (líquidos pastosos o viscosos). El calor de evaporación se proporciona a través de superficies calentadas (en reposo o en movimiento) colocadas directamente en contacto con el material a secar. El calentamiento de estas superficies se realiza normalmente mediante vapor. El agua evaporada se elimina mediante una operación de vacío o

a través de una corriente de gas cuya función principal es la de eliminar agua (y no calentar como es el caso de los secadores convectivos). Para sólidos sensibles al calor se recomienda la eliminación del agua mediante una operación de vacío. La eficiencia térmica en los secadores por conducción es bastante alta dado que no existen tantas pérdidas de entalpía como en el caso de los secadores convectivos. Como ejemplos de secadores indirectos pueden citarse los secadores de palas para el secado de pastas, los secadores rotatorios con tubos internos de vapor y los secadores de tambor para el secado de compuestos acuosos.

En muchos casos lo más eficaz es combinar este sistema de calefacción con el calentamiento por aire. Los equipos que disponen de varios sistemas de calefacción tienen como ventaja su versatilidad, ya que pueden trabajar con uno u otro sistema y con ambos, según el material que se desee secar.

3.3.3 Utilización de Energía Radiante

Energía solar

El secado solar al aire libre ha sido utilizado desde tiempos inmemorables para el secado de carne, pescado, madera y otros productos agrícolas como medio de conservación. Sin embargo, para la producción a elevada escala industrial el secado solar presenta ciertas limitaciones, entre las cuales pueden destacarse el elevado coste de mano de obra, equipos de grandes superficies, dificultades en el control del proceso de secado, posibles degradaciones debido a reacciones bioquímicas o microbiológicas, infección por insectos. Con objeto de aprovechar los beneficios de la fuente de energía limpia y renovable proporcionada por el sol, se han realizado numerosos intentos en los últimos años para desarrollar el secado solar principalmente para la conservación de productos agrícolas y forestales. Entre las ventajas que

presenta el secado solar, la más destacable es la energía que utiliza (limpia, renovable y que no puede ser monopolizada).

Calentamiento por infrarrojos

El calentamiento por infrarrojos (IR) durante el secado de productos, no es un método muy común, pero su aplicación se ha incrementado en los últimos años. Aunque este tipo de transmisión de calor se utilizó de forma accidental en el pasado, acompañando otros tipos de transferencia de calor durante el secado, los secadores por infrarrojos se diseñan en la actualidad para utilizar el calor radiante como fuente primaria de energía. Las aplicaciones más frecuentes del secado por IR son los procesos de secado de películas de recubrimiento y membranas, y para corregir perfiles de humedad en el secado de papel y tablas.

Sandu planteó como ventajas del secado por IR en alimentos, su versatilidad, sencillez de los equipos requeridos, su fácil combinación con el secado convectivo, conductivo y microondas, y también un ahorro importante de energía.

Calentamiento dieléctrico y por microondas

Los términos dieléctrico y microondas son algo confusos y deben ser definidos lo mejor posible. Lógicamente el término calentamiento dieléctrico puede ser aplicado a todas las frecuencias electromagnéticas superiores o iguales al espectro de infrarrojos. Generalmente se dice que el calentamiento dieléctrico se realiza a frecuencias entre 1 y 100 MHz, mientras que el calentamiento por microondas funciona entre 300 MHz y 300 GHz., los métodos de generación y equipos son diferentes.

Los parámetros que gobiernan el calentamiento son: la masa del material, su calor específico, propiedades dieléctricas, geometría, mecanismos de pérdida de calor y la eficiencia acoplada, es decir la relación entre la potencia aplicada y la potencia absorbida por el material. Una lista de **ventajas** de **calentamiento** por microondas y dieléctrico incluiría lo siguiente:

- La rapidez del proceso.

- Calentamiento uniforme.

- La eficiencia de conversión de energía. En este tipo de calentamiento, no se invierte energía en calentar el aire, las paredes del horno, u otros elementos, lo cual puede conducir a un ahorro importante de energía.

- Mejor y más rápido proceso de control. La naturaleza instantánea del “on-off” de calentamiento y la facilidad para cambiar el grado de calentamiento controlando la potencia del generador implica rapidez, eficiencia, y control exacto del calentamiento.

- Requerimientos de espacio menores debido a la rapidez de calentamiento [50].

3.4 Cinética de Secado

La cinética de secado de un material relaciona la variación del contenido de agua del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo. Son varios los factores que influyen sobre la cinética, entre los cuales se encuentran; la humedad del aire de secado, el mismo contenido de agua del producto por secar, como también las dimensiones y diseño del equipo de secado.

A partir de curvas de cinética de secado, que pueden ser obtenidas a nivel de laboratorio, puede hacerse una idea del tiempo de secado, del consumo de energía, del mecanismo de migración de humedad, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables del proceso, tales como: temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire [51].

Generalmente al modelar un proceso de secado se presupone las siguientes condiciones:

- La forma y el tamaño de la superficie activa de intercambio se consideran constantes.
- Al inicio del proceso, el sólido tiene el mismo contenido de agua inicial en cualquier punto, presentando una homogeneidad en la distribución de agua en la matriz sólida.
- Los coeficientes de transferencia de calor y masa se mantienen constantes durante el proceso de secado.
- En la interfase el sólido y el aire están en equilibrio [51].

3.5 Principios de Secado

Sólo una breve descripción de los principales fenómenos que gobiernan el proceso de secado por circulación de aire caliente se da para introducir o refrescar la memoria del lector a los principios de secado. Estos principios se aplican, en general, al secado mecánico convencional y aquí se refieren principalmente al secado solar indirecto. En general, debe ser señalado que los principios y fenómenos de secado convencionales son independientes del tipo de energía utilizada. Ekechukwu (52) brinda una revisión integral de los principios y teorías fundamentales que rigen el proceso de secado.

La mayor parte de la energía consumida durante el secado es para transformar el agua líquida en su vapor (2258 kJ/kg a 101,3 kPa). El agua puede estar contenida en varias formas, por ejemplo, como agua libre, agua ligada, etc., que se relaciona directamente con la tasa de secado. El agua retenida libre o suelta se considera como sin consolidar y el producto no es higroscópico.

El contenido de humedad se expresa en base seca o húmeda, p.ej. el contenido de humedad en base húmeda (W) es el peso de la humedad por unidad de material húmedo:

$$W = \frac{m_w}{m_w + m_d} \quad \text{kg por kg de mezcla} \quad (3.1)$$

y en base seca (X), se expresa como la relación entre el contenido de agua y el peso del material seco:

$$X = \frac{m_w}{m_d} \quad \text{kg de agua por kg de materia seca} \quad (3.2)$$

Donde son:

m_w = masa de agua

m_d = masa de sólido seco.

La forma más conveniente de expresar la humedad para los cálculos matemáticos es en base seca, pero para los productos agrícolas, el contenido de humedad normalmente se expresa en base húmeda.

3.5.1 Tasa de Secado

Una magnitud muy importante es la velocidad de secado, determinada por la temperatura y el contenido de humedad del producto como, así como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire de secado. Los productos agrícolas son higroscópicos y por lo tanto, la velocidad de secado es de suma importancia. La tasa de secado tiene normalmente dos fases diferentes:

- Fase I, un período inicial de velocidad constante durante el cual la superficie se satura con vapor y tiene lugar la evaporación continuamente ya que en la superficie del material hay suficiente agua evaporarse
- Fase II, el período de tasa decreciente, cuando la superficie no está saturado de vapor, es decir, en el punto crítico. Humedad la difusión está controlada por el movimiento interno del líquido mientras que la superficie se agota continuamente en agua. También se define un segundo período de caída:
- Fase III, la segunda parte del período de tasa decreciente, donde el contenido de humedad continúa disminuyendo hasta que se alcanza el equilibrio y se detiene el secado. Esta segunda caída período se refiere a productos higroscópicos.

Para la mayoría de los productos, el secado se detiene antes se alcanza la fase III. El tiempo de secado de cada período depende de la naturaleza del producto y de las condiciones de secado. Muchos productos alimenticios no muestran en absoluto una fase de tasa constante ya que muchos cultivos tienen un contenido inicial de humedad cerca del punto crítico y alcanzan rápidamente el punto crítico C, (Figura 3.2) donde comienza la fase II.

La figura 3.2 ofrece una vista general de las curvas trifásicas. AB es el tiempo empleado en calentar el material hasta que se alcanza la temperatura de secado. BC es la tasa constante secado, CE la tasa de caída de secado donde el flujo de humedad desde el interior de la masa se reduce continuamente. C es el punto crítico donde la superficie ya no está saturada y el comienza el período de tasa decreciente. En el punto E todavía hay humedad dentro del producto, se produce el movimiento del contenido de humedad lentamente por difusión y secado puede detenerse, p. en el punto D cuando se alcanza el contenido final de humedad. El período de secado de estos regímenes, para productos higroscópicos depende del contenido de humedad inicial y el contenido de humedad prescrito, para un almacenamiento seguro.

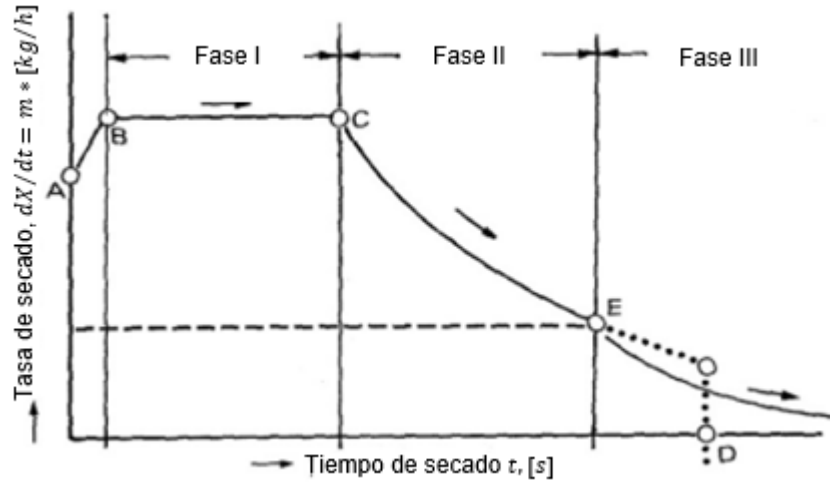


Figura 3.2 Curva de velocidad de secado, Fase 1,2,3 [53]

3.5.2 Actividad del Agua

La actividad del agua a_w , es de gran importancia para la conservación de los alimentos ya que es una medida y un criterio de los microorganismos crecimiento y probablemente liberación de toxinas, desarrollo de pardeamiento enzimático y no enzimático, etc. Para cada alimento o producto agrícola existe un límite de actividad por debajo del cual los microorganismos dejan de crecer. Beuchat [53], se refiere que la gran mayoría de las bacterias crecerán. En estos casos la actividad del agua se regula en detalle, después del secado por la adición de algunas soluciones de azúcares y almidón, los cultivos agrícolas, se encuentra en forma de una solución que contiene sales, azúcares, carbohidratos, proteínas, etc., que a temperatura constante se encuentran en equilibrio termodinámico. la actividad del agua entonces viene dada por la siguiente ecuación:

$$a_w = (P_w/P_w^*)_T \approx \varphi \quad (3.3)$$

Donde: P_w es la presión parcial de la solución de agua y p_w^* es la presión parcial del agua pura, a la misma temperatura. φ es la humedad relativa del material a la misma temperatura.

3.5.3 Contenido de Humedad de Equilibrio

El contenido de humedad de equilibrio se refiere a la humedad contenido cuando la presión de vapor ejercida por la humedad de producto es igual a la presión de vapor del aire ambiente cercano. Esto significa que la desorción de humedad del producto este en equilibrio dinámico con la absorción de la humedad del aire ambiental que contienen. Humedad relativa en este punto se conoce como la "humedad relativa de equilibrio", y se caracteriza por las curvas de parcelas de contenido de humedad contra la humedad de equilibrio conocidas como isothermas de equilibrio de humedad.

3.5.4 Isothermas de Sorción

Las isothermas de sorción son representaciones gráficas de la relación entre el contenido de humedad en la correspondiente actividad del agua a_w , en un rango de valores a temperatura constante. La Figura 3.3 presenta la absorción y desorción isothermas. Es obvio que tiene una ligera histéresis en reabsorbiendo agua cuando el producto se ha secado.

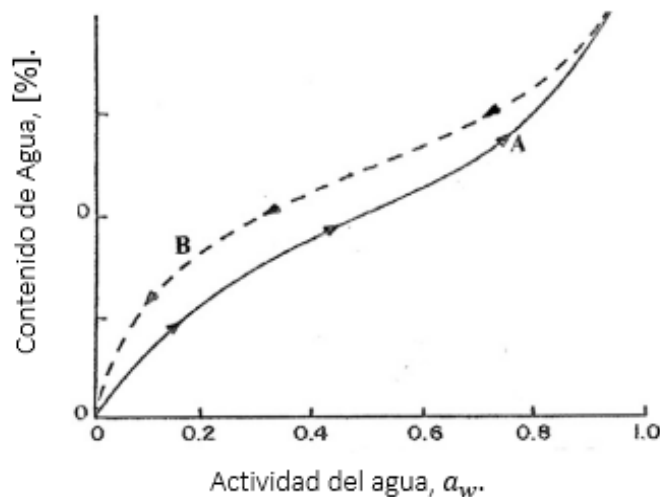


Figura 3.3 Isothermas de sorción. (A) Curva de absorción.

(B) Curva de desorción [53].

En literatura existen numerosos modelos matemáticos, relaciones teóricas, empíricas y semioníricas, desarrollado para diversos productos agrícolas, cultivos, granos, etc. Los tres modelos más utilizados en el secado de alimentos se describen aquí.

Las ecuaciones de sorción

Para describir los fenómenos de sorción se han propuesto varias ecuaciones matemáticas, pero solo la BET y las ecuaciones GAB son ampliamente aceptadas especialmente para cultivos. Se basan en la teoría de las capas moleculares de agua absorbidas en la superficie de los materiales, una modificación para Absorción multicapa, del agua [54], ecuación molecular monocapa.

$$a_w \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X_{mon}} \right) = \frac{1}{C \cdot X} \quad (3.4)$$

Donde son: X , el contenido de humedad en el momento de la observación período, X_{mon} , el contenido de humedad de la monocapa y C es La constante de Langmuir.

3.5.5 Secado en la Capa Final y Secado en el Lecho Profundo

La velocidad de secado está controlada por los factores externos del proceso y los mecanismos internos. Además de los factores externos, el tipo y el tamaño del producto también afectan la tasa de secado. Así, muchos productos, como frutas, verduras, Las frutas en rodajas son mejores para secarse en capas delgadas, pero granos, como maíz, frijoles, etc., se pueden secar en camas profundas, en secadoras o en contenedores.

Secado solar de capa delgada

Existen muchas ecuaciones teóricas y empíricas para secado de capa delgada que predice el rendimiento de secado para una variedad de productos agrícolas. En general se basan

suponiendo que la relación entre el volumen de aire al cultivo y el volumen es infinitamente grande. Teniendo en cuenta esta suposición de la tasa de secado depende solo de las propiedades del material para estar secado, su tamaño, la temperatura del aire de secado y el contenido de la mayor cantidad [55].

Secado solar de cama profunda

La figura 3.4 presenta un boceto de secado de cama profunda, donde se seca tiene lugar en zonas [56]. Eso es obvio ya que la zona inferior se seca rápidamente con el aire moviéndose hacia arriba, hasta la parte superior en esas zonas, aumentos en el contenido de humedad y se enfrían debido a la evaporación. Así un gradiente de temperatura y humedad relativa es forma entre la zona inferior y superior, que es una medida de la tasa de secado. El contenido de humedad final es la humedad media de las zonas. Los factores de secado crítico son: caudal de aire (el factor más importante), la temperatura del aire seco y la profundidad del lecho. Ajustando estos parámetros, se puede lograr una operación de secado moderada sin secar en exceso en la zona de material inferior [57].

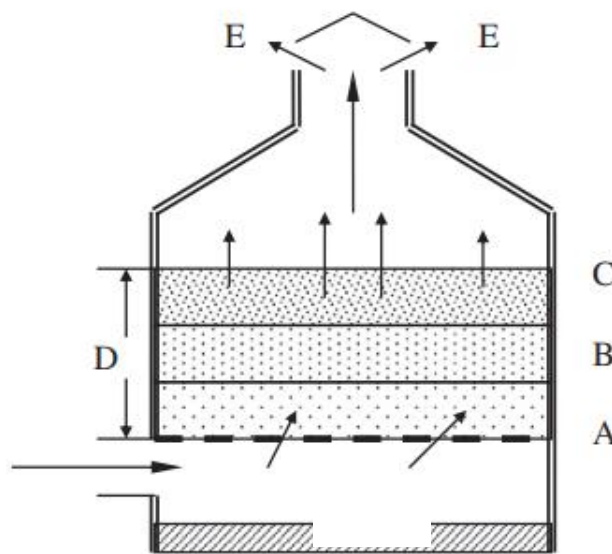


Figura 3.4 Zonas de secado de lecho profundo. D: Altura de la cama, A, B, C: Secado, E: Salida de aire [53].

3.6 Sistema de Secado

Todos los sistemas de secado se pueden clasificar principalmente según sus rangos de temperatura de funcionamiento en dos grupos principales de secadores de alta temperatura y secadores de baja temperatura. Sin embargo, los secadores se clasifican más ampliamente según sus fuentes de calefacción en secadores de combustibles fósiles (más comúnmente conocidos como secadores convencionales) y secadores de energía solar. Estrictamente, todos los diseños prácticos de secadores de alta temperatura funcionan con combustibles fósiles, mientras que los secadores de baja temperatura son sistemas basados en energía fósil o energía solar [57].

3.6.1 Tipos de Secadores

Los sistemas de secado de energía solar se clasifican principalmente según sus modos de calefacción y la manera en que se utiliza el calor solar. En términos generales, se pueden clasificar en dos grupos principales, a saber [57]:

Sistemas activos de secado de energía solar (la mayoría de los tipos de los cuales se denominan a menudo secadores solares híbridos).

Sistemas pasivos de secado de energía solar (convencionalmente llamados sistemas de secado solar de circulación natural).

Se pueden identificar tres subclases distintas de los sistemas de secado solar activos o pasivos, que varían principalmente en la disposición de diseño de los componentes del sistema y el modo de utilización del calor solar, concretamente [57]:

- Secadores solares de tipo directo (integral);
- Secadores solares de tipo indirecto (distribuido).
- Secadores mixtos

Las características principales de los diseños típicos de las diversas clases de secadores de energía solar se ilustran en la figura 3.5.

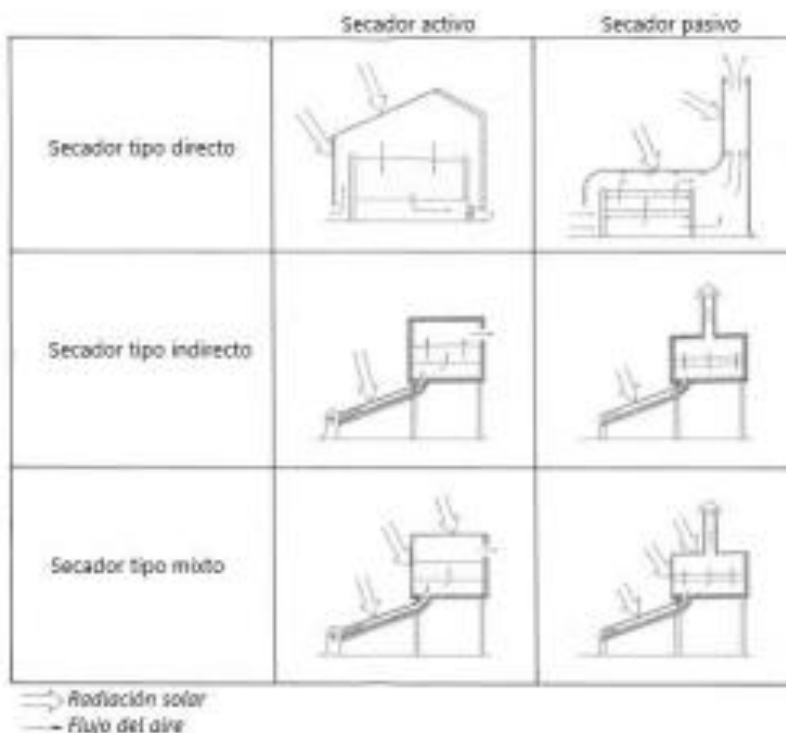


Figura 3.5 Diseños de secadores de energía solar [57].

3.6.2 Partes de un Deshidratador Solar

La mayoría de los deshidratadores solares están formados con:

1. Estructura: brinda el espacio para ser calentado, a la vez soporta la cubierta y las bandejas donde irá la fruta. Debe ser resistente y de dimensiones apropiadas, ya que, si es demasiado grande, se pierde la capacidad de deshidratar.

2. Cristal superior: para que la radiación solar entre en el espacio de secado y se produzca el efecto invernadero, lo cual implica que parte de la radiación solar que traspasa el material se queda en el interior, calentando el espacio. Se necesita que sea resistente a la intemperie y a los rayos de sol.

3. Bandejas: donde irán colocadas las frutas para secar. Se requiere que sean lo menos pesadas posible y que tengan en el fondo agujeros para el correcto paso del aire. Normalmente constituidas por un marco y una malla como fondo.

4. Cubierta: es lo que cubre a la estructura. Se requiere que sea resistente al ambiente y en ocasiones tenga la capacidad de cumplir la función de un aislante térmico.

5. Puerta: es indispensable para poder aislar el deshidratador y acceder al producto.

3.7 Proceso de Deshidratación de Alimentos

En este punto se mencionan los parámetros efectuados en un proceso de deshidratación.

3.7.1 Calculo de la Masa del Producto Húmedo

Para medir el contenido de agua de un alimento se puede hacer con la siguiente relación.

$$H_{bh} = \frac{ma}{ma+ms} = \frac{ma}{mt} \quad (3.5)$$

ma : Caudal de aire, [kg / s]

ms : Cantidad de producto en un determinado tiempo [kg / s]

La ecuación anterior nos relaciona la cantidad de agua perdida respecto a todo el sistema.

3.7.1 Calculo de la Masa del Producto Seco

Por otra parte, suele encontrarse en la literatura la humedad de algún producto expresada en base seca, [58, 59]:

$$H_{bs} = \frac{ma}{ms} \quad (3.6)$$

Esto es, la humedad perdida respecto a la muestra completamente seca o deshidratada.

Resulta muy sencillo relacionar un contenido con el otro.

$$H_{bh} = \frac{H_{bs}}{H_{bs}+1} \quad (3.7)$$

Esta ecuación está respecto a la humedad base húmeda en función de la humedad base seca.

Por otro lado, de la misma manera se puede ver a la humedad base seca en función de la humedad base húmeda.

$$H_{bs} = \frac{H_{bh}}{1-H_{bh}} \quad (3.8)$$

3.7.3 Calculo del Porcentaje de Solidificación en el Producto

Por otra parte, si se desea conocer la cantidad de sólidos que hay en un producto, puede determinarse con las siguientes ecuaciones:

Porcentaje de sólido seco

$$\% \text{ solido seco} = \frac{100}{H_{bs}+1} \quad (3.9)$$

Porcentaje de agua

$$\% \text{ agua} = \frac{100*H_{bs}}{H_{bs}-1} \quad (3.10)$$

3.8 Técnicas de Secado Solar

Las pautas de pretratamiento y procedimiento de secado se pueden encontrar en [60]. Es importante tomar en consideración que, para establecer el secado adecuado, los Procedimiento de temperatura y pretratamiento en relación con la secadora en uso, es necesaria la experimentación.

3.8.1 Temperatura Adecuada

La temperatura es importante para los productos agrícolas para mantener los valores de nutrientes, es decir, las vitaminas sensibles para calentar y retener color, sabor y olor. La temperatura de secado más baja comienza desde 30°C (85°F), pero alrededor de estas temperaturas, la velocidad de secado es muy lenta y existe el riesgo de deterioro o moldura. En el secado al aire libre del sol, las variaciones de temperatura están sujetos a la intensidad de la radiación solar y no están fácilmente controlado. Temperatura, varía de 40°C (140°F) a 70°C (158°F) y en algunos casos especiales, hasta 80°C (176°F), sin una unidad de almacenamiento de calor por calor intermedio, es decir usando calefacción directa desde la fuente de calor. Por lo tanto, la temperatura depende directamente de la intensidad de la radiación solar. En casos de altas intensidades de radiación se puede regular la temperatura mezclando aire caliente con la cantidad necesaria de aire fresco de la atmósfera.

En general, la mayoría de los alimentos se pueden secar a una temperatura media de 60°C (140°F). Algunos productos necesitan temperaturas bajas de secado al principio, por ejemplo, albaricoques, y después de ser una temperatura semi-secada, se puede elevar a un cierto punto adecuado. Esta técnica ayuda a mantener la piel del cultivo suave, como en muchos casos, una temperatura más alta endurecer esta piel.

3.8.2 Pretratamiento del Producto

Muchos cultivos, frutas y verduras se cultivan cerca del suelo y son susceptibles a la actividad de varios microorganismos. Deben, inmediatamente después de la cosecha si es posible, para ser tratado y seco. Esto se aplica a ambos métodos, secado directo e indirecto. El pretratamiento ayuda a reducir la velocidad la actividad de los microorganismos, suavizar la piel [60].

En general cada cultivo tiene sus propias condiciones óptimas de pretratamiento al secar. Los autores creen que las instrucciones dadas por [61] proporciona pautas útiles para secado solar:

- La mayoría de los recursos recomiendan el pretratamiento de los alimentos. como escaldar (hervir/cocer al vapor).
- Lavar a fondo los productos.
- El secado efectivo se logra con una combinación del calor y el movimiento del aire.
- Se debe eliminar entre el 80 y el 90 % del contenido de humedad.
- No se recomienda la luz solar directa.
- El proceso de secado no debe interrumpirse ni dejarse congelar.
- El período de secado típico varía de 2 a 3 días dependiendo sobre el sol, el movimiento del aire, la humedad, la cantidad y el tipo de producto
- Para un secado uniforme, las bandejas se deben rotar 180° diariamente.
- Material recomendado de las bandejas: rejilla de acero inoxidable, listones de madera con cubierta de gasa, teflón, recubierto de teflón fibra de vidrio, nailon, plásticos de calidad alimentaria.

Capítulo 4. Materiales y Métodos

4.1 Configuración del Sistema

Se uso una cámara de deshidratación con el objetivo de realizar pruebas experimentales, aprovechando la energía solar y teniendo en cuenta el diseño que ya se tiene, gracias al instituto tecnológico de Apizaco que nos prestó el deshidratador para el análisis de pruebas experimentales con distintos alimentos.

4.1.1 Características del Deshidratador Solar

La cámara de deshidratación consta de una estructura rígida y resistente a las condiciones ambientales y nos brinde un mayor soporte, los materiales de su construcción son de aluminio y acero. En la figura se observa la cámara de deshidratación.



Figura 4.1 Cámara de deshidratación

El diseño tiene el propósito de incrementar la temperatura en el interior de la cámara, en la parte superior se encuentra una placa de vidrio de espesor de 0.006 m, con dimensiones de 0.99 m de ancho y 0.90 m de largo, esta placa proporcionará un incremento de temperatura en su interior debido al ingreso de aire caliente que provoca el calentamiento interno por el efecto invernadero. Se tiene un aislamiento con material de placas de poliestireno expandido de 0.025 m de espesor con una conductividad térmica de 0.046 W/mk.

Dentro de la cámara de deshidratación se integran tres bandejas a través de ranuras rectangulares previstas en el lateral de la cámara, en su interior las bandejas tienen un arreglo de forma escalonada. Su construcción es con malla de alambre ya que permite que la evaporación del agua de un producto alimenticio sea más eficiente. Estas bandejas tienen el propósito de guiar al fluido y al mismo tiempo el fluido se distribuya por el área de las bandejas provocando la eliminación de humedad a los productos. Las bandejas cuentan con dimensiones distintas con lo que la primera (empezando de abajo hacia arriba), es de 0.15 m de ancho por 0.99 m de largo, la segunda es de 0.20 m ancho por 0.99 m de largo y la tercera de 0.25 m de ancho por 0.99 m de largo. Dentro de la cámara se tienen unas barras de aluminio que son las encargadas de sostener las bandejas y a su vez, poder deslizarlas para introducir el alimento a deshidratar. Las características de la cámara de deshidratación se muestran en la figura 4.2.



Figura 4.2 Características de la cámara de deshidratación

4.1.2 Geometría del Deshidratador Solar

La configuración de la cámara de deshidratación tiene estudios realizados por [62], ellos realizaron estudios comparativos de tres tipos de deshidratadores, el tipo de paso paralelo, el tipo gabinete y el tipo de paso horizontal. Estos estudios determinaron que el más eficiente es de tipo gabinete donde se obtuvo una temperatura máxima de 53 °C a convección natural y los otros dos tipos oscilaron en una temperatura de 38°C a 40 °C. El diseño de la cámara tipo gabinete se pueden insertar bandejas a través de ranuras rectangulares previstas en el lateral de la cámara. Para el secador tipo gabinete estudiado por estos investigadores, en su interior las bandejas tienen un arreglo de forma escalonada, con el objetivo que el fluido durante su recorrido ingrese por ellas permitiendo eliminar la humedad del producto.

4.1.3 Dimensiones del Deshidratador Solar

Dentro de la tecnología de secado solar, cuando la capacidad de producción es pequeña, se recomienda el uso de secadores tipo gabinete. Este tipo de secador básicamente está construido por una caja de madera con una cubierta transparente y bandejas en su interior donde se coloca el producto, la circulación del aire es por convección natural y a través de orificios.

- Las dimensiones están adoptadas con un ángulo de inclinación de 19° con respecto a la horizontal que tiene el sistema térmico, con el propósito de aprovechar la dirección con la que viene el aire.
- La salida de aire se encuentra por la parte de arriba, el cual ayuda a direccionar al flujo.
- Las dimensiones de la geométrica de la cámara se muestran en la figura 4.3, donde tiene un volumen de 0.20 m³, que permite a las bandejas ingresar libremente.

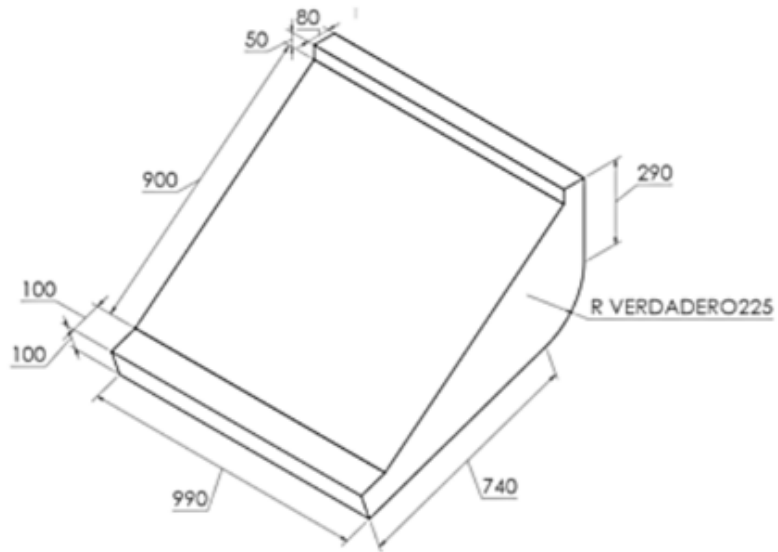


Figura 4.3 Dimensiones de la cámara de deshidratación

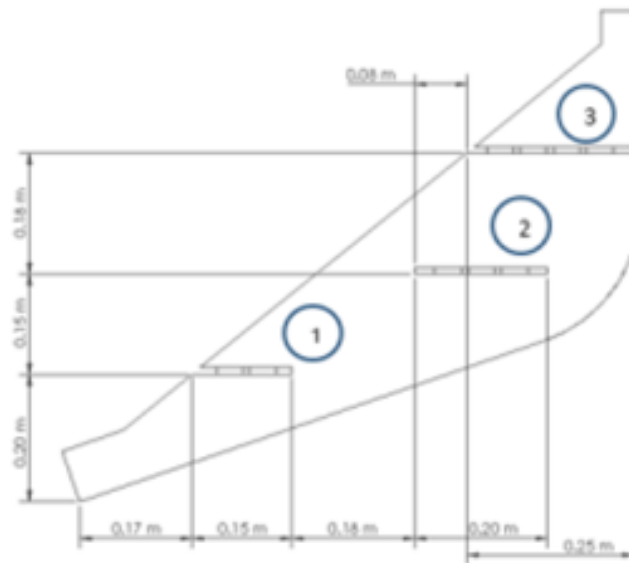


Figura 4.4 Ubicación de las bandejas en la cámara de deshidratación

4.2 Evaluación de las Condiciones Ambientales

A continuación, se describe detalladamente las características climáticas del lugar para la evaluación del deshidratador solar.

4.2.1 Lugar de Implementación del Deshidratador

El estudio incluye la evaluación de la eficiencia del deshidratador solar en el Instituto Tecnológico de Apizaco, ubicado en el municipio de San Andrés Ahuashuatepec de Tzompantepec en el mes de marzo del 2023, localizado en el estado de Tlaxcala, sus coordenadas geográficas son (19° 25' - 19° 20' de latitud norte y 98° 10' – 98° 5' de longitud oeste con una altura promedio de 2 380 metros sobre el nivel del mar).

4.2.2 Factores Ambientales del Lugar

Radiación solar

En la figura 4.4 se muestran los Datos de radiación solar global promedio, esta grafica se encuentra en [63] y se observa la radiación que se tiene en el último año. Para el estado de Tlaxcala, se tiene un valor de radiación global de 2364.7 kWh/m².



Figura 4.5 Radiación Solar en México [63]

Temperatura del aire

En la figura 4.5 se puede observar la temperatura en el estado de Tlaxcala y más específicamente en el instituto tecnológico de Apizaco, tenemos que la temperatura máxima extrema es de 48°C y la media ronda entre los 28°C y la temperatura mínima es de 8°C como media [64].

Cabe resaltar que la temperatura media de los días que se realizó el estudio con el deshidratador solar fue de 25°C

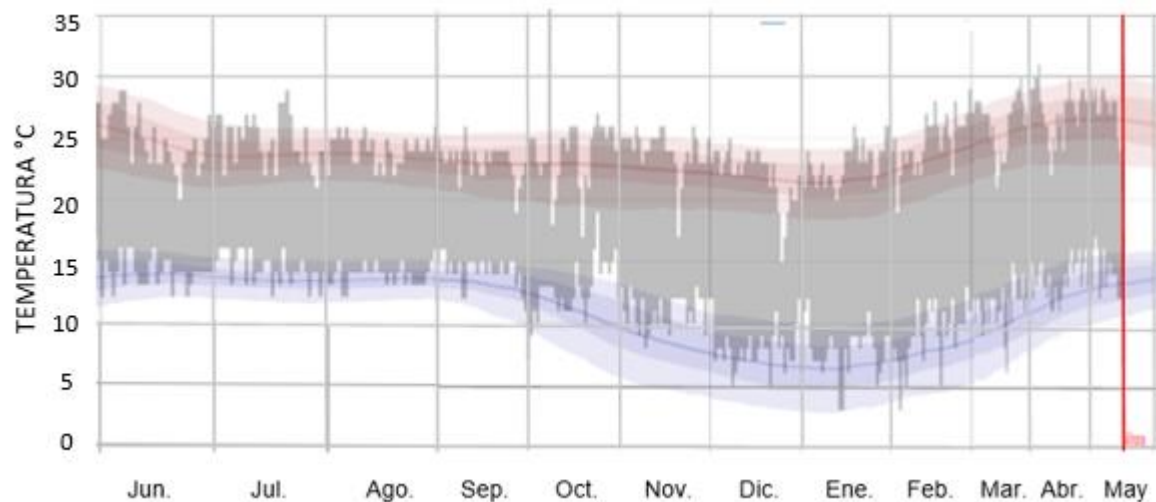


Figura 4.6 Temperatura del Aire en el Último Año [64]

El intervalo diario de temperaturas reportadas (barras grises) y las máximas (marcas rojas) y mínimas (marcas azules) de 24 horas, colocadas arriba del promedio diario de la máxima (línea rojo claro) y de la mínima (línea azul claro)

Velocidad del aire

Otro parámetro importante es la velocidad del aire, esto nos sirve para saber con qué velocidad entra al deshidratador y así con la temperatura del ambiente, saber cómo se comporta

dentro de la cámara a la hora deshidratar los productos. En la figura 4.6 se observa la velocidad del viento en los meses en los que se realizaron las pruebas, más concreto en el mes de marzo. Alcanzando ráfagas de viento de $9.7\text{ m/s} - 11.6\text{ m/s}$ y la velocidad media del viento esta entre los $3.3\text{ m/s} - 5.5\text{ m/s}$ [65].

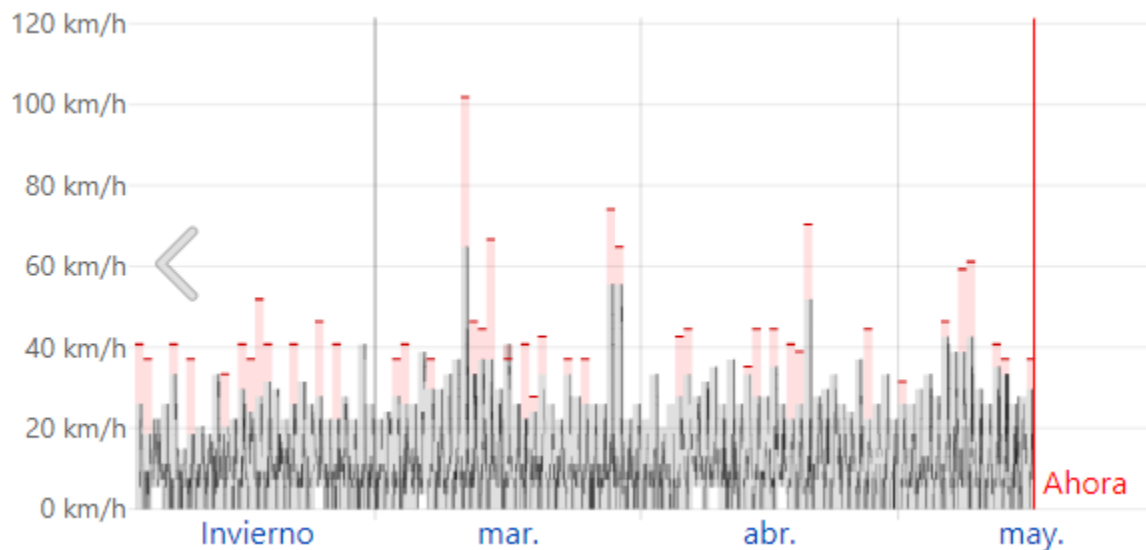


Figura 4.7 Velocidad del aire [65]

La gama diaria de velocidades del viento reportadas (barras grises), con velocidades máximas de ráfagas (marcas rojas).

4.3 Instrumentación

En esta sección se habla de los instrumentos de medición empleados para el registro de datos tales como la temperatura, velocidad del aire y la radiación, todos estos instrumentos fueron colocados en el deshidratador solar de una manera estratégica para medir la temperatura en distintos puntos dentro de la cámara, en cada una de las bandejas se colocó un termopar y los datos se registraron en un termómetro.

Tabla 4.1 Instrumentos de medición empleados

Dispositivos	Imagen	Descripción
Termómetro		Ofrecen una respuesta rápida y una precisión de laboratorio (0.05 por ciento + 0.3 grados C).
Sensor de temperatura (Termopar tipo K)		Termopar Tipo K , sigue siendo el termopar más utilizado para aplicaciones industriales. Está concebido principalmente para atmosferas neutras. La temperatura máxima en continuo se aproxima a los 1100°C.
Anemómetro (Mod. SDL300)		Los anemómetros miden la velocidad instantánea del viento, pero las ráfagas de viento desvirtúan la medida, de manera que la medida más acertada es el valor medio de medidas que se tomen a intervalos de 10 minutos.
Calibrador Vernier		Es un instrumento de medición que fue diseñado para medir con gran precisión, cabe mencionar que este dispositivo se utiliza para medir piezas pequeñas ya que los más comunes tan solo tienen 20cm de largo.
Balanza analizadora de humedad Mod.UCLA-006		El Analizador de Humedad se usa para determinar el contenido de humedad. Durante la operación de desecación, el equipo determina continuamente el peso de la muestra y presenta el resultado. Cuando la desecación termina, el resultado se muestra como % de contenido de humedad, % sólido, peso o % de tolerancia de humedad.

4.4 Proceso de Deshidratación de Alimentos

Un proceso de deshidratado bien realizado, permite que el producto final conserve entre el 50% al 80% de su contenido inicial de vitaminas.

Es importante que el secado sea gradual, homogéneo y no exceder ciertos valores de temperatura para no modificar la estructura del alimento ni afectar excesivamente su nivel de nutrientes y vitaminas.

Es importante utilizar alimentos en buen estado y respetar las prácticas de manufactura que se mencionan a continuación:

4.4.1 Sección de lavado y proceso de los alimentos

Los alimentos para deshidratar deben seleccionarse, separando aquellos que están en mal estado. Posteriormente se deben lavar con abundante agua. Es muy importante, luego de terminar las operaciones anteriores y con ayuda de una balanza, registrar y anotar el peso neto del producto que se va a someter al proceso de secado.

4.4.2 Operaciones de Partida Para el Proceso de Deshidratación

- No pretender deshidratar frutas o verduras de diferentes tipos al mismo tiempo, puesto que cada alimento necesita de condiciones diferentes durante el proceso de secado.
- Procurar que los alimentos en trozos deben ser del mismo tamaño y grosor para asegurar un deshidratado uniforme. Existen recomendaciones precisas sobre el grosor de corte para cada tipo de alimento, estos deben tener un grosor comprendido de entre 0.005m y 0.01m, si el corte es muy grueso, el exterior del

alimento al secarse más rápido forma una capa seca que dificulta eliminar la humedad del interior, por lo contrario, si los trozos son muy delgados, el producto puede quedar muy duro y correoso.

4.4.3 Carga del Deshidratador y Proceso de Secado

Una vez concluido el tratamiento previo de los alimentos, estos se colocan inmediatamente en las bandejas de deshidratados teniendo en cuenta lo siguiente.

- Los trozos deben tener el mismo grosor, deben colocarse en una sola capa y no debe haber piezas sobre puestas.
- Es conveniente que los bordes no se toquen para evitar que se peguen, es recomendable dejar siempre espacio entre las piezas para facilitar el flujo de aire caliente.
- Un punto importante es cargar el deshidratador solar a primeras horas del día para aprovechar al máximo la radiación solar y disponer de un termómetro que sea visible para supervisar la temperatura dentro del deshidratador en todo momento.
- Respetar las temperaturas máximas tolerables de cada alimento
- Es recomendable examinar el estado del deshidratador cada dos o tres horas
- No determinar el fin del secado al ojo, existen métodos para conocer el final del proceso.

4.4.4 Temperatura Adecuada en el Deshidratado de Alimentos

Cada alimento tiene que secarse por debajo de una temperatura máxima, aplicar una temperatura mayor hará que el alimento se cocine, incluso si esta es muy mayor al peso

recomendado, el exterior del producto se endurece formando una costra que impide que la humedad interna escape del producto.

La temperatura habitual para deshidratar alimentos oscila entre 50°C a 60°C. No obstante, lo anterior no es una regla general, hay que tener siempre en cuenta la temperatura máxima tolerable de cada alimento, en ocasiones se encontrarán alimentos que se deberán trabajar fuera de ese intervalo.

4.4.5 Tiempo de Deshidratado

El tiempo de deshidratado de frutas y verduras es muy variable y debido a eso se realizaron las pruebas experimentales para saber cuál es el tiempo indicado para el jitomate y el plátano. Depende el tipo de alimento, el tamaño de los trozos que se están deshidratando, la temperatura del deshidratador y la humedad en el aire.

En condiciones favorables, las frutas y verduras se deshidratan en un lapso de 12 a 18 horas (1 a 3 días si se hace en deshidratador solar). El deshidratado de frutas es mayor debido a la cantidad de agua que tienen por lo que suelen tardar 36 horas (2 a 5 días en un deshidratador solar).

En el tiempo de secado se distinguen tres etapas diferentes:

1. La etapa inicial del secado del producto, en la cual la velocidad con la cual se elimina la humedad en función del tiempo aumenta.
2. Un periodo de tiempo donde en donde la velocidad del de secado permanece constante.
3. Una vez que la humedad superficial a sido eliminada, la humedad interna comienza a ser eliminada y la velocidad de secado disminuye.

4.4.6 Evaluación del Final del Deshidratado

Es muy importante tener un método confiable para determinar el proceso de secado. Si el deshidratado es insuficiente, los productos se deterioran pasado poco tiempo de su deshidratación, por otro lado, si un alimento tiene un deshidratado excesivo el producto resultante suele adquirir textura y/o color poco aceptable y en general presentara baja calidad.

La forma adecuada de para determinar el final del deshidratado de frutas y verduras es controlando la pérdida de peso del producto que se está deshidratando, de aquí la importancia de tener el peso neto inicial de los alimentos a deshidratar (P_f).

Para llevar en práctica lo mencionado anteriormente es necesario hacer unos sencillos cálculos y conocer a fondo los siguientes conceptos:

- Contenido residual de humedad (H_s): Es el porcentaje de humedad recomendable que debe tener el producto seco, para garantizar una óptima calidad y condiciones de conservación. El H_s varía en función del tiempo del alimento y sus valores se encuentran en la tabla 4.2.
- Humedad del producto fresco (H_f): Es el porcentaje de agua que contiene el alimento antes de ser sometido al proceso de secado, su valor puede encontrarse de forma similar al de H_s , en tablas.
- Rendimiento teórico (R): Es un valor constante para cada tipo de alimento y se calcula mediante la siguiente formula:

$$R = (100\% - H_f) / (100\% - H_s) \quad (4.1)$$

El valor del rendimiento teórico (R), permite conocer el peso final del producto seco (P_s) con el contenido de humedad recomendable Haciendo un sencillo calculo:

$$P_s = R * P_f \quad (4.2)$$

El punto más importante para definir si el producto ya está completamente deshidratado es tener en cuenta el contenido residual de humedad (Hs), el cual no debe sobrepasar los valores recomendados.

De acuerdo con lo anterior, un determinado producto se deshidratará hasta el momento en que su peso corresponda al Ps anteriormente calculado [66].

<i>Alimento</i>	<i>Humedad del alimento fresco Hf (%)</i>	<i>Humedad residual del alimento seco Hs (%)</i>	<i>Temperatura máxima °C</i>
<i>Jitomate</i>	95	8	65
<i>Manzana</i>	84	14	50
<i>Plátano</i>	80	15	70
<i>Uva</i>	80	15 a 20	55
<i>Mango</i>	85	12 a 16	65
<i>Zanahoria</i>	70	5	60
<i>Papa</i>	75	12	55

Tabla 4.2 Tabla con valores de deshidratado de Agro alimentos [66]

4.5 Variables Estudiadas

Las variables por evaluar en el presente estudio con el prototipo de deshidratador solar casero fueron:

- La variación del peso de las muestras de agro alimentos: Plátano, Jitomate.
- La diferencia de eficiencia de secado del deshidratador solar con distintos alimentos con distintas características.
- Comparar la eficiencia del deshidratador solar en Apizaco con distintos productos
- Análisis de la variación de la temperatura ambiental vs al interior del deshidratador solar
- Determinación de la pérdida de humedad final de los frutos.

La evaluación de las variables antes mencionadas tiene una metodología la cual se inicia con 5 trozos cortados en rebanadas con grosores diferentes (cada producto), con un grosor de 0.005 m – 0.001 m, se colocaron en las bandejas y se observó el proceso de deshidratación.

Un dato importante fue la posición del deshidratador que tiene una posición de norte a sur la cual es favorable ya que recibe la mayor cantidad de energía solar a lo largo del día.

Ya con los trozos de fruta se inició la evaluación de las variables tales como la temperatura, velocidad del aire y radiación.

4.5.1 Variación del Peso de las Muestras: Plátano y Jitomate

Los trozos de frutas se pesaron antes de introducirlos en las bandejas correspondientes del deshidratador solar, se midió el peso inicial y peso final en gramos, se pesaron en una balanza analizadora de humedad siendo considerado este como el valor inicial. Una vez transcurrido el periodo de deshidratación se pesaron los trozos de frutas cada 24 horas de dos a tres días y se consideró como el peso final hasta llegar al peso constante. Posteriormente estos resultados se graficaron para ser mostrados en el apartado de resultados. Un dato importante de estas pruebas fue la cantidad de horas que se dejó expuesta a cada trozo de alimento y así mismo los diferentes grosores para analizar cuál es el tiempo ideal y el grosor más adecuado para deshidratar cada alimento. Todo esto para llegar a un peso constante.

4.5.2 Eficiencia del Deshidratador Solar a Diferentes Condiciones Ambientales

Se midió la eficiencia del deshidratador solar de las frutas antes mencionadas, haciendo el mismo procedimiento de colocar los cortes de las frutas en las bandejas, iniciando de las 9:00 horas a las 15:00 horas por día y todo esto proceso se realizó en el mes de marzo y abril del

2023, se midió el peso en gramos de las frutas cada hora, se tomó el porcentaje de peso perdido y teniendo en cuenta el peso que nos debe dar usando la Ecuación 4.1 y 4.2.

4.5.3 Análisis de la Variación de la Temperatura Ambiental vs la Temperatura Interior de la Cámara de Deshidratación.

Se midió la temperatura externa (T.E) que es la temperatura ambiental y además la temperatura interna (T.I) que es la temperatura dentro del deshidratador solar, con el objetivo de cuantificar como iba subiendo la temperatura dentro del deshidratador solar, durante el transcurso de las horas, se utilizaron termopares tipo K para registrar la temperatura interna de la cámara y gracias a [66] se obtiene la temperatura ambiente del lugar.

Capítulo 5. Resultados y Análisis

5.1 Análisis del Flujo de Aire Dentro del Colector

En el periodo de pruebas se analizaron las temperaturas que alcanza el deshidratador solar, la temperatura varea dentro de la cámara, se tomó un registro de datos desde la entrada y salida de temperatura, como en cada nivel del deshidratador donde se tiene una bandeja para colocar el producto a deshidratar.

La temperatura promedio en el medio ambiente es de 23°C a 27°C y dentro de la cámara es de 45°C a 55°C, una recomendación para la deshidratación de alimentos es que la temperatura no exceda los 60°C.

5.2 Muestreo del Producto en una Balanza Analizadora de Humedad

Se realizó una prueba en una balanza analizadora de humedad, fue usada para determinar el porcentaje de humedad del producto, peso del producto húmedo y seco, en la tabla 5.1 se puede observar con mayor detenimiento las pruebas en la balanza, se toma en cuenta el peso inicial y final del producto, un dato importante a mencionar es que el grosor de la prueba del plátano como del jitomate fue de 0.004 m.

En la Figura 5.1 a se observa el producto con su peso inicial, y en la figura 5.1 b se observa la muestra una vez finalizada la prueba en la balanza analizadora de humedad, los resultados de la prueba que se observan en la tabla 5.1.

Producto	Peso Inicial (gr)	Peso Final (gr)	Cantidad de humedad retirada (%)	Cantidad de humedad retenida (%)
Jitomate	7.243	0.450	93.79	6.21
Plátano	1.653	0.667	56.59	43.41

Tabla 5.1 Valores de las pruebas realizadas en la balanza analizadora de humedad.



(a)

(b)

Figura 5.1 Pruebas en la balanza analizadora de humedad (jitomate): a) Inicio de la prueba b) Final de la prueba

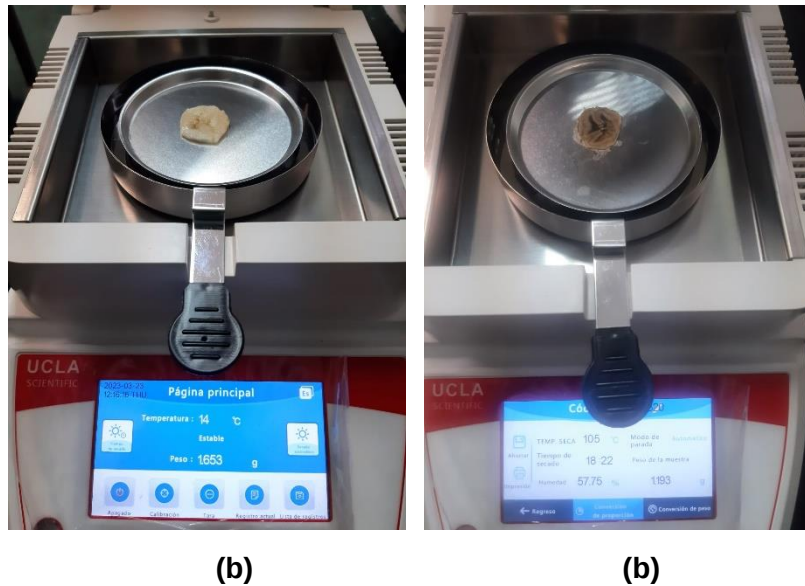


Figura 5.2 Pruebas en la balanza analizadora de humedad (Plátano): a) Inicio de la prueba b) Final de la prueba

5.3 Eficiencia del Deshidratador Solar

Se realizaron ocho pruebas de secado y se dividieron en cuatro para jitomate y cuatro para plátano, al ser secado por convección natural solo se tomaron parámetros ambientales tales son la radiación solar, temperatura del ambiente, velocidad del aire. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo a finales de marzo y mediados de abril del 2023. Cada prueba comenzó entre 9 y 10 de la mañana para poder salir con suficiente radiación solar.

El deshidratador ocasiona un efecto invernadero el cual permite hacer la deshidratación de los alimentos y más adelante se observan los datos obtenidos durante este proceso.

Para el jitomate como el plátano se conseguían en el mercado local de la región de Apizaco. Cada rodaja de alimento se cortó con el mismo espesor de 0.5cm, se usó este estándar ya que en capítulos anteriores se menciona la importancia de tener rodajas de los 0.5 cm a 1cm,

el grosor más usado es de 0.5cm para la deshidratación de hortalizas y el propuesto para las pruebas experimentales.

En la tabla 5.2 se observan las temperaturas tanto en el interior de la cámara como en el exterior, este análisis se llevó a cabo para saber la temperatura máxima que alcanza el deshidratador, esto es importante debido a que la temperatura ideal para deshidratar alimentos es un máximo de 60°C y se observa que el deshidratador cumple con esta característica al alcanzar una temperatura máxima de 55°C.

Horario	Temperatura Externa °C	Temperatura Interna °C
9:00	17	31 - 42
10:00	20	33 - 44
11:00	22	35 - 49
12:00	23	40 - 55
13:00	24	42 - 55
14:00	25	45 - 52
15:00	24	38 - 47

Tabla 5.2 Temperatura promedio al interior y Exterior de la cámara sin producto

5.4 Proceso de Deshidratación Solar

Durante cada prueba, los primeros pasos consistieron en lavar, pelar y trocear el plátano y el jitomate. Luego de esto, se cargó cada una de las 3 bandejas.

Se fijó una meta del porcentaje de humedad retirado en base a las pruebas realizadas en la balanza analizadora de humedad.

Las dos primeras pruebas se realizaron con un total de 24 horas y lo que influyo en el resultado de deshidratación fueron las condiciones ambientales, en la prueba No. 1 del plátano se encontraba nublado por lo que el producto no perdió por completo la humedad interna, por

otro lado, en la prueba 3 del plátano se dejó un total de 72hrs., se pudo observar como la fruta en cuestión tenía un secado excesivo con pérdidas en su sabor y con mayor rigidez.

Las mediciones se registraron en intervalos de 1 hora. Estos registros incluían el cambio de masa en el producto. El resto de las variables se registraron de forma continua, entre ellas: temperatura ambiente, temperatura interna del deshidratador, velocidad del aire y radiación

5.5 Operación Térmica

La operación térmica del secador se evaluó principalmente por el cálculo de su eficiencia de evaporación y curvas de secado. La eficiencia de la evaporación se define como el cociente de energía requerido para evaporar el agua. Con la ecuación 4.1 podemos obtener el peso idoneo que debe tener el alimento después de su deshidratación.

Peso del jitomate aproximado (gr):

$$R = (100\% - 95\%)/(100\% - 8\%) = 0.054$$

Peso del plátano aproximado:

$$R = (100\% - 80\%)/(100\% - 15\%) = 0.235$$

El valor del rendimiento teórico (R), permite conocer el peso final del producto seco (Ps), después de tener el valor teórico (R), se pueden realizar las pruebas y solo teniendo en cuenta el peso inicial del producto, se usa la ecuación 4.2 para saber el peso que debe tener el producto para saber que está en su punto óptimo de deshidratación. Para el plátano el peso fue diferente en cada prueba, pero el promedio está entre 2.9 gr y para el jitomate fue de 7.8 gr

$$\text{Peso estimado del Plátano } P_s = 0.235 * 2.9 = 0.6815gr$$

$$\text{Peso estimado del Jitomate } P_s = 0.054 * 7.8 = 0.4212gr$$

5.6 Análisis de Datos de las Pruebas Experimentales

Los principales resultados obtenidos de las 8 pruebas se muestran en las Tablas 5.3 y 5.4. Las tablas muestran la humedad inicial del producto, velocidad promedio del viento (V), Temperatura interna de la cámara (T.I.), Temperatura ambiente (T.A), tiempo de secado total (t), Radiación (R), Humedad relativa (H.R.).

Las Tablas 5.3 y 5.4 muestra los resultados de los alimentos ya deshidratado.

No. Prueba	Fecha de las pruebas del plátano	Horas del proceso de deshidratación	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura promedio al interior de la cámara (°C)	Radiación (wh/m^2)	Velocidad del aire (km/hr)	Humedad relativa (%)
1	18 Abril 19	24 Hrs	24/24	59	5967/6941	1.5	35
2	20 Abril 21	23 Hrs	24/25	57	7627/7032	2.5	28
3	21 Abril 24	72 Hrs	25/24	53	5967/6195	1	25
4	24 Abril 25	24 Hrs	24/24	54	7032/6548	3	23

Tabla 5.3 Datos de las muestras durante el proceso de deshidratación (Jitomate)

No. Prueba	Fecha de las pruebas de jitomate	Horas del proceso de deshidratación	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura promedio al interior de la cámara (°C)	Radiación (wh/m^2)	Velocidad del aire (km/hr)	Humedad relativa (%)
1	27 Marzo 28	24 Hrs	24/24	62	7062/7141	2.7	25
2	28 Marzo 29	23 Hrs	23/23	57	6979/7032	3.5	28
3	30 Marzo 31	24 Hrs	22/21	55	5967/5367	2	30
4	17 Abril 18	23 Hrs	25/24	58	7032/5967	1.9	24

Tabla 5.4 Datos de las muestras durante el proceso de deshidratación (Plátano)

5.7 Análisis de la Pérdida de Humedad

Para tener en cuenta este proceso, se debe tener en cuenta que antes de introducir los alimentos al deshidratador, fueron pesados en una báscula para saber su peso inicial, terminando el periodo de deshidratación del producto se volvieron a pesar teniendo un valor final.

Para calcular el porcentaje de pérdida de humedad se utilizó la siguiente fórmula:

$$P.H.= \frac{(Peso\ inicial - Peso\ seco)}{peso\ inicial} * 100$$

	Plátano				Jitomate			
Peso de la muestra	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4
Peso inicial	2.756gr	2.938gr	3.016gr	3.272gr	7.845gr	6.285gr	8.271gr	7.928gr
Peso seco	0.427gr	0.881gr	0.275gr	0.845gr	0.557gr	0.913gr	0.927gr	0.486gr
Pérdida de humedad (%)	85%	70%	90%	75%	93%	85%	92%	94%

Tabla 5.5 Porcentaje de pérdida de humedad en las pruebas

5.8 Curvas de Secado

Las curvas muestran el cambio de humedad en base seca a medida que se ejecuta el tiempo de secado y proporciona información de qué tan rápido y homogéneo es este proceso.

En la figura 5.3 y 5.4 se observar el comportamiento de secado de cada muestra, teniendo en cuenta que el espesor (0.5cm) es el mismo, las diferencias son principalmente en las condiciones ambientales del lugar, la radiación oscila entre 5500 a 7000 wh/m^2 , lo cuales ayuda que el colector solar siempre tenga una temperatura interna por arriba de los 50°C en su punto máximo durante el día.

La prueba 3 (platano), tuvo una duración de 72 horas lo que ocasiono un nivel de secado mayor, teniendo en cuenta que la exposición del producto por más tiempo no es mejor, se tiene como consecuencia que el producto se vuelve más duro y pierde el sabor, esto se ocasiona por que alcanza un punto muy bajo de secado y deja de ser comestible porque pierde sus propiedades.

La prueba 1 (Platano), es la más eficiente ya que la radicación solar fue alta, el cielo estuvo despejado, la velocidad del viento fue baja, estos parámetros se observan en los resultados finales y se puede decir que fue la prueba con mayor eficiencia de secado y esto se observa en la figura 5.6

El contenido de humedad inicial es una de las principales variables que influyen en el rendimiento del deshidratador, los mejores resultados se obtienen con una radiación solar mayor y con cielos despejados.

Es importante considerar el contenido de humedad inicial, mientras más alto sea, se necesita más tiempo para eliminar el agua presente en los alimentos, lo que hace que el proceso de secado sea más rápido o más lento.

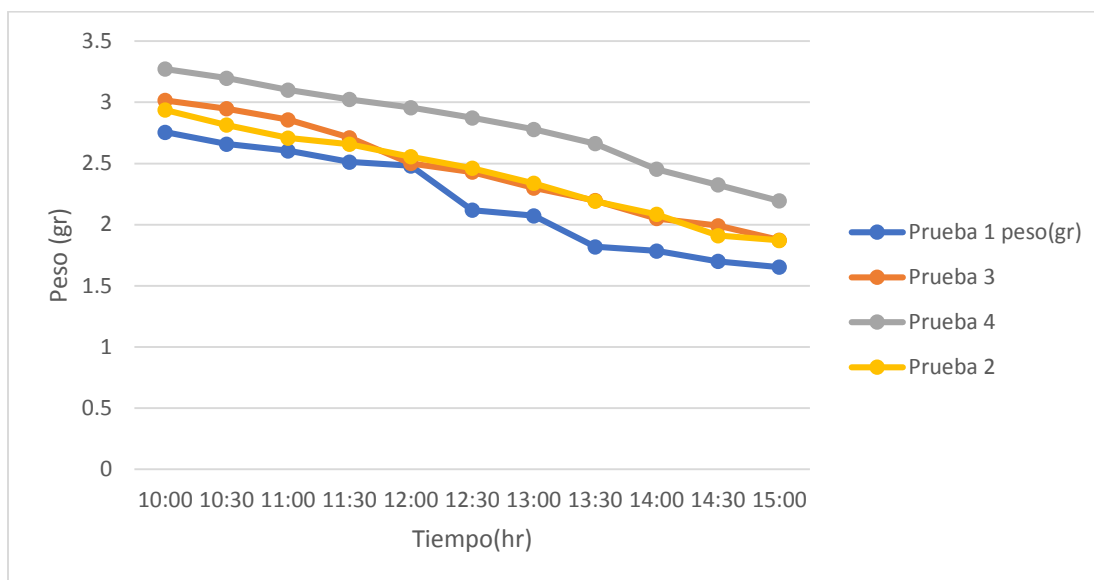


Figura 5.3 Curva de secado de las pruebas del Plátano

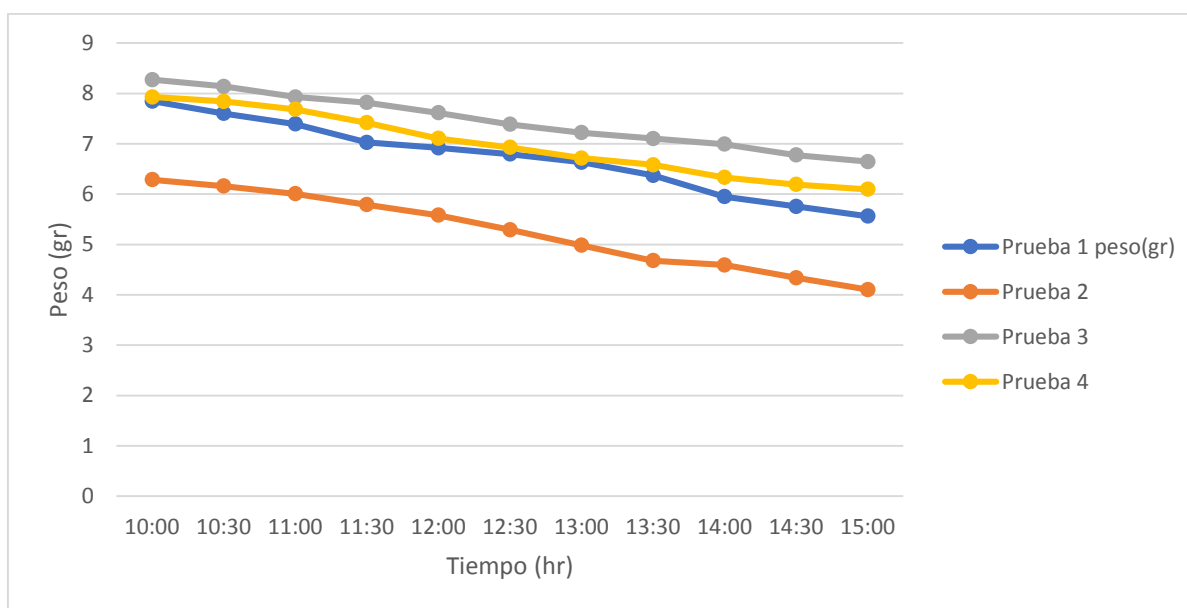


Figura 5.4 Curva de secado de las pruebas del Jitomate

En la figura 5.5 se observa la curva de secado de la prueba 4 (jitomate), es la más óptima y dejó un resultado muy bueno, teniendo en cuenta que fue un día caluroso sin nubosidad en el

aire, esto se observa en la temperatura interna de la cámara, esta es mayor a la de otras pruebas en diferentes días, estos datos se encuentran en la tabla 5.3

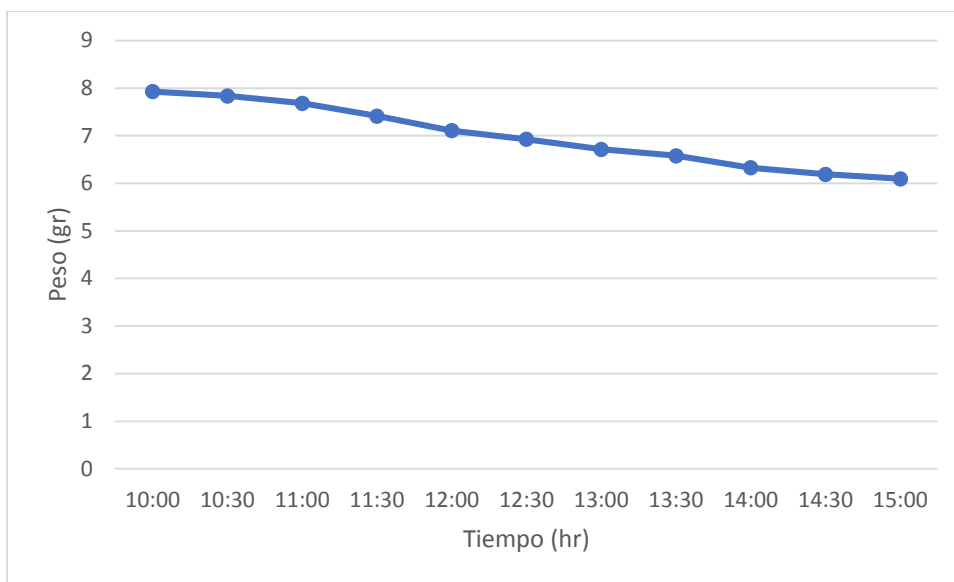


Figura 5.5 Curva de secado con mayor eficiencia del Jitomate

Las Figuras 5.5 y 5.6 muestran las curvas de secado para el 17-18 de abril (jitomate), el 18-19 de abril (platano). Se destacan ambas pruebas como las mejores para cada producto.

Se observa que la prueba No. 1 del platano es la más optima debido a los niveles de temperatura alcanzados al Interior de la cámara, se puede comparar con la prueba No.3, es más eficiente, se debe tener en cuenta la temperatura ambiente y la radiación debido a que mientras mayores sean estos parámetros, la cámara aprovecha más estos fenómenos ambientales haciendo que se caliente más el interior de la cámara, al tener un nivel alto de radiación, la humedad del ambiente es baja, este día en concreto tuvo un registro del 35% de humedad relativa que es baja, la velocidad del aire fue muy baja.

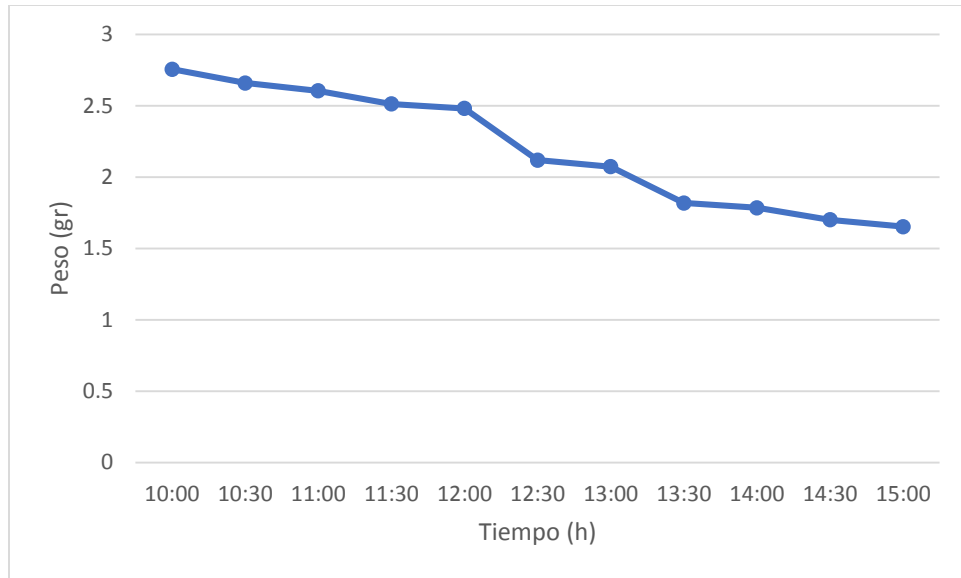


Figura 5.6 Curva de secado con mayor eficiencia del Plátano

En la figura 5.7 se observa el deshidratador con carga al iniciar las pruebas y al finalizar el proceso de deshidratación. Prueba No. 4.



(a)

(b)

Figura 5.7 a) jitomate fresco b) jitomate deshidratado



(b)



(b)

Figura 5.7 a) Platano fresco b) Platano deshidratado

Conclusiones

Las conclusiones dan como resultado el cumplimiento de los objetivos ya que tenemos el análisis de las curvas de secado de diferentes productos los cuales tiene un alto desperdicio en el estado de Tlaxcala.

Cabe mencionar que el deshidratador de alimentos es una alternativa viable para la conservación de alimentos en el estado de Tlaxcala ya que el ambiente suele ser cálido y esto facilita la deshidratación ya que se aprovecha por completo el calor generado dentro de la cámara.

Es importante mencionar que los resultados de deshidratación son variables y depende de las condiciones climáticas del lugar por lo que para un buen deshidratado es necesario analizarlas con detenimiento y saber cuánto tiempo es el adecuado, este proyecto trata de eso, para la región de Apizaco en el instituto tecnológico de Apizaco, es ideal que el clima ronde de los 23°C a los 25°C para un buen deshidratado en el tiempo de 24Hrs, también se debe considerar que la radiación oscile entre 5500 a 7000 wh/m^2 y debido a estos dos parámetros, se pudo observar que la humedad relativa será baja mientras la radiación y temperatura sea alta, la velocidad del aire puede estar por debajo de los 2,5Km/hr.

Todos estos datos pueden variar dependiendo de la nubosidad en el cielo, son los parámetros más idóneos para trabajar.

Referencias

[1] Genetics and microbiology research group (grupo de investigación de genética y microbiología GENMIC), Universidad pública de navarre, Pamplona España, Principios básicos de deterioro microbiológico de los alimentos.

[2] ALZAMORA stella, GUERRERO Sandra, NIETO Andrea. Conservación de frutas y hortalizas mediante tecnologías combinadas. 2004.servicio de tecnologías de ingeniería agrícola y alimentario (AGST).

[3] KALOGIROU, soteris. Solar Energy Engineering. 2 ed. Academic Press, 2013.820 p. ISBN-13: 978-0123972705.

[4] MEJIA, diana Julieth y VALENCIA, Carlos Andrés. Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. Trabajo de grado ingenieros mecánicos. Bogotá D.C.: Universidad América de Colombia. Facultad de ingeniería mecánica. Departamento de ingeniería.2011.190 p.

[5] ZAPATA, Luis José y LONDOÑO, Mauricio. Manejo del cultivo de la uchuva en Colombia. Grupo de investigation regional Agrícola. 2002.

[6] FAO. 2011a. Global food losses and food waste – extent, causes and prevention, by J. Gustavsson, C. Cederberg, U. Sonesson, rrR. van Otterdijk & A. Meybeck. Rome.

[7] Declárale la guerra al desperdicio de alimentos. (s. f.). Too Good To Go.
<https://www.toogoodtogo.com/es>

[8] Hegnsholt, E., Unnikrishnan, S., Pollmann-Larsen, M., Askelsdottir, B., & Gerard, M. (2022). Tackling the 1.6-Billion-Ton food loss and waste crisis. BCG Global.
<https://www.bcg.com/publications/2018/tackling-1.6-billion-ton-food-loss-and-waste-crisis>

[9] Royte, E. (2021, 3 mayo). How 'Ugly' fruits and vegetables can help solve world hunger. Magazine. <https://www.nationalgeographic.com/magazine/article/global-food-waste-statistics>

[10] Davey, M. (2017, 12 octubre). Almost 90% of edible tomatoes thrown away based on appearance – research. *the Guardian*.
<https://www.theguardian.com/environment/2017/oct/13/you-say-tomato-retailers-say-waste-research-finds-produce-problem>

[11] Mattsson, L., Williams, H., & Berghel, J. (2018). Waste of fresh fruit and vegetables at retailers in Sweden – Measuring and calculation of mass, economic cost and climate impact. *Resources Conservation and Recycling*, 130, 118-126.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.037>

[12] Regeneración, A. (2017). México se desperdicia el 37% de alimentos que produce. *RegeneraciónMX*. <https://regeneracion.mx/mexico-se-desperdicia-el-37-de-alimentos-que-se-producen/#:~:text=Alimentos%20m%C3%A1s%20desperdiciados%20en%20M%C3%A9xico&text=Mango%3A%2054.54%25,PI%C3%A1tano%20verde%20y%20tabasco%3A%2053.76%25>

[13] *Despilfarro: pérdida / desperdicio de alimentos*. (2020, 23 noviembre). Alimentación y Salud. <https://alimentacionysalud.unam.mx/despilfarro-y-consumo-de-alimentos-1-alimentacion-para-la-salud/>

[14] Lof GOG. Recent investigations in the use of solar energy for the drying of solids. *Solar Energy* 1962;6(4):122–8.

[15] Esper A, Muhlbauer W. Solar drying –an effective means of food preservation. *Renew Energy* 1998;15(1–4):95–100.

[16] Muhlbauer W. Present status of solar crop drying. *Energy Agric* 1986;5(2):121–37.

- [17] Geankoplis, J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Mexico: Continental.
- [18] FAO. Pérdidas y desperdicios de alimentos en México, (2018).
- [19] Lof GOG. Recent investigations in the use of solar energy for the drying of solids. Solar Energy 1962;6(4):122–8.
- [20] Saif-UI-Rehman M. Prospects and limitations of solar energy utilization in developing countries. Solar Energy 1967;11(2):98–108.
- [21] Ong KS. Solar dryers in the Asia-Pacific region. Renew Energy 1999;16(1–4):779–84.
- [22] Wisniewski G. Market development of solar crops drying technologies in Poland and Europe. Renew Energy 1999;16(1–4):1278–83
- [23] Arinze EA, Sokhansanj S, Schoenau GJ. Simulation of natural and solar-heated air hay drying systems. Comput Electron Agric 1993;8(4):325–45.
- [24] Joshi CB, Pradhan BD, Pathak TP. Application of solar drying systems in Nepal. World Renewable Energy congress VI; 2000. p. 2237–2240.
- [25] Oztek S, Bacet ncel k A, Soysal Y. Crop drying programme in Turkey. Renew Energy 1999;16(1–4):789–94.
- [26] Salihoglu NK, Pinarli V, Salihoglu G. Solar drying in sludge management in Turkey. Renew Energy 2007;32(10):1661–75.
- [27] Sharma A, Chen CR, Lan NV. Solar energy drying systems: a review. Renew Sustain Energy Rev 2009;13(6–7):1185–210.

[28] Sodha MS, Chandra R. Solar drying systems and their testing procedures: a review. *Energy Convers Manage* 1994;35(3):219–67.

[29] Augustus Leon M, Kumar S, Bhattacharya SC. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renew Sustain Energy Rev* 2002;6(4):367–93.

[30] Ramana Murthy MV. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(4): 835–44.

[31] Arata A, Sharma VK. Performance evaluation of solar assisted dryers for low-temperature drying applications I: plants description. *Renew Energy* 1991;1(5–6):729–35.

[32] Sharma VK, Colangelo A, Spagna G. Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying. *Renew Energy* 1995;6(4):413–24.

[33] Henricksson R, Gustafsson G. Use of solar collectors for drying agricultural crops and for heating farm buildings. *Energy Agric* 1986;5(2):139–50.

[34] Koyuncu T. Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. *Renew Energy* 2006;31(7):1073–88.

[35] Othman MYH, Sopian K, Yatim B, Daud WRW. Development of advanced solar drying systems. *Renew Energy* 2006;31(5):703–9.

[36] Womac AR, Tompkins FD, DeBusk KE. Evaluation of solar air heaters for crop drying. *Energy Agric* 1985; 4:147–57.

[37] Garg HP, Mahajan RB, Sharma VK, Acharya HS. Design and development of a simple solar dehydrator for crop drying. *Energy Convers Manage* 1984;24(3):229–35.

[38] Tiwari GN, Bhatia PS, Singh AK, Sutar Roy F. Design parameters of a shallow bed solar crop dryer with reflector. *Energy Convers Manage* 1994;35(6):535–42.

[39] Pitt RE. Stochastic theory of forage drying as related to pan evaporation. *Agric Forest Meteor* 1984;32(3–4):197–215.

[40] Chemkhi S, Zagrouba F, Bellagi A. Drying of agricultural crops by solar energy. *Desalination* 2004;168:101–9.

[41]https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S200740262017000100019&script=sci_arttext&lng=es#B22

[42] Arnaud. (2023). Todo sobre el secador solar. *Solar Brother*.
<https://www.solarbrother.com/es/blog/secadores-solares/>

[43] *Deshidratadores solares | Yoreciclo*. (s. f.). yoreciclo.
<https://www.yo-reciclo.org/deshidratadores-solarespy1w#:~:text=Son%20aquellos%20donde%20la%20colecci%C3%B3n,con%20circulaci%C3%B3n%20forzada%20de%20aire>

[44] Enibe SO. Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage. *Renew Energy* 2002;27(1):69–86

[45] Akyurt M, Selcuk MK. A solar drier supplemented with auxiliary heating systems for continuous operation. *Solar Energy* 1973;14(3):313–20.

[46] Thoruwa TFN, Johnstone CM, Grant AD, Smith JE. Novel, low cost CaCl₂ based desiccants for solar crop drying applications. *Renew Energy* 2000;19(4):513–20.

[47] Mahmouda KG, Ball HD. Solar desiccant systems for grain drying. *Energy Convers Manage* 1991;31(6):595–8.

[48] Thoruwa TFN, Smith JE, Grant AD, Johnstone CM. Developments in solar drying using forced ventilation and solar regenerated desiccant materials. *Renew Energy* 1996;9(1–4):686–9.

- [49] V. Belessiotis , E. Delyannis (2011) Solar drying. ScienceDirect, 85, 2-12.
- [50] Fito, M.A., Andrés G.A.M., Barat B.J.M., Albors S.A.M. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. España: Universitat Politècnica de València.
- [51] PERRY R.1992. Manual del Ingeniero Químico. Sexta edición. Mc Graw-Hill. México. 12-63 p.
- [52] Ekechukwu, O.V., Norton, B., 1999b. Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. Energy Conversion & Management 40 (6), 657– 667.
- [53] Beuchat, L.R., 1981. Microbial stability as affected by water activity. Cereal Foods World 26 (7), 345–349.
- [54] Langmuir, I., 1918. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. Journal of the American Chemical Society 40, 1361–1402.
- [55] Eissen, W., 1984. Trocknung von Trauben mit Solarenergie, ForschungsBericht T-84-089 (BMFT-FB 84-089), Univ. of Hohenheim, W. Germany, Institute for Agriculture, p. 144.
- [56] Ekechukwu, O.V., 1999. Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. Energy Conversion and Management 40, 593–613.
- [57] Ekechukwu O. V.; Norton B.; 1999. “Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology”. Energy Conversion & Management. (40), págs. 615-655.
- [58] A. Marcilla Gomis. Introducción a las operaciones de separación, contacto continuo. Universidad de Alicante (1999).
- [59] Geankoplis, J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Mexico: Continental

[60] Jayaraman, K.S., Das Gupta, D.K., 1998. Drying of Fruits and vegetables. In: Mujumdar, A.S. (Ed.), *Handbook of Industrial Drying*, vol. 1. second ed., Marcel Dekker, Inc., pp. 643–690

[61] El-Paso Solar Energy Association. www.Epsea.org/dry.html

[62] C.K. SANKAT y R.A. ROLLE. The performance of natural convection solar dryers for copra production. Faculty of Engineering, University of the West Indies, St. Augustine, Trinidad. Received 20February 1990; accepted 25 October 1990.

[63] Solargis. (s. f.). *Global Solar Atlas*. The World Bank Group. <https://globalsolaratlas.info/map?c=24.467151,-107.578125,5&m=site>

[64] *Datos históricos meteorológicos de Tlaxcala en la primavera de 2023 (México)* - *Weather Spark*. (s. f.). Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/h/s/6724/2023/0/Datos-hist%C3%B3ricos-meteorol%C3%B3gicos-de-la-primavera-2023-en-Tlaxcala-M%C3%A9xico#Figures-Temperature>

[65] *Clima en Apizaco por horas - Meteored*. (s. f.). Meteored.mx | Meteored. <https://www.meteored.mx/apizaco/por-hora>

[66] Lindow, A. (2015). Deshidratado de frutas y verduras-Proceso paso a paso. *Cocina Solar*. <https://gastronomiasolar.com/deshidratado-de-frutas-verduras/>