



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILÁN

Diseño y construcción de un secador solar indirecto para la aplicación en el deshidratado  
de productos hortofrutícolas

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:  
FLORES RANGEL ELIOT

ASESORES:  
Dra. Ma. Andrea Trejo Márquez  
Dr. Julio César Morales Mejía

CUAUTILÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
SECRETARÍA GENERAL  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE

ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA  
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales  
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: **Trabajo de Tesis**

Diseño y construcción de un secador solar indirecto para la aplicación en el deshidratado de productos hortofrutícolas.

Que presenta el pasante: Eliot Flores Rangel

Con número de cuenta: 407089488 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 12 de Junio de 2018.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	I.A. María Guadalupe López Franco	
VOCAL	Dra. María Andrea Trejo Márquez	
SECRETARIO	M. en C. Julieta González Sánchez	
1er. SUPLENTE	I.Q. Elvia Mayen Santos	
2do. SUPLENTE	Dra. Alma Adela Lira Vargas	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/cga\*

---

## Dedicatoria

A Evan, mi hijo.

...«Mamá, ¿ya no quieres a mi papá?». «Claro que sí, tontito, ¿por qué no habría de quererlo? » «Por las *Pompas ricas*.» «Esa es una canción, hijo, no la realidad.» «Entonces, ¿cuál es la realidad, mamá?» «Ay, hijo, la realidad es todo lo que vemos y tocamos con nuestras manos.» «Y lo que no vemos pero aquí está, ¿también es la realidad?» «Claro.» «Pero lo invisible, lo que sólo tú y yo sentimos, ¿es la realidad?» «Sí, también.» « ¿Y lo que yo traigo dentro de mi corazón es una realidad?» «Claro, Lorenzo, es tu realidad, aunque no se la enseñes a nadie.»...  
*Elena Poniatowska "La piel del cielo"*

## Agradecimientos

- A mí mismo, por haber tomado la firme decisión de ser ingeniero y de concluir este escrito. Por haber entendido que pedir ayuda a un Dios es un aliento, pero solo son palabras. Esfuerzo, perseverancia y trabajo, no hay más.
- Los mejores amigos se cuentan con los dedos meñiques de los pies. Le agradezco a mi mamá por su singular manera de educarme que me ha hecho una persona independiente. A mi papá, por cuidarme por medio de sus consejos y mostrarme que la humildad y la honestidad me hacen una persona fuerte y en paz. A ambos, por confiar en mí y brindarme el apoyo que nunca podré pagar. Son más del 99% de este logro.
- A mi hermano y su familia, por preocuparse por el bienestar y seguridad de mí, y de mi hijo. Por sentirse orgulloso de su hermano menor.
- A mi familia Torres Flores. A mis tíos por ser los primeros en estirar su brazo de ayuda sin que yo se los pida. A mis primas, por la vida que hemos compartido y, así como Uriel, por estar al pendiente de mi quehacer en la vida y de este trabajo.
- La amistad alimenta la vida del universitario. Le agradezco tanto a mis grandes amigos:
  - A Chema, por ser confidente y por haber compartido un titipuchal de experiencias en nuestra estadía en la facultad. Por infectarme de la libertad que te hace sentir usar una bicicleta. Por mostrarme que al subir una pendiente uno no se baja de su bicicleta, debe seguir pedaleando, aunque sea muy despacio; eso te hará más fuerte. Así en la vida. Por darnos la oportunidad de compartir la idea de que parte de la felicidad del ser humano se encuentra allá, en la cima, entre pinos, ríos y unas latas de atún.
  - A Kike, por negro.
  - *"Porque nadie sabe lo que tú tienes que hacer para estar aquí. Nadie puede juzgarte. Así sea una, dos o diez...pero sigue adelante. Déjalos. No hagas caso"*. Gracias, amigo Neto. No te defraudé.
  - No es cierto, mi Kike. Te agradezco por decirme *amigo*, por calificarme de esa manera. Por tu sinceridad. Por los momentos de estupidez compartida. Por estar en las no tan agradables. Por sentirte orgulloso de tener amigos como los de la facultad. Por ser ejemplo. Por empujarme sin cansancio a ser lo que ahora soy: un ingeniero.
  - A Pável, porque a pesar de que tenemos una amistad joven, desde el primer momento mostraste ser un amigo, sudoríparo, pero sincero. Por saber ser compañero y trabajar juntos para no quedarse atrás, para lograr

- 
- lo que tanto nos costó y saborear el final de nuestra licenciatura. Por soportar mis ocurrencias, por *aguantar vara*. Por compartir. *¡Eres el mejor, Francis!*
- A Ari y Alan, por ser personas que me motivan a seguir. Por abrir las puertas de su hogar, por dejarme sentirme libre y pasarla como familia en él. Por compartir comida y bebida. Por el apoyo desde aquel servicio social que nos hizo aprender y alimentó nuestra amistad. Por compartir sus vidas.
  - *“Si ellos pueden, yo también puedo. Si yo pude, tú también vas a poder.”* A Mafer, por sembrar en mí, felicidad. Por ese cariño sincero que siempre me has ofrecido. Le agradezco a la vida por haberte puesto en mi camino, me hacías falta. Por soportarme. Por no cambiarme por el primo del Wonka (buena elección). Por ser amiga, confidente. Por ayudarme en mi vida universitaria. Por ser ejemplo. Por preocuparte y motivarme a no quedarme atrás para finalizar este proyecto. No dejaré de quererte.
  - En general a Chema, Pável, Alan, Ari y Mafer por compartir esos banana Split. Los llevo en mi mente y corazón, amigos.
- Al ingeniero Daniel Ortuño por tu paciencia y ejemplo. Gracias por mostrarme un poquito de lo mucho que sabes y por tener las ganas de compartirlo. Encontré en ti lo agradable y amplia que es la ingeniería. Fuiste la principal motivación para este proyecto. Infinitas gracias por todo este apoyo que he recibido de tu parte.
  - A Noé Arenas. Fuiste ese canal de acceso para darme cuenta de qué es lo que me agrada de la ingeniería. Eres pieza importante de este trabajo. Sigue adelante. Agradezco tu amistad y tus enseñanzas. Siempre me ayudaste en todo lo que te molestaba.
  - A los que hacen posible MYSIO y la familia Ortuño: Alma, Iván, Ángeles, Eric, la Sra. Martha y el Sr. Lamberto, a la Sra. Rosario y Esteban. Decir gracias es demasiado poco. Bendiciones para ustedes.
  - A la Dra. Andrea y el Dr. Julio César porque a pesar de su atareado día a día siempre me brindaron su atención y preocupación, con amabilidad y profesionalismo.
  - A la profesora Selene por su ayuda, por su paciencia. No solo conmigo sino también con los muchos que son parte del taller de frutos y hortalizas. Siempre pendiente de mis actividades. Gracias maestra.
  - A la profesora Adela por su apoyo, sinceridad y claridad con respecto a mi trabajo. Y por supuesto, por su buena onda. Gracias
  - A la Dra. Carolina. Las coincidencias de la vida universitaria me hicieron tenerla contantemente como profesora. Le agradezco mucho el conocimiento compartido y tanto apoyo que me brindó.
  - A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Campo uno, por darme la oportunidad de haber conocido a inigualables académicos. Por formarme como persona y profesionista. Por dejarme conocer el amor, la amistad, la preocupación y la alegría. Por hacerme sentir vivo dentro de esta gran aventura, la de ser estudiante de la UNAM.

---

## Contenido

<b>Índice de figuras</b>	<b>2</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>3</b>
<b>Resumen</b>	<b>4</b>
<b>1.0. Introducción</b>	<b>5</b>
<b>2.0. Antecedentes</b>	<b>7</b>
2.1. <i>Métodos de conservación de los alimentos.</i>	7
2.1.1. Tratamientos de tipo físico	7
2.1.2. Tratamiento de tipo químico	10
2.1.3. Tratamientos emergentes (procesos no térmicos)	12
2.2. <i>Secado</i>	14
2.2.1. Definición	14
2.2.2. Términos utilizados para describir el contenido de humedad de una sustancia	15
2.2.3. Curvas de velocidad de secado	18
2.3. <i>Cambios en los alimentos durante el secado</i>	24
2.4. <i>Equipos de secado utilizados en la industria alimentaria de acuerdo a la transferencia de calor</i>	26
2.4.1. Secadores directos o por convección	26
2.4.2. Secadores indirectos o por conducción	30
2.4.3. Secadores por radiación	34
2.5. <i>Métodos de secado</i>	34
2.5.1. Secado por aspersion	34
2.5.2. Liofilización	35
2.5.3. Deshidratación osmótica	37
2.5.4. Secado por microondas	38
2.5.5. Secado solar	38
<b>3.0. Objetivos</b>	<b>47</b>
<b>4.0. Metodología experimental</b>	<b>48</b>
4.1. <i>Diseño del equipo.</i>	49
4.1.1. Características del material a secar	50
4.1.2. Elección del tipo de secador	50
4.1.3. Determinación de la longitud del secador	51
4.2. <i>Variables de operación</i>	52
4.3. <i>Determinación del tiempo de secado</i>	54
4.4. <i>Instrumentos utilizados para medición de variables.</i>	57
<b>5.0. Resultados y discusión</b>	<b>60</b>
5.1. <i>Pre construcción del equipo de secado</i>	60
5.1.2. Selección de materiales para la construcción.	62
5.2. <i>Construcción del secador</i>	63

5.2.1. Costos.	68
5.3. Caracterización del equipo.	71
5.4. Proceso de aplicación del secador solar indirecto Con Carga.	79
<b>6.0. Conclusiones</b>	<b>86</b>
<b>7.0. Recomendaciones</b>	<b>87</b>
<b>8.0. Bibliografía</b>	<b>87</b>
<b>9.0 Anexos</b>	<b>90</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Gráfica de humedad para mezclas de aire y vapor de agua.	19
Figura 2. Curvas típicas de velocidad de secado: a) humedad libre, b) curva de velocidad de secado.	21
Figura 3. Ciclo o circuito abierto, secado por aspersión bajo una corriente de flujo.	34
Figura 4. Sistema básico de secado por frío.	36
Figura 5. Secado a sol abierto.	42
Figura 6. Secador solar directo.	43
Figura 7. Secador solar indirecto.	44
Figura 8. Secador solar mixto.	45
Figura 9. Esquema de un secador de convección forzada.	46
Figura 10. Cuadro metodológico.	48
Figura 11. Esquema de la dirección de la toma de decisiones en el diseño de un secador	49
Figura 12. Secciones del equipo de secado en donde se registraron las diferentes variables en el proceso de aplicación a carga cero y con carga	53
Figura 13. Esquema de la colocación de las bandejas con pétalos de flor de cempasúchil en el interior del equipo	54
Figura 14. Bandeja con pétalos de flor de cempasúchil	54
Figura 15. Vista isométrica posterior del diseño de la cámara de secado, del secador solar indirecto experimental.	60
Figura 16. A) Vista lateral del colector; B) Vista frontal con corte del colector solar.	61
Figura 17. Diseño final del secador solar indirecto experimental.	62
Figura 18. Corte del material	65
Figura 19. Armado y fijación de estructuras con soldadura tig	65
Figura 20. Ensamble de las distintas caras que componen la cámara de secado, colector y puerta.	65
Figura 21. Instalación del aislante térmico.	66
Figura 22. Sellado de juntas.	66
Figura 23. Instalación de cubiertas de vidrio.	66
Figura 24. Cerradura, bisagra y sistema de sujeción del colector.	67

---

Figura 25. Ensamble general y ensamble final.	67
Figura 26. Temperaturas a la salida del colector (curvas superiores) y temperaturas ambiente (curvas inferiores) de los tres días de experimentación de la caracterización del equipo.	72
Figura 27. Curvas de las temperaturas al interior de la cámara de secado, temperatura ambiente e irradiancia en la caracterización del equipo de secado.	73
Figura 28. Velocidad del aire en la cámara de secado en la caracterización del equipo de secado.	76
Figura 29. Curvas de eficiencia y diferencia de las temperaturas de entrada y de salida del colector, en la caracterización del equipo de secado.	78
Figura 30. Curvas de temperaturas en la cámara de secado, temperatura ambiente e irradiancia en cada uno de los tres días de experimentación con carga (pétalos de flor de cempasúchil)	81
Figura 31. Curvas de humedad libre de pétalos de flor de cempasúchil en tres diferentes días de experimentación.	83
Figura 32. Disminución del peso en el proceso de secado de pétalos de flor de cempasúchil.	85

### Índice de tablas

Tabla 1. Procesos por altas temperaturas para la conservación de alimentos.	7
Tabla 2. Procesos por bajas temperaturas para la conservación de alimentos.	8
Tabla 3. Procesos por eliminación de agua para la conservación de alimentos.	9
Tabla 4. Proceso por acción mixta para la conservación de alimentos.	9
Tabla 5. Conservantes y sus funciones.	10
Tabla 6. Métodos de conservación que modifican las características sensoriales.	11
Tabla 7. Algunos secadores de tipo directo o por convección.	28
Tabla 8. Algunos secadores de tipo indirecto o por conducción.	31
Tabla 9. Ventajas y desventajas del secado solar.	41
Tabla 10. Registro de temperaturas, humedad y velocidad del aire en la experimentación en condiciones de carga cero y con carga	52
Tabla 11. Registro de datos para el cálculo y realización de las curvas de secado.	55
Tabla 12. Valores para el cálculo de la interpolación potencial	56
Tabla 13. Dimensiones y material de construcción del secador solar experimental.	64
Tabla 14. Costos fijos de diseño y construcción del secador solar indirecto.	68
Tabla 15. Características de secador comercial y el diseño de este proyecto.	70

---

## Resumen

Mantener un balance entre el suministro de alimentos y el crecimiento de la población, reduciendo la pérdida de los alimentos durante el proceso de producción es obligatorio. Sin embargo, aumentar la capacidad de producción de alimentos en las áreas rurales es difícil. Para resolver el problema, el secado se ha convertido en una de las técnicas más utilizadas para la conservación de los alimentos en el mundo.

En este trabajo se diseñó y construyó un secador solar indirecto que permita mejorar el proceso de secado de diversos productos de origen vegetal, como una alternativa tecnológica para la producción agrícola; ayudados de un software de diseño en 3D, tomando en cuenta el material a secar, la velocidad del aire de secado y la accesibilidad de los materiales existentes en el mercado con lo cual, a su vez, se construyó el equipo de secado con la importante ayuda del taller de manufacturas MYSIO (Manufacturas y Servicio de Ingeniería Industrial Ortuño). Posteriormente, se realizaron pruebas de secado en tres días distintos tanto para la caracterización del equipo como para las pruebas del equipo con carga. El periodo con carga se realizó con 100g de pétalos de flor de cempasúchil repartidos en 4 bandejas dentro del secador, donde solo a una de las bandejas se le registró la pérdida de peso cada 15 minutos; mientras que en las otras 3 bandejas solo se registró la pérdida de peso hasta el final de la prueba.

En los resultados obtenidos en carga cero se observaron temperaturas ambiente que oscilaron en los 35°C, temperaturas de entre 45 y 50°C en el seno de la cámara de secado, temperaturas del aire a la entrada de la cámara de secado de hasta 60°C, así como velocidades del aire a la salida de la cámara de hasta 0.8m/s. El colector presentó una eficiencia de hasta un 42%. En el proceso con carga, se observó hasta un 76% de pérdida de peso en los pétalos de cempasúchil.

Por lo que, se concluye que, el equipo de secado mantiene un buen diseño ya que mantuvo temperaturas del orden de 10 a 25°C, o más, lo que conllevó a un proceso adecuado. El proceso de deshidratado en el equipo de secado solar indirecto, depende principalmente de las condiciones ambientales, tales como la temperatura ambiente. La utilización del equipo de secado solar indirecto puede funcionar como una alternativa tecnológica para el deshidratado de productos hortofrutícolas.

## 1.0. Introducción

Los alimentos sufren deterioro natural ocasionado por la acción de agentes biológicos (microorganismos, enzimas), físicos (luz, aire) y químicos (oxidación). Para retrasarlo es necesario emplear métodos de conservación, y así prolongar la vida útil de los alimentos, brindando inocuidad, facilitando el almacenamiento, transporte y el procesamiento, reduciendo costos y posibilitando el intercambio comercial. Para lograr lo anterior se emplean tratamientos de tipo físico, químico y métodos emergentes (Castro Ríos, 2010). Uno de los tratamientos físicos más comunes es el secado. A su vez, la operación de secado se encuentra entre las aplicaciones de la energía solar. La energía solar tiene mucho potencial para cumplir con nuestra demanda de energía (Singh *et al.*, 2015). El interés en el uso de energía renovable con el objetivo de reducir la dependencia de fuentes convencionales está aumentando en todo el mundo. Esta situación está acompañada con la preocupación de las cuestiones con los gases de efecto invernadero relacionadas con la quema de combustibles fósiles (Altobelli *et al.*, 2014). El secado al Sol ha prevalecido desde hace muchos años con la agricultura como la primera etapa de conservación y almacenamiento. Este ha sido siempre la alternativa más económica que el sistema mecánico y otros sistemas de secado tradicionales (Jain & Tewari, 2015). Convencionalmente, frutas y vegetales son deshidratados a Sol abierto y aire caliente. Alimentos como la manzana, albaricoque, dátil, pera, durazno, mango, ciruela, uva, vainilla y chile, son ejemplos de vegetales deshidratados mediante secado solar “convencional” o “tradicional” (Chang *et al.*, 2016). Sin embargo, el secado solar tradicional (secado solar directo) frecuentemente es un proceso lento impedido por la neblina, alta humedad (lluvia), polvo, condiciones ambientales, insectos, roedores y aves, donde la pobre calidad, en términos de color, composición nutricional (debido a la exposición directa a los rayos ultravioletas) e higiene, ha llevado al desarrollo de tecnologías alternas de secado (Karam *et al.*, 2016). Una de ellas, los secadores solares, son dispositivos especializados que controlan el proceso de secado y protegen los productos agrícolas del daño por insectos, polvo y lluvia. Haciendo una comparación entre el secado a Sol abierto y el secador solar, se obtiene que los secadores solares generan mayores temperaturas, humedad relativa más baja, bajo contenido de humedad en el producto y reduce el deterioro que se lleva a cabo durante el proceso de secado a Sol abierto (Hedge *et al.*, 2015). Los frutos secados por medio de un sistema solar indirecto

aportan muchos beneficios a la salud gracias a su gran aporte de vitaminas y minerales, como el ácido fólico, vitamina E, potasio, magnesio y fósforo, que son además excelentes para disminuir el estrés, la fatiga, el síndrome premenstrual, y por su alto contenido de antioxidantes, son buenos para el corazón ya que disminuyen el colesterol y bajan la tensión arterial (SAGARPA, 2015). Por ello, en este trabajo se realizará el diseño y construcción de un secador solar indirecto con materiales adecuados, disponibles de forma local, que permitan efectuar satisfactoriamente el secado de diversos productos de origen vegetal.

## 2.0. Antecedentes

### 2.1. Métodos de conservación de los alimentos.

#### 2.1.1. Tratamientos de tipo físico

El principal método de conservación de alimentos es por medio del aumento de la temperatura; esta aplicación permite la destrucción de microorganismos, desnaturalización de proteínas e inactivación de enzimas. Los principales métodos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1. Procesos por altas temperaturas para la conservación de alimentos.**

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES
<b>Proceso aséptico o UHT (Ultra high temperature)</b> 	Se emplean temperaturas entre 135 a 150°C por inyección de vapor saturado o seco durante 1 a 5 segundos, seguido de un enfriamiento rápido a 4°C, destruyendo o inactivando microorganismos y sus esporas. La vida útil del alimento es de hasta 3 meses.	Leche, jugos de frutas, vino, helado, pudines, alimentos infantiles Productos líquidos homogéneos.
<b>Esterilización</b> 	Inactiva microorganismos alterantes y destruye patógenos y sus esporas. El microorganismo patógeno controlador es <i>Clostridium botulinum</i> , ya que sus esporas son resistentes a los procesos térmicos. Se emplean temperaturas superiores a 100°C (115°C a 127°C, durante 15-30 minutos). Se utilizan autoclaves con vapor a presión o agua.	Productos que se encuentran en contenedores (latas o envases de vidrio).
<b>Pasteurización</b> 	Tratamiento térmico moderado que no suele superar los 100°C. Permite el empleo de agua como agente de calefacción. Inactiva enzimas y destruye los microorganismos más sensibles a la temperatura, siendo capaz de neutralizar la presencia de bacterias vegetativas, levaduras y mohos, sin que su intensidad permita la destrucción de formas esporuladas. Su aplicación queda restringida a alimentos que no contengan esporas patógenas.	Cerveza, zumos de frutas, batidos, conservas, pan y pastelería, leche, huevo líquido, alimentos para bebés.

**Tabla 1. Procesos por altas temperaturas para la conservación de alimentos.  
(Continuación)**

<p><b>Escaldado (o blanqueo)</b></p> 	<p>Inhibe de la actividad enzimática residual de ciertas frutas y verduras. Tratamiento moderado, entre 70 y 100°C y tiempos de 1 a 15 min, con agua o con vapor de agua. Puede llevarse a cabo como operación previa a la deshidratación, a la esterilización de productos envasados o a la congelación, y simultáneamente o no a procesos como el pelado o el lavado</p>	<p>Frutas y verduras enteras (generalmente).</p>
--	--	--

Fuente: (Castro-Ríos, 2010);(Aguado-Alonso, *et al*, 2002).

Por otra parte, existen las tecnologías que se basan en la disminución de la temperatura que consisten en retardar las reacciones químicas, que a su vez retrasan o inhiben el crecimiento de microorganismos o enzimas presentes en los alimentos (Tabla 2).

**Tabla 2. Procesos por bajas temperaturas para la conservación de alimentos.**

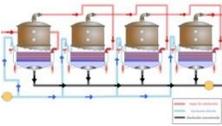
MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES
<p>Refrigeración</p> 	<p>Conserva los alimentos entre 1 a 4°C. A esa temperatura el desarrollo de microorganismos se reduce o se inhibe, además disminuyen los procesos bioquímicos que conllevan un deterioro y la pérdida de nutrientes, sin embargo la conservación es limitada y dependerá de los productos y tipo de empaque o envase empleado.</p>	<p>Carne, pescado, leche pasteurizada, frutas, verduras, etc.</p>
<p>Congelación y Ultracogelación</p> 	<p>La temperatura del alimento disminuye por debajo de su punto de congelación (hasta -18°C) y una parte del agua se congela, formando cristales de hielo. Evita que los microorganismos se desarrollen o disminuye la actividad enzimática. La ultracogelación emplea tiempos cortos (máximo 120 min) a temperaturas muy bajas (&lt;-30°C), conservando al máximo la estructura física de los alimentos y sus características organolépticas, a diferencia de la congelación convencional en donde se forman cristales de hielo en forma de aguja que lesionan las membranas celulares, creando características sensoriales inadecuadas.</p>	<p>Carne fresca, queso, frutos carnosos, jugos de frutas, entre otros.</p>

Fuente: Fuente: (Castro-Ríos, 2010);(Aguado-Alonso, *et al*, 2002).

Por eliminación de agua se reduce la disponibilidad de agua en el alimento, disminuyendo la actividad de agua ( $a_w$ ), impidiendo que los microorganismos se multipliquen fácilmente.

Una reducción en  $a_w$  afecta la reproducción, actividad metabólica, resistencia y sobrevivencia de los microorganismos en los alimentos (Tabla 3).

**Tabla 3. Procesos por eliminación de agua para la conservación de alimentos.**

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES
Concentración por evaporación 	Elimina parcialmente, por ebullición, agua de los alimentos. Sin embargo, los productos derivados de este tratamiento poseen un $a_w$ alta, por lo que requieren de otros tratamientos de conservación adicionales para dar estabilidad al producto.	Concentrados de frutas, mermeladas, arequipe (dulce de leche), leche evaporada y leche condensada.
Deshidratación y secado 	Priva a los microorganismos del agua que necesitan para su actividad. El proceso emplea temperaturas de 40 a 100°C y se puede encontrar en dos formas: deshidratación (secado artificial) o secado (secado solar)	Frutas y verduras, principalmente.

Fuente: (Castro-Ríos, 2010).

Por otro lado, encontramos procesos mixtos que son ampliamente utilizados en el desarrollo de diversos productos (Tabla 4).

**Tabla 4. Proceso por acción mixta para la conservación de alimentos.**

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES
Liofilización 	Se congela el alimento y posteriormente se introduce en una cámara de vacío para que se evapore el agua por sublimación. Emplea temperaturas de congelación entre -10 a -50°C y presiones desde 13.5 a 270 Pa. La principal ventaja de este método, es la conservación de las propiedades sensoriales asociadas a los componentes volátiles del alimento como el olor y el aroma.	Café, crema de leche, lactosa, frutas, vegetales, jugos de frutas, carne, pescado, sopas y comidas preparadas

Fuente: (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

## 2.1.2. Tratamiento de tipo químico

### 2.1.2.1. Conservación sin modificación de las características sensoriales

Los conservadores son aditivos que prolongan la vida útil de los alimentos, al evitar el deterioro causado por microorganismos y sus toxinas, la oxidación (lipídica y enzimática), los cambios de color y la inestabilidad de los componentes de los alimentos (Tabla 5).

**Tabla 5. Conservantes y sus funciones.**

Conservante	Funciones
<b>Ácido cítrico y ascórbico</b>	Antioxidantes, preservantes y secuestrantes
<b>Ácido benzoico y benzoatos</b>	Bactericidas y fungicidas
<b>Ácido propiónico y propionatos</b>	Antifúngicos en productos de panadería
<b>BHA (butil-hidroxi-anisol)</b>	Antioxidante
<b>BHT (butil-hidroxi-tolueno)</b>	Antioxidante
<b>CMC (carboximetil-celulosa)</b>	Estabilizante
<b>Natamicina</b>	Control de mohos y levaduras
<b>Nitratos y nitritos</b>	Protección contra la bacteria <i>Clostridium botulinum</i> y sus toxinas (Cárnicos y lácteos) Fijador de color
<b>Polifosfatos</b>	Estabilizantes

Fuente: (Castro-Ríos, 2010).

### 2.1.2.2. Conservación con modificación de las características sensoriales

Algunos métodos de conservación se caracterizan por modificar características sensoriales como el sabor, color, textura y aroma; sin embargo son ampliamente utilizados por su efectividad, ya que alargan la vida útil de los productos (Tabla 6).

**Tabla 6. Métodos de conservación que modifican las características sensoriales.**

MÉTODO	DESCRIPCIÓN	APLICACIONES
<p>Salazón</p> 	<p>Disminuye la <math>a_w</math> por adición de altas cantidades de cloruro de sodio (sal) al alimento; puede ser aplicado por inmersión en salmuera o por impregnación al vacío. Su efecto es la deshidratación parcial de los alimentos e inhibiendo el crecimiento de microorganismos, y disminuyendo la actividad enzimática, contribuyendo al sabor, olor y textura de los alimentos.</p>	<p>Quesos, carnes, pescados y piezas enteras de carne (jamón serrano, jamón ibérico, jamón parma, <i>prociutto</i>, jamón toscano, jamón bayonne).</p>
<p>Ahumado</p> 	<p>Se somete el alimento a la acción indirecta de compuestos volátiles procedentes de la combustión de virutas o aserrín de maderas duras o humo líquido. Se deshidrata parcialmente el alimento y algunos compuestos presentes en el humo tienen acción antimicrobiana.</p> <p>Emplea temperaturas entre 20 a 25°C (ahumado en frío) o 75 a 80°C (ahumado en caliente) y una humedad relativa relativamente entre 70 a 80%.</p>	<p>Productos cárnicos que han sido sometidos a otros procesos de conservación como la salazón o la deshidratación</p>
<p>Acidificación</p> 	<p>Consiste en disminuir el pH, sea de forma natural (fermentaciones) o de forma artificial (adicionando ácidos orgánicos), esto tiene un efecto directo en los microorganismo. La fermentación consiste en utilizar una fuente de energía (principalmente carbohidratos) en presencia de oxígeno, generando ácidos orgánicos. Los ácidos orgánicos adicionados con mayor frecuencia son: cítrico, ascórbico, propiónico, málico, tartárico y láctico.</p>	<p>Se centran en frutas y hortalizas</p>
<p>Azucarado</p> 	<p>Se adiciona alta cantidad de azúcar (sacarosa) u otro endulzante al alimento, disminuyendo el <math>a_w</math>, lo que dificulta el crecimiento de microorganismos, al generar una deshidratación parcial. Requiere de la combinación de otros métodos de conservación como la concentración por evaporación, esterilización o la pasteurización.</p>	<p>A partir de este método de obtienen productos como: conservas de frutas, jalea de frutas, mermeladas, arequipe (dulce de leche), leche condensada y caramelos.</p>

Fuente: Castro-Ríos (2010).

### 2.1.3. Tratamientos emergentes (procesos no térmicos)

En el procesado no térmico, la temperatura del alimento se mantiene por debajo de las temperaturas normalmente utilizadas en los tratamientos térmicos, por lo tanto la degradación de la calidad, debida a la utilización de altas temperaturas, es mínima en estas condiciones. Se espera que las vitaminas, nutrientes, aromas, etc. no sufran cambios o que éstos sean mínimos.

- **Irradiación**

Consiste en exponer a los alimentos a energía procedente de fuentes como los rayos gamma, los rayos X o los haces de electrones. Junto con los tratamientos térmicos es la única que conduce a la destrucción de los microorganismos contaminantes de los alimentos. No sube la temperatura de los alimentos, por lo que se pueden seguir manteniendo la categoría de frescos. La radiación ionizante radioliza los componentes de los seres vivos, ente ellos el agua, produciendo radicales libres que pueden recombinarse, tiene un efecto directo sobre el ADN del núcleo celular y radioliza las moléculas responsables del metabolismo celular. El Co-60 es el isótopo radioactivo más generalizado en los irradiadores de alimentos. Las dosis máximas permitidas a los alimentos en el código alimentario internacional son de 10 kGy (10 kiloGrays) (Aguado-Alonso, *et al*, 2002).

Aplicaciones: Inhibe la germinación de brotes en el almacenamiento de patatas, cebollas y ajos. Retrasa proceso de maduración de frutas. Elimina microorganismos patógenos en especias, carnes, ovoproductos, lácteos, pescados y mariscos, e inactiva parásitos.

- **Altas presiones**

Consiste en someter el producto a presiones comprendidas entre 4.000 y 9.000 bar. A estas presiones se inactivan bacterias y ciertas enzimas, pero no se afecta el sabor del alimento. La base de la aplicación de altas presiones a los alimentos es comprimir el agua alrededor del alimento. El alimento se somete a alta presión durante un periodo de tiempo determinado, la permanencia depende del tipo de alimento y la temperatura de proceso. Una vez transcurrido se somete la cámara a descompresión y se saca la carga, colocándose otra nueva para volver a comenzar el ciclo. La presión se manifiesta instantánea y uniformemente y, una vez bajo presión, no es necesario el aporte de más energía para mantener el sistema a una presión dada, es decir no hay pérdida de energía.

Este tratamiento es independiente del tiempo/masa, lo cual reduce el tiempo de procesado (Vanaclocha & Requena, 2003).

Aplicaciones: Zumos de frutas confituras, leche y productos lácteos, huevos y ovoproductos.

- **Campos eléctricos pulsantes de alta intensidad**

Se aplican a los alimentos fluidos en forma de impulsos cortos con una duración de pulso entre unos pocos microsegundos y milisegundos. Los alimentos pueden ser procesados a temperatura ambiente o a temperaturas de refrigeración. Con este tratamiento, el alimento se procesa durante un periodo de tiempo corto y la pérdida de energía debida al calentamiento de los alimentos es mínima. Los campos eléctricos pulsantes pueden inactivar microorganismos y enzimas, sin embargo, esta inactivación se produce cuando se sobrepasa un cierto umbral de intensidad del campo eléctrico. Basándose en la teoría de ruptura dieléctrica, los campos eléctricos externos inducen una diferencia de potencial entre las membranas de las células conocida como “potencial transmembrana” (Vanaclocha & Requena, 2003).

Aplicaciones: Alimentos fluidos, ejemplos: leche, huevo, zumos de frutas.

- **Campos magnéticos oscilantes**

Éstos, influyen en la dirección de migración y alteran el crecimiento y reproducción de los microorganismos. Los campos magnéticos incrementan la síntesis de ADN, cambian la orientación de las biomoléculas y biomembranas hacia una dirección paralela o perpendicular al campo magnético aplicado. Los campos magnéticos pueden ser estáticos u oscilantes. Los campos magnéticos estáticos presentan una intensidad magnética constante con el tiempo y la dirección del campo es siempre la misma: los campos magnéticos oscilantes se aplican en forma de pulsos, invirtiendo la carga en cada pulso y la intensidad disminuye con el tiempo, alrededor de 10% de la intensidad inicial. Esta tecnología se puede utilizar para mejorar la calidad y aumentar la vida útil de los alimentos pasteurizados. La condición más importante para obtener una conservación satisfactoria del alimento es la alta resistividad, mayor de 10 a 25 ohms-cm (por ejemplo: zumo de naranja es de 30 ohms-cm). El campo magnético a aplicar es función de la resistividad eléctrica y del espesor del alimento a magnetizar. Este tratamiento implica el envasado hermético del producto en envases de plástico y no utilizar envases metálicos (Vanaclocha & Requena, 2003).

- **Pulsos luminosos**

Implica el uso de pulsos intensos y de corta duración de luz “blanca” de ancho espectro. Esta tecnología es aplicable principalmente a la esterilización o reducción de la población microbiana de la superficie de los materiales de envasado, de los equipos de envasado y de procesado, de los alimentos, así como en muchas otras superficies. Los pulsos luminosos pueden ser utilizados para reducir o eliminar la necesidad de utilizar desinfectantes químicos. El espectro de la luz utilizada con fines de esterilización incluye longitudes de onda desde el ultravioleta (UV) hasta la región del infrarrojo próximo. La duración de los pulsos oscila entre  $1\mu\text{s}$  a 0,1 s. Los flashes se aplican normalmente a razón de 1 a 20 flashes por segundo (Vanaclocha & Requena, 2003).

Aplicaciones: Material de envasado, superficies, alimentos líquidos y sólidos. Carne, pescado y alimentos al horno. Hortalizas (tomates, patatas) y frutas (manzanas y plátanos), así como platos preparados como pastas, entrantes de arroz, etc. entre otros.

## **2.2. Secado**

### **2.2.1. Definición**

El secado es una operación unitaria que se refiere a la eliminación de agua de los materiales de proceso y de otras sustancias. Éste término también se utiliza para referirse a la eliminación de otros líquidos orgánicos, como benceno u otros disolventes orgánicos, de los materiales sólidos (Geankoplis, 1998). El término secar se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia (Treybal, 1980).

De manera general, el secado se refiere a la remoción de pequeñas cantidades de agua de un material sólido. La evaporación se refiere a la eliminación de cantidades de agua bastantes grandes; además, ahí el agua se elimina en forma de vapor en su punto de ebullición. En el secado el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire (Geankoplis, 1998).

## 2.2.2. Términos utilizados para describir el contenido de humedad de una sustancia

### **Contenido de humedad, en base húmeda.**

El contenido de humedad de un sólido o solución generalmente se describe en función del porcentaje en peso de humedad; a menos que se indique otra cosa, se sobreentiende que está expresado en base húmeda, es decir, como:

$$\left[ \frac{kg_{humedad}}{kg_{aire\ seco}} \right] 100 = \left[ \frac{kg_{humedad}}{kg_{sólido\ seco} + kg_{humedad}} \right] 100 = \frac{100X}{1+X} \dots \dots \text{ecuación 1}$$

La humedad  $X$  de una mezcla aire-vapor de agua se define como los kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco. Esta definición de la humedad sólo depende de la presión parcial ( $p_A$ ) del vapor de agua en el aire y de la presión total  $P$  (Geankoplis, 1998).

**Contenido de humedad, base seca.** Se expresa como  $kg\ humedad/kg\ sólido\ seco = X$ .  
Porcentaje de humedad, base seca =  $100X$ .

**Humedad en el equilibrio  $X^*$ .** Es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada del vapor.

**Humedad ligada.** Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

**Humedad no ligada.** Se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

**Humedad libre.** La humedad libre es la humedad contenida por una sustancia en exceso de la humedad en el equilibrio:  $X - X^*$ . Sólo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas (Treybal, 1980).

**Porcentaje de humedad relativa**

La cantidad de saturación de una mezcla de aire-vapor de agua también puede expresarse como porcentaje de humedad relativa  $H_R$  usando presiones parciales.

$$H_R = 100 \frac{p_A}{p_{AS}} \dots\dots\dots \text{ecuación 2}$$

**Punto de rocío**

La temperatura a la cual cierta mezcla de aire y vapor de agua está saturada se llama temperatura de punto de rocío, o simplemente punto de rocío.

**Calor húmedo en una mezcla de aire y vapor de agua**

$C_S$  es la cantidad de calor en J (o kJ) requerido para elevar la temperatura un kilogramo de aire seco más el vapor de agua presente en un °K o en un °C. Las capacidades caloríficas del aire y el vapor de agua se puede suponer constantes en el intervalo normal de temperaturas e iguales a 1.005 kJ/kg aire seco \* K y 1.88 kJ/ kg de vapor de agua °K, respectivamente (Geankoplis, 1998).

$$C_S \left[ \frac{kJ}{kg_{\text{aire seco}}} \right], ^\circ K = 1.005 + 1.88H \dots (SI) \dots\dots\dots \text{ecuación 3}$$

$$C_S \left[ \frac{btu}{lb_m \text{aire seco}} \right], ^\circ F = 0.24 + 0.45H \dots (Sistema Inglés) \dots\dots\dots \text{ecuación 4}$$

**Volumen húmedo de una mezcla de aire y vapor de agua**

El volumen húmedo  $v_H$  es el volumen total en metros cúbicos de 1 kg de aire seco más el vapor que contiene a 101.325kPa (1 atm)abs de presión y a la temperatura del gas.

$$\begin{aligned} v_H \left[ \frac{m^3}{kg_{\text{aire seco}}} \right] &= \frac{22.41}{273} T^{\circ K} \left( \frac{1}{28.97} + \frac{1}{18.02} H \right) \\ &= (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} H) T^{\circ K} \dots\dots\dots \text{ecuación 5} \end{aligned}$$

$$v_H \left[ \frac{\text{pies}^3}{\text{lb}_m \text{aire seco}} \right] = \frac{359}{492} T^{\circ R} \left( \frac{1}{28.97} + \frac{1}{18.02} H \right)$$

$$= (0.0252 + 0.0404H) T^{\circ R} \dots\dots\dots \text{ecuación 6}$$

**Entalpía total de una mezcla de aire y vapor de agua**

La entalpía total  $H_y$  de 1 kg de aire más su vapor de agua es  $H_y$  J/kg o kJ/kg de aire seco. Si  $T_0$  es la temperatura base seleccionada para ambos componentes, la entalpía total es el calor sensible de la mezcla aire-vapor de agua más el calor latente  $\lambda_0$  en J/kg o kJ/kg de vapor de agua, del vapor de agua a  $T_0$ . (Obsérvese que  $(T - T_0) ^\circ\text{C} = (T - T_0)^\circ\text{K}$  y que estas entalpías se refieren al agua líquida.)

$$H_y \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco}} \right] = C_S(T - T_0) + H\lambda_0$$

$$= (1.005 + 1.88H)(T - T_0^\circ\text{C}) + H\lambda_0 \dots\dots\dots \text{ecuación 7}$$

Si la entalpía total se refiere a una temperatura base  $T_0$  de 0 °C (32 °F), la ecuación para  $H_y$  se convierte en:

$$H_y \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg aire seco}} \right] = (1.005 + 1.88H)(T^\circ\text{C} - 0) + 2501.4H \dots (SI) \dots\dots\dots \text{ecuación 8}$$

**Gráfica de humedad para mezclas de aire-vapor de agua**

La gráfica de humedad representa una figura muy conveniente de las propiedades de las mezclas de aire y vapor de agua a 1 atm<sub>abs</sub> de presión. En esta Figura 1 se grafica la humedad  $H$  en función de la temperatura real de la mezcla aire y vapor de agua (temperatura de bulbo seco).

La curva señalada como 100% y que corre hacia arriba y a la derecha, proporciona la humedad de saturación  $H_s$  en función de la temperatura.

Cualquier punto por debajo de la línea de saturación representa una mezcla no saturada de aire y vapor de agua. Las líneas curvas por debajo de la línea de saturación de 100% que corren hacia arriba y a la derecha, representan a las mezclas no saturadas con un porcentaje definido de humedad  $HP$ . Al ir hacia abajo verticalmente desde la línea de

saturación a cierta temperatura, la línea entre la de saturación 100% y la humedad  $H$  cero (la horizontal de la parte inferior) se divide de manera uniforme en 10 incrementos de 10% cada uno.

Todas las líneas de humedad  $HP$  en porcentaje que se han mencionado, así como la línea de humedad de saturación  $H_s$ , se pueden calcular con base en los datos de presión de vapor de agua (Geankoplis, 1998).

### **Temperatura de bulbo húmedo**

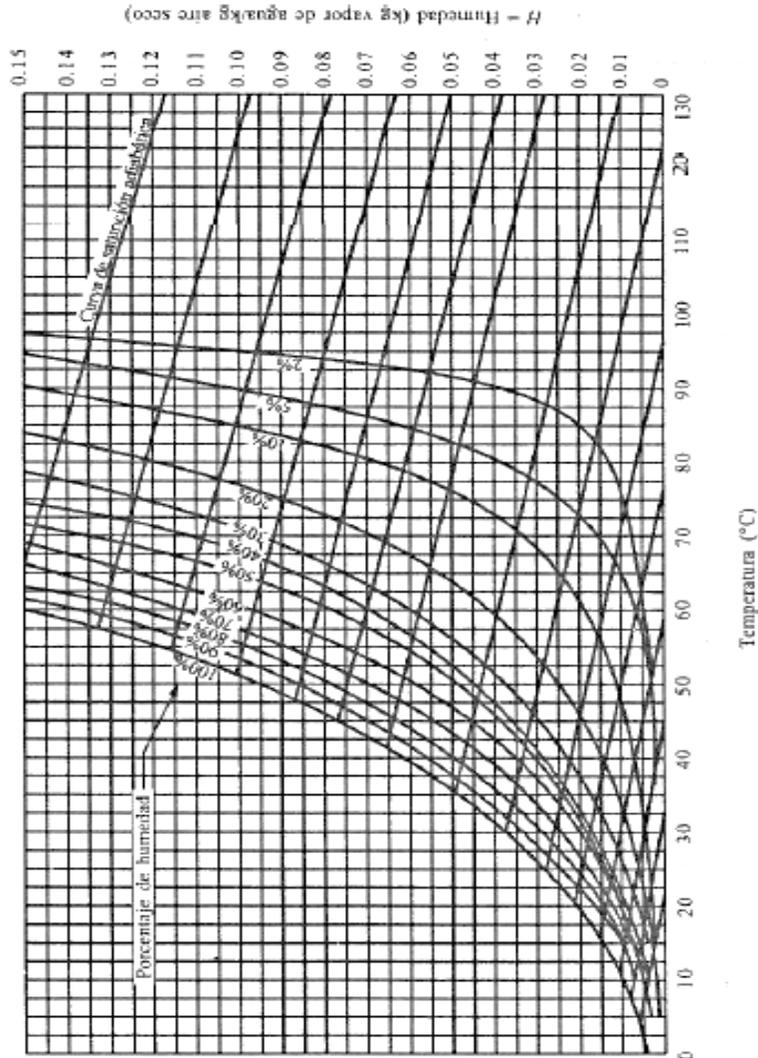
La temperatura de saturación adiabática es aquella que se logra en estado estacionario cuando se pone en contacto una gran cantidad de agua con el gas de entrada. La *temperatura de bulbo húmedo* es la temperatura de entrada en estado estacionario y no de equilibrio que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de agua con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas. Puesto que la cantidad de líquido es pequeña, la temperatura y la humedad del gas no cambian, contrario a lo que sucede en el caso de saturación adiabática, donde la temperatura y la humedad del gas sí varían (Geankoplis, 1998).

## **2.2.3. Curvas de velocidad de secado**

### **2.2.3.1. Determinación experimental de la curva de secado**

Construir una curva de secado, puede realizarse a partir de datos experimentales. Esta será directamente útil para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes en las mismas condiciones de secado (Treybal, 1980).

- Se procede a colocar la muestra en las bandejas
- La muestra de cubrir por completo la base de la charola, de modo que sea solo el material el que quede expuesto al aire caliente
- La pérdida en peso de la humedad durante el secado debe determinarse a diferentes intervalos sin interrumpir la operación, colgando la charola de una balanza adaptada a un gabinete a través del cual fluye el aire de secado (Geankoplis, 1998).



**Figura 1. Gráfica de humedad para mezclas de aire y vapor de agua. Fuente: Geankoplis, 1998.**

**2.2.3.1.1. Datos requeridos para construir la curva de velocidad de secado**

Los datos que se obtienen de un experimento de secado por lotes, generalmente se expresan como peso total  $W$  del sólido húmedo (sólido seco más humedad) a diferentes tiempos de  $t$  horas en el periodo de secado. Primero se recalculan los datos. Si  $W$  es el peso del sólido húmedo en kilogramos totales de agua más sólido seco y  $W_s$  es el peso del sólido seco en kilogramos,

$$X_t = \frac{W - W_s}{W_s} \left[ \frac{\text{kg totales de agua}}{\text{kg de sólido seco}} \right] \dots\dots\dots \text{ecuación 9}$$

Posteriormente se determina el contenido de humedad de equilibrio  $X^*$  (kg de humedad de equilibrio/kg de sólido seco), con el que se puede calcular la humedad libre  $X$  (kg de agua libre/ kg de sólido seco para cada valor de  $X_t$ )

$$X = X_t - X^* \dots\dots\dots \text{ecuación 10}$$

Al sustituir los datos calculados en la ecuación anterior, se traza una gráfica del contenido de humedad libre  $X$  en función del  $t$  (h). Para obtener una curva de velocidad de secado a partir de esta gráfica, se miden las pendientes de las tangentes a la curva, lo cual proporciona valores de  $dx/dt$  para ciertos valores de  $t$ . Se calcula entonces la velocidad  $R$  para cada punto con la expresión,

$$R_c = -\frac{L_s}{A} \frac{dX}{dt} \dots\dots\dots \text{ecuación 11}$$

$R$ = Velocidad de secado ( $kg_{\text{agua}}/hm^2$ )

$L_s$ = Sólido seco utilizado (kg)

$A$ = Área superficial expuesta ( $m^2$ )

Entonces, la curva de velocidad de secado se obtiene graficando  $R$  en función del contenido de humedad.

**2.2.3.1.2 Curva de velocidad de secado.**

En la Figura 2b se muestra la curva de velocidad de secado para condiciones de secado constante. Empezando en el tiempo cero, el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación va en aumento. Al llegar al punto B, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Por otra parte, si el sólido está bastante caliente al principiar la operación, la velocidad de secado puede iniciarse en un punto A'. Este periodo inicial de ajuste en estado no estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado.

La curva de la Figura 2a es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este periodo. Este *periodo de velocidad constante de secado* corresponde a la línea BC en la figura 2b. En el punto C de ambas gráficas, la velocidad de secado comienza a disminuir en el *periodo de velocidad decreciente*, hasta

llegar al punto D. En este primer periodo de velocidad decreciente, la velocidad corresponde a la línea CD en la figura 2b, y por lo general es lineal. En el punto D la velocidad de secado disminuye con más rapidez aún, hasta que llega al punto E, donde el contenido de humedad de equilibrio es  $X^*$ , y  $X = X^* - X^* \approx 0$  (Geankoplis, 1998).

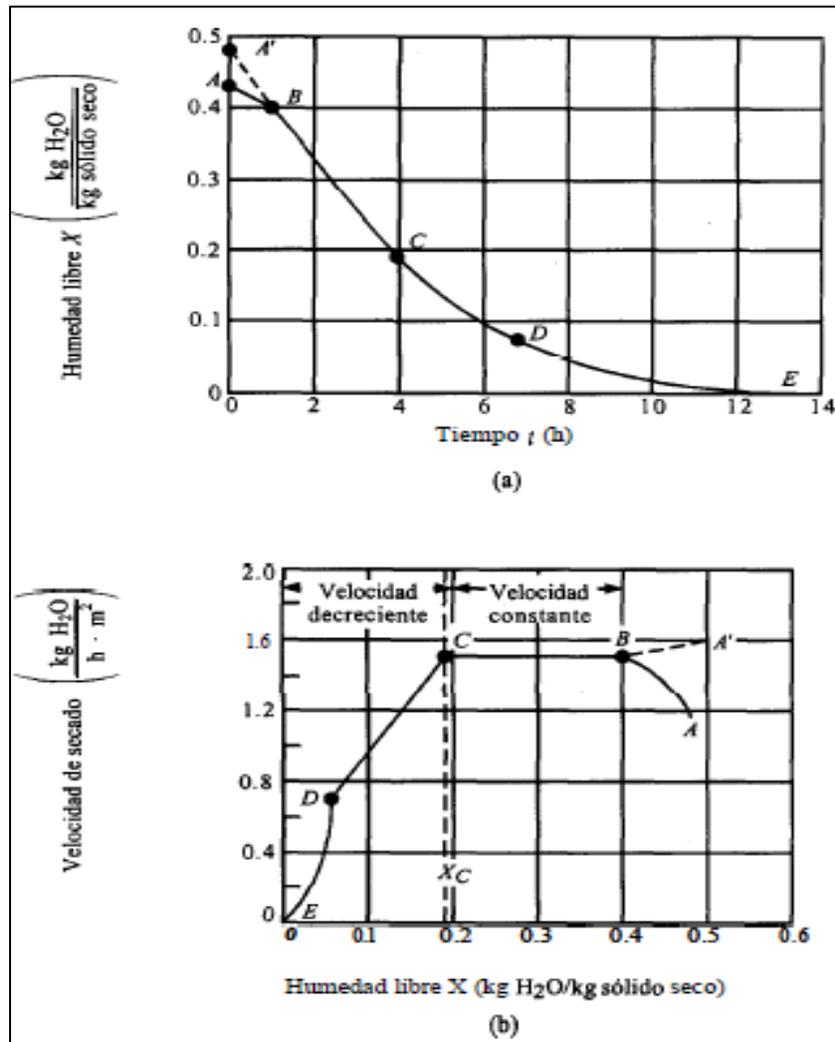


Figura 2. Curvas típicas de velocidad de secado: a) humedad libre, b) curva de velocidad de secado. Fuente: Geankoplis, 1998.

### 2.2.3.1.3. Secado durante el periodo de velocidad constante

El secado de diversos sólidos bajo diferentes condiciones constantes de secado casi siempre produce curvas de forma variable en el periodo de velocidad decreciente, pero en general siempre están presentes las dos zonas principales de la curva de velocidad de secado: el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente.

Durante el primer periodo, la superficie del sólido está muy mojada al principio y sobre ella hay una película de agua continua. La superficie está cubierta con una delgada película de líquido, que se supondrá como humedad total no ligada (Treybal, 1980). Esta capa de agua es agua no combinada y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Sin embargo, las ondulaciones y hendiduras en la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta de la que tendría una superficie completamente plana.

#### **2.2.3.1.4. Secado durante el periodo de velocidad decreciente**

El punto C de la Figura 2b corresponde al *contenido crítico de humedad libre*  $X_c$ . En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad en el punto D de la figura 2b.

El segundo periodo de velocidad decreciente empieza en el punto D, cuando la superficie esta seca en su totalidad. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie.

El calor de evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire (Geankoplis, 1998).

#### **2.2.3.2. Método para el cálculo del periodo de velocidad constante**

Uno de los factores más importantes en los cálculos del secado es el tiempo que se necesita para secar un material, el cual es posible estimar mediante curvas de secado resultantes de la experimentación.

##### **2.2.3.2.1. Método de curva de secado**

Para estimar el tiempo de secado de determinado lote de material, el mejor método consiste en obtener datos experimentales reales bajo condiciones de alimentación, área superficial relativa expuesta, velocidad del gas, temperatura y humedad, que sean, en esencia, las mismas que tendrá el secador que se usará en la práctica. De esta manera, el tiempo requerido para el periodo de velocidad constante se determina directamente con la curva de secado de contenido de humedad libre en función del tiempo.

### 2.2.3.2.2. Método para el cálculo de la curva de velocidad de secado para el periodo de velocidad constante

En lugar de la curva de secado, es posible emplear la curva de velocidad de secado. La velocidad de secado  $R$  se define de la siguiente manera:

$$R = -\frac{W_S}{A} \frac{dX}{dt} \dots\dots\dots \text{ecuación 12}$$

Esta expresión se reordena e integra con respecto al intervalo para secar desde  $X_1$  a  $t_1=0$  hasta  $X_2$  a  $t_2=t$ .

$$t_c = \int_{t_1=0}^{t_2=t} dt = \frac{W_S}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} \dots\dots\dots \text{ecuación 13}$$

Si el secado se verifica dentro del periodo de velocidad constante, de manera que tanto  $X_1$  como  $X_2$  sean mayores que el contenido de humedad crítica  $X_c$ , entonces  $R = \text{constante} = R_c$ . Al integrar la ecuación anterior para el periodo de velocidad constante,

$$t_c = \frac{W_S}{AR_c} (X_1 - X_2) \dots\dots\dots \text{ecuación 14}$$

### 2.2.3.3. Método para calcular el periodo de velocidad decreciente

En el periodo de secado de velocidad decreciente que se muestra en la Figura 8b, la velocidad de secado  $R$  no es constante, sino que disminuye cuando el secado para por la zona de contenido crítico de humedad libre  $X_c$ . Cuando el contenido de humedad libre  $X$  es cero, la velocidad también lo es.

El tiempo de secado para cualquier región entre  $X_1$  y  $X_2$  se obtiene mediante:

$$t = \frac{W_S}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{R} \dots\dots\dots \text{ecuación 15}$$

Durante el periodo de velocidad decreciente  $R$  varía. La ecuación anterior se puede integrar gráficamente para cualquier forma de la curva de secado de velocidad decreciente, trazando  $1/R$  en función de  $X$  determinando el área bajo la curva (Geankoplis, 1998).

### **2.3. Cambios en los alimentos durante el secado**

- **Cambios físicos.**

Es probable que durante el proceso de secado ocurran cambios indeseables en los alimentos. Color, tamaño y forma pueden sufrir cambios de manera considerable de manera que cuando se intente llevar al alimento a una reconstitución, este no recupera las características originales. El cambio de color y textura puede darse debido a la exposición de altas temperaturas durante el secado, cambios que perduran después de la reconstitución. Seleccionar las condiciones del secado, especialmente la temperatura, es de mayor importancia (Kalogirou, 2014).

Una consecuencia común de la deshidratación es la pérdida en algún grado de la facilidad de rehidratación. Las causas debidas al encogimiento y la distorsión de las células y los capilares, pero también químicas y fisicoquímicas en el nivel coloidal. El calor y los efectos de la concentración de las sales que resultan de la eliminación de agua pueden desnaturalizar parcialmente las proteínas que después no podrán reabsorber plenamente y ligar el agua. También los alimentos y las gomas pueden sufrir cambios y hacerse menos hidrofílicos. Los azúcares y las sales se escapan de las células dañadas, entrando al agua que se emplea para reconstituir los alimentos deshidratados, lo cual resulta en la pérdida de turgencia. Estos y otros cambios químicos hacen que la cantidad de agua reabsorbida por los productos secados sea algo menor que el contenido de agua original, y contribuyen a las alteraciones en la textura (Potter, 1978).

- **Cambios químicos.**

Los cambios de sabor y aroma de los productos deshidratados se deben fundamentalmente a la pérdida de componentes volátiles durante el proceso, también al desarrollo de sabores y aromas típicos de productos cocidos provocados por las altas temperaturas. Entre más altas sean las temperaturas y mayores los tiempos a los que se someten los alimentos al proceso de secado, más perceptibles son éstos cambios. Las temperaturas elevadas si bien reducen el tiempo de secado, aceleran el pardeamiento, pérdida de vitamina C y además producen deformaciones pronunciadas en los trozos de fruta (Andrea Catraro, 2014). Por eso en ocasiones se emplean métodos ideados para atrapar y condensar los vapores producidos en el secador y devolverlos al producto secado. En otras técnicas se añaden al producto esencias y compuestos saborizantes, o bien se reducen las pérdidas de sabor incorporando gomas y otros materiales a cientos

alimentos líquidos antes de secarlos. Algunos de estos materiales tienen el poder de fijar el sabor, otros revisten las partículas secadas y proporcionan una barrera física contra la pérdida de los componentes volátiles (Potter, 1978).

Las reacciones de oscurecimiento pueden deberse a cualquiera de las causas usuales, inclusive las oxidaciones enzimáticas de los polifenoles y de otros compuestos susceptibles, en los casos en los que no se han inactivado las enzimas oxidantes. Las temperaturas empleadas en el secado muchas veces no bastan para destruir las enzimas durante el proceso, de manera que es común pasteurizar o escaldar los alimentos mediante calor o productos químicos antes del secado. La caramelización de los azúcares y el chamuscado de otros materiales cuando el calor es excesivo es otro tipo común de oscurecimiento. El oscurecimiento no enzimático, o reacción de Maillard, que es la reacción de los grupos aldehído y amino de los azúcares y las proteínas, es muy importante en la deshidratación de los alimentos. Al igual que otras reacciones químicas, la reacción de Maillard es propiciada por temperaturas elevadas y por la alta concentración de los grupos reactivos cuando también está presente algo de agua. Durante el proceso de deshidratación, se concentran los grupos reactivos. La reacción de Maillard generalmente es más rápida durante el secado cuando la humedad ha sido reducida al nivel de un 20 ó 15%. A medida que este porcentaje disminuye, la velocidad de reacción de Maillard disminuye, de manera que en los productos deshidratados que han retenido menos de un 2% de humedad, los cambios adicionales en el color debido a esta clase de reacción son apenas perceptibles aun después de un almacenamiento prolongado. Por consiguiente, al diseñar un sistema de secado, procuramos deshidratar rápidamente en la escala de humedad del 15 al 20% a fin de reducir al mínimo el tiempo en que existen las condiciones óptimas para la reacción de Maillard (Potter, 1978).

- **Cambios fisicoquímicos.**

En el secado, dos procesos toman lugar: (1) uno es la transferencia de calor hacia el producto usando energía a partir de una fuente de calor, y (2) la otra en la transferencia de masa de humedad desde el interior del producto hasta la superficie del mismo y de ésta hacia el seno del aire en forma de vapor (Kalogirou, 2014). El mecanismo más presente en el proceso de secado es la difusión de agua en estructuras finas y capilares del sólido, poros y pequeños agujeros llenos con vapor de agua (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

La absorción de calor por parte del producto suministra la energía necesaria para la vaporización del agua del producto. Desde la superficie del producto, la humedad es removida por evaporación. La humedad comienza a evaporarse desde la superficie del producto cuando la energía absorbida incrementa suficientemente su temperatura y la presión de vapor de la humedad del producto excede la presión de vapor del aire que rodea. La humedad se desplaza hacia superficie del producto por difusión desde el interior. Y esto depende de las características naturales del producto y el contenido de humedad. Si la velocidad de difusión es lenta, esto se convierte en un factor limitante en el proceso de secado, pero si por lo contrario, la velocidad de difusión es lo suficientemente rápida, el factor de control es la velocidad de evaporación desde la superficie, que ocurre al inicio del proceso de secado (Kalogirou, 2014).

#### **2.4. Equipos de secado utilizados en la industria alimentaria de acuerdo a la transferencia de calor**

##### **2.4.1. Secadores directos o por convección**

Se caracteriza por utilizar gases calientes que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección fundamentalmente y que arrastran fuera del secador los vapores producidos (Tabla 7). Los gases calientes pueden ser:

- Aire calentado por vapor de agua
- Productos de la combustión
- Gases inertes
- Vapor recalentado
- Aire calentado por radiación solar

En este tipo de equipos el consumo de combustible es tanto mayor cuanto más bajo es el contenido de humedad residual del producto final. También, este tipo de secadores pueden ser continuos o intermitentes, siendo el costo de funcionamiento menor en los primeros y utilizándose los segundos para bajas capacidades de producción (Maupoey *et al.*, 2001).

Pueden incluir materiales pastosos o en terrones que deben esparcirse sobre platos y materiales similares. Consta de un gabinete que contiene platos móviles sobre los cuales se coloca el sólido por secar. Una vez cargado, el gabinete se cierra y se introduce aire calentado con vapor a través y entre los platos, para evaporar la humedad (secado por circulación cruzada). Cuando el sólido alcanza el grado de sequedad querido, el gabinete se abre y los platos se reemplazan con un nuevo lote.

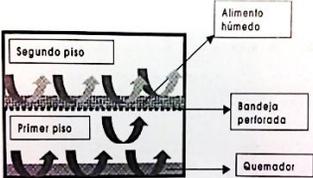
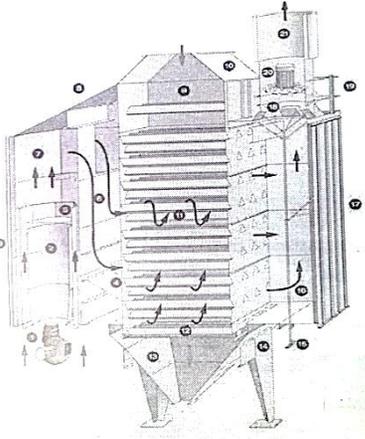
Una de las dificultades más importantes en la utilización de secadores del tipo descrito es la no uniformidad del contenido en humedad, propia del producto terminado que se extrae de diferentes partes del secador. Esa falta de uniformidad es principalmente el resultado del movimiento inadecuado y no uniforme del aire dentro del secador. Es importante eliminar las bolsas de aire estancado y mantener una humedad razonable uniforme, al igual que una temperatura uniforme, en todo el secador. Con este fin, se deben pasar grandes volúmenes de aire sobre los platos, si es posible a velocidades entre 3 o 6 m/s (10 o 20 ft/s), siempre y cuando el sólido no salga volando de los platos a estas velocidades del aire. Esto puede lograrse introduciendo sólo una vez grandes cantidades de aire caliente fresco a través del secador; pero, la pérdida de calor en el aire descargado será entonces de un costo prácticamente prohibitivo. En lugar de esto, de ordinario se acostumbra admitir sólo cantidades relativamente pequeñas de aire fresco y recircular su mayoría, que algunas veces equivale del 80 al 95% (Geankoplis, 1998).

También es importante que los platos en estos secadores se llenen a nivel con el borde, pero que no queden sobrecargados, de forma que se tenga un espacio libre uniforme para el movimiento del aire.

La recirculación de grandes cantidades de aire hace necesariamente que la humedad del aire en el secador aumente considerablemente más que la del aire fresco. Por tanto, se obtienen bajos porcentajes de humedad y en consecuencia rapidezces de secado razonablemente elevadas, utilizando temperaturas lo más altas posible. El secador debe aislarse completamente, no sólo para conservar el calor, sino también para que las paredes internas se mantengan a temperaturas mayores del punto de formación de rocío del aire, a fin de prevenir la condensación de humedad sobre las paredes (Treybal, 1980).

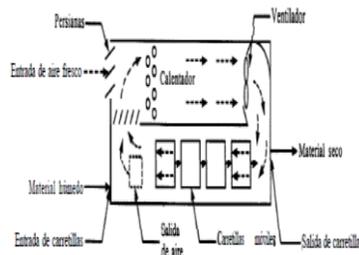
Los secadores del tipo descrito son relativamente baratos de construir y requieren bajos costos de mantenimiento. Sin embargo, su operación es costosa debido a la baja economía calorífica y altos costos de trabajo. Cada vez que el secador se abre para descargar y cargar, la temperatura del interior baja; todas las partes metálicas del secador deben calentarse nuevamente a la temperatura de operación cuando la operación se vuelve a realizar. Los requerimientos de mano de obra para la carga, descarga y supervisión del ciclo de secado son altos (Treybal, 1980).

**Tabla 7. Algunos secadores de tipo directo o por convección.**

TIPO DE SECADOR	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
<p>Secadores de horno o estufa</p> 	<p>Es el más simple y consta de un pequeño recinto de forma paralelepípedica de dos pisos. El aire de secado se calienta en un quemador de piso inferior y atraviesa por convección natural o forzada el segundo piso perforado en el que se asienta el lecho de producto a secar</p>	<p>Utilización en la industria reducida.          Usos: manzanas, lúpulo y forrajes verde</p>
<p>Secadores de bandejas o de armario</p> 	<p>Funciona en régimen intermitente. Está formado por una cámara metálica rectangular que contiene unos soportes móviles sobre los que se apoyan los bastidores. Cada bastidor lleva un cierto número de bandejas poco profundas, montadas unas sobre otras con una separación conveniente que se cargan con el material a secar. Se hace circular aire caliente entre las bandejas por medio del ventilador acoplado al motor haciéndole pasar previamente por el calentador constituido por un haz de tubos por cuyo interior circula normalmente vapor de agua. Los tabiques distribuyen uniformemente el aire sobre las pilas de bandejas. Por medio del conducto de salida se evacúa continuamente aire húmedo y a través de la abertura de entrada penetra aire fresco. Al final del ciclo de secado, normalmente largo, se saca de la cámara al conjunto de los bastidores para proceder a la descarga del producto seco y a una nueva carga. Cuando las características del material y su manejo lo permiten, se utilizan bandejas perforadas en las que el aire circula a través de la capa de sólidos, con lo que se consigue aumentar la superficie de sólido expuesta a la acción del aire y consiguientemente disminuyendo la duración del ciclo de secado.</p> <p>Los rendimientos térmicos de este tipo de secador suelen estar comprendidos entre el 20 y el 50%, pudiendo ser más bajos. En general se aplican cuando la capacidad necesaria no excede de 25 a 50 kg/h de producto seco. En ellos se puede secar prácticamente cualquier material, pero a causa de la mano de obra requerida para la carga y descarga, su operación resulta costosa para su baja capacidad de producción.</p>	<p>Su polivalencia y la buena calidad comercial de los productos obtenidos los hace utilizables en la deshidratación de productos agrícolas tales como carlota, espinacas, ajo, perejil, guisantes, judías verdes, champiñones, cebollas, etc.</p>

**Tabla 7. Algunos secadores de tipo directo o por convección. (Continuación)**

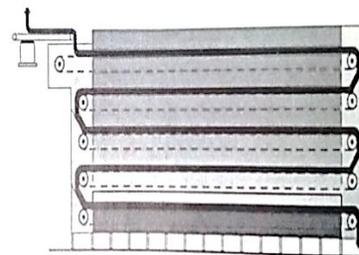
**Secadores de túnel**



Semejantes a los secadores de bandejas pero de funcionamiento semicontinuo, para lo cual los sólidos se colocan sobre bandejas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. Cuando se introduce una nueva carretilla, la primera es evacuada conteniendo el producto seco, mientras las restantes adelantan una posición en su trayectoria. Cuando se desea secar partículas sólidas granulares, pueden utilizarse transportadores perforados o de fondo de tamiz. Los sólidos granulares húmedos se transportan en forma de una capa que tiene entre 25 y 150 mm de profundidad, sobre una superficie de tamiz o perforada a través de la cual se fuerza el paso de aire caliente, ya sea hacia arriba o hacia abajo. El secador consta de diversas secciones en serie, cada una con un ventilador y serpentines de calentamiento. Un ventilador adicional extrae cierta cantidad de aire hacia la atmósfera.

Sólidos granulares húmedos. Los materiales en forma de pasta pueden preformarse en cilindros y colocarse sobre el transportador para secarse.

**Secadores de cinta transportadora (o cinta túnel)**



Secadores continuos con circulación de aire a través del material que se traslada sobre un transportador de cinta perforada. La cinta transportadora se traslada a una velocidad fijada por el tiempo de secado; suele ser de malla metálica entrelazada o de lámina de acero perforada. El producto húmedo se carga automáticamente, en un extremo de la cinta, en capas de 10 a 15cm de espesor. Generalmente, en la primera sección del equipo el aire de secado atraviesa perpendicularmente el lecho del producto en sentido ascendente, mientras que en las proximidades del extremo de descarga circula un sentido descendente con el fin de evitar el arrastre de las partículas finas del producto casi seco. La dirección del aire a través del producto es usualmente determinada por las características del producto.

Para el secado a gran escala de un solo producto. Son poco versátiles, es decir, no son adecuados para procesos en los que deba cambiar frecuentemente la materia prima y, por tanto, las condiciones de secado.

Fuente: (Fito Maupoey *et al.*, 2001) (Geankoplis, 1998) (Heldman, 1981) (Mustayen *et al.*, 2014)

#### **2.4.2. Secadores indirectos o por conducción**

Se caracterizan porque en ellos la transmisión de calor hasta el material húmedo tiene lugar por conducción a través de una pared, generalmente metálica (Tabla 8). La fuente de calor puede ser:

- Vapor que condensa
- Agua caliente
- Aceites térmicos
- Gases de combustión
- Resistencia eléctrica

Estos equipos permiten la recuperación del disolvente y son apropiados para la desecación a presiones reducidas y en atmósferas inertes, lo que les hace recomendables para deshidratar productos termolábiles o fácilmente oxidables, pudiendo utilizar métodos de agitación para asegurar una mejor transmisión del calor y eliminar los gradientes de humedad del producto. Al igual que los directos, pueden funcionar en régimen continuo o intermitente (Fito Maupoey *et al.*, 2001) (Mustayen *et al.*, 2014)

Esta clase de secador consta de un gabinete construido de hierro colado o plancha de acero con puertas herméticas, de tal manera que se pueda operar al vacío. Los anaqueles huecos de acero se montan dentro de las cámaras y se conectan en paralelo, con los colectores de vapor de entrada y de salida. Las bandejas que contienen los sólidos mojados se colocan sobre los anaqueles huecos. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Para operaciones a temperaturas más bajas, se usa circulación de agua caliente en lugar de vapor para suministrar el calor que vaporiza la humedad. Los vapores se colectan en un condensador.

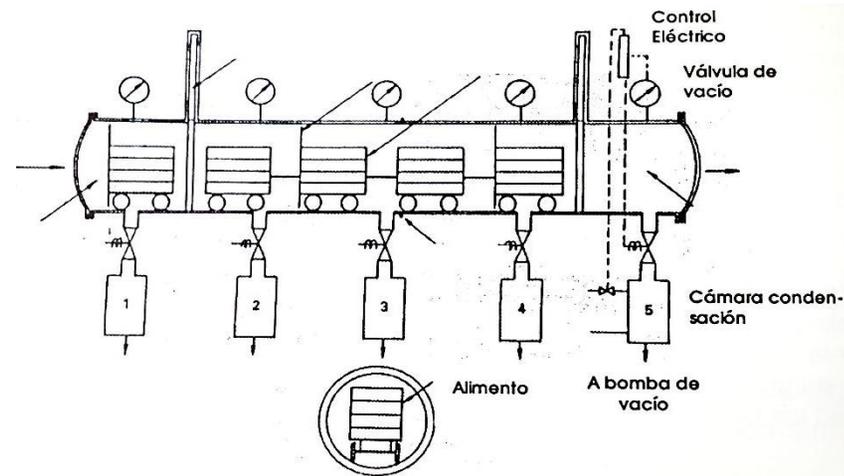
Estos secadores se usan para secar materiales costosos o sensibles a la temperatura, o bien que se oxiden fácilmente (Geankoplis, 1998).

**Tabla 8. Algunos secadores de tipo indirecto o por conducción.**

TIPO DE SECADOR	CARACTERÍSTICAS	APLICACIONES
Secadores de bandejas al vacío	<p>Indirectos e intermitentes, formados por una cámara herméticamente cerrada provista de placas calefactoras y bandejas portadoras del material a secar, conectada a una bomba de vacío a través de un condensador.</p> <p>El elemento calefactor suele ser un fluido tal como agua caliente (para bajas temperaturas), vapor de agua o, frecuentemente, aceites térmicos. En estos casos las placas, huecas, construidas por doble lámina de acero, están conectadas en paralelo a colectores de entrada y salida del fluido térmico. En algunos casos se emplean placas calentadas eléctricamente.</p> <p>El producto a secar se dispone sobre bandejas metálica que se colocan sobre la superficie calefactora, el calor se transmite por conducción hasta el producto que a baja temperatura, debido al elevado grado de vacío, libera vapores de disolvente. Los gases húmedos son evacuados continuamente hasta un condensador que elimina la humedad o vapores de disolvente tras condensarlos. Los gases no condensados llegan a la fuente de vacío (eyector o bomba) donde son extraídos.</p>	<p>Industrialmente para deshidratar productos altamente valiosos, sensibles a la temperatura o fácilmente oxidables, o incluso para recuperar disolventes valiosos</p>
Secadores por sublimación (liofilizadores)	<p>Son secadores de bandejas a vacío en los cuales la eliminación de la humedad (o disolvente) tiene lugar por sublimación del vapor de agua a partir de hielo a alto vacío y temperaturas por debajo de 0°C. Consisten en una cámara a vacío, dotada de una bandeja donde se coloca el alimento a liofilizar y de unos calentadores para suministrar el calor latente de sublimación. Para la condensación del vapor de agua generado se dispone de serpentines refrigerantes dotados de un sistema automático de descongelación con objeto de mantenerlos libres de hielo de forma que mantengan su capacidad de condensación.</p> <p>Los componentes básicos de un equipo de liofilización incluyen un evaporador, donde el calor es generado para ser utilizado como fuente de energía para secar, y un condensador que colecta el vapor producido por el producto. El condensador y el evaporador están localizados en una cámara de vacío y el vacío se mantiene por</p>	<p>Adecuados para la mayoría de los alimentos pero están limitados para aquellos que no son adecuadamente deshidratados por otros métodos. Frutas y verduras: fresa y el café.</p>

**Tabla 8. Algunos secadores de tipo indirecto o por conducción. (Continuación)**

medio de una bomba de vacío o un eyector de vapor. En las instalaciones discontinuas el producto se coloca en una cámara de liofilización hermética y la temperatura de calefacción de la bandeja se mantiene inicialmente a 100-120°C, reduciéndose posteriormente de forma gradual a lo largo de la deshidratación (6-7 horas). Las condiciones adecuadas para la liofilización dependen del alimento, pero su temperatura superficial no debe superar en ningún caso los 60°C.

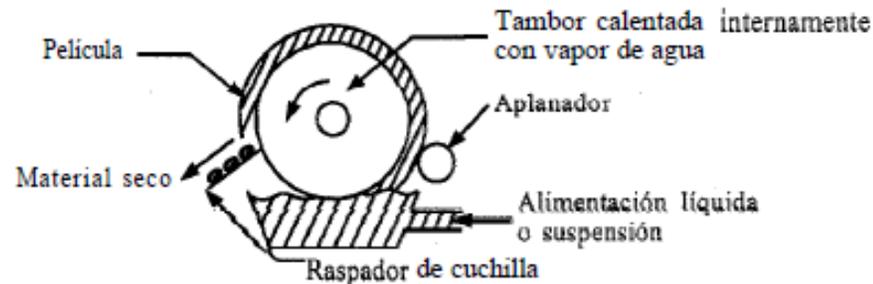


Secadores de tornillo sin fin

Continuos y de calentamiento indirecto, formados esencialmente por un transportador de tornillo sin fin horizontal encerrado dentro de una carcasa cilíndrica encamisada. La alimentación que entra por un extremo se transporta lentamente a través de la zona caliente y se descarga por el otro extremo. El vapor generado se extrae a través de conducciones colocadas en la parte superior de la carcasa. La velocidad de rotación del transportador es lenta (2-30 rpm). Los secadores de tornillo sin fin operan con sólidos demasiado finos o demasiado pegajosos. Están completamente cerrados y permiten recuperar los vapores de

**Tabla 8. Algunos secadores de tipo indirecto o por conducción. (Continuación)**

	disolvente. Si disponen de alimentadores con cierre adecuado, pueden trabajar bajo un vacío moderado	
Secadores de tambor o rodillo	El secado en estos equipos se basa en la aplicación del alimento, líquido o semilíquido, sobre la superficie exterior de un cilindro horizontal que gira lentamente. Estos secadores consisten de cilindros metálicos huecos que giran sobre su propio eje e internamente son calentados con vapor, agua caliente u otro medio de calentamiento. El producto se seca mientras se adhiere a la superficie del tambor y es removido por una cuchilla. El secado de la película del producto ocurre como resultado de la conducción del calor de la superficie del tambor al producto. Esto resulta con coeficientes de transferencia de calor, relativamente altos, pero puede disminuir la calidad de manera significativa cuando se secan productos sensibles al calor. Esta reducción en la calidad puede minimizarse asegurándose que la película del producto tenga un espesor uniforme y que la película seca sea retirada completamente.	Dos son los campos fundamentales de la aplicación de esta técnica en el sector de los alimentos: la preparación de puré de patatas en escamas y la fabricación de pulpa de tomate



Fuente: (Fito Maupoey et al., 2001); (Heldman, 1981); (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003); (Geankoplis, 1998); (Mustayen et al., 2014)

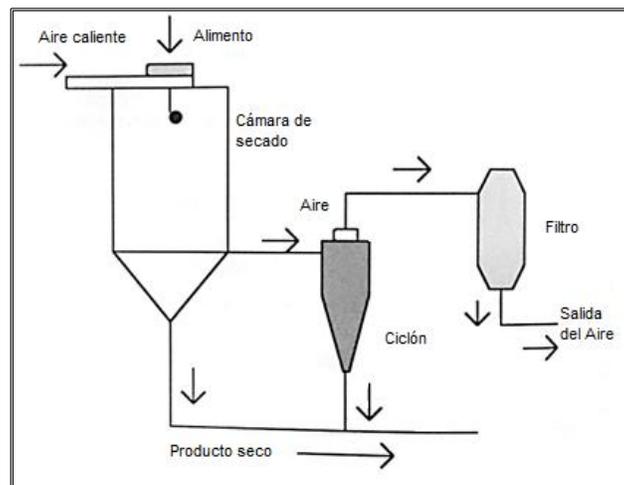
### 2.4.3. Secadores por radiación

Se basan en la transmisión de la energía radiante para evaporar la humedad del producto. Ésta energía se produce eléctricamente (infrarrojos) o por medio de refractarios únicamente calentados con gas. El costo de la energía necesaria para este método es de dos a cuatro veces mayor que el costo del combustible en los secadores descritos anteriormente (Fito Maupoey *et al.*, 2001)

## 2.5. Métodos de secado

### 2.5.1. Secado por aspersión

Este tipo de secado es aplicado para alimentos disueltos en agua e incluye la formación de gotas pequeñas que, después del secado, produce partículas secas del alimento. Inicialmente, el alimento fluido es transformado en gotas por pulverización dentro de un medio continuo con aire caliente. Comúnmente se utilizan ciclos abiertos en este tipo de secado (Figura 3). El aire utilizado es calentado y, después del secado, se limpia antes de ser liberado a la atmósfera. El aire que es dejado en el sistema puede aún contener calor. El segundo tipo de arreglo utilizado es el uso de un circuito cerrado con un calentamiento medio (aire, CO<sub>2</sub>, etc.).



**Figura 3. Ciclo o circuito abierto, secado por aspersión bajo una corriente de flujo.**

**Fuente: Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003.**

El aire es usado en el proceso de secado, entonces es limpiado, secado y utilizado otra vez, en un proceso continuo. La eficiencia de este tipo de secado es más alta que en el

sistema abierto. En el sistema de circuito cerrado, el producto seco es lo único que queda dentro del sistema, mientras que en el circuito abierto, el aire caliente es además liberado al exterior y podría contener micro partículas.

El hecho de que el tiempo de retención pueda ser tan bajo como de 3 a 10 segundos y la partícula del producto nunca debe estar a una temperatura más alta que la temperatura de bulbo húmedo del aire utilizado para el secado, es de considerable significancia. Ésta situación permite el uso de altas temperatura dentro de la cámara de secado sin causar daño al producto (Heldman, 1981).

La característica más importante del secado por aspersion es la formación de pequeñas gotas, las cuales entran en contacto con el aire caliente. Rompiendo la corriente del alimento dentro de las pequeñas gotas se produce la atomización del mismo (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

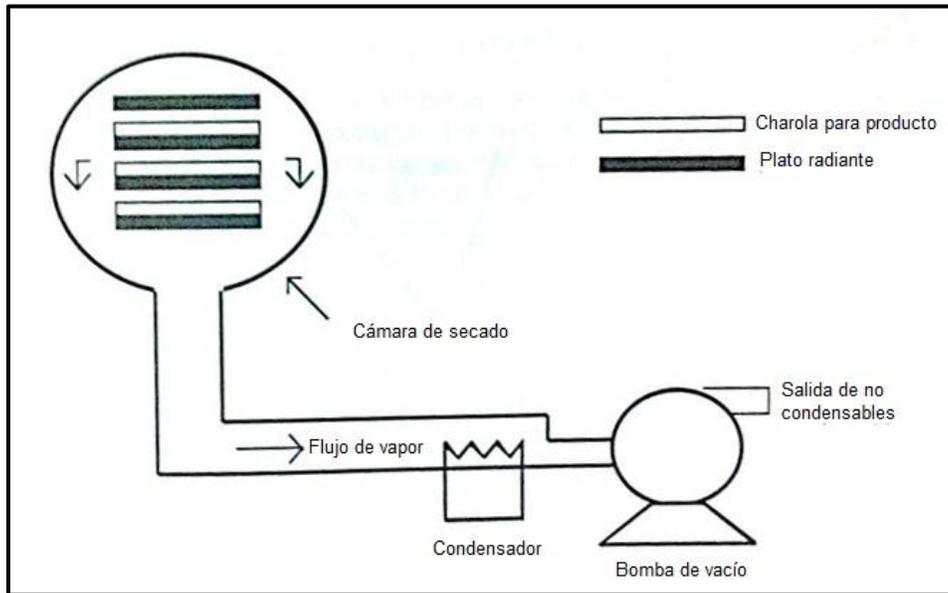
En general, se pueden considerar dos paso en el proceso. El primer paso es la atomización o formación de gotas, mientras que el segundo paso es la evaporación de la humedad de las partículas sólidas del producto (Heldman, 1981).

### **2.5.2. Liofilización**

Este método de secado fue desarrollado con el fin de superar la pérdida de componentes responsables del aroma de los alimentos en los procesos de secado convencionales (Figura 4). El secado en frío consiste principalmente de dos etapas: (1) el producto es congelado, y (2) se seca el producto por sublimación directa de hielo bajo presión reducida.

La liofilización ha mostrado ser un método efectivo para extender la vida de los alimentos; esto consiste en dos importantes características:

1. La ausencia de aire durante el procesamiento junto con la disminución de la temperatura, previene el deterioro debido a la oxidación o a las modificaciones del producto.
2. Secar a una temperatura inferior a la del ambiente, lo que no permite la descomposición de los alimentos o cambios en su estructura, textura, apariencia o aroma como consecuencia de la alta temperatura para ser secado al vacío con daños mínimos.



**Figura 4. Sistema básico de secado por frío. Fuente: Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003.**

Los productos sometidos a este método de secado que han sido adecuadamente empacados pueden situarse en anaquel por un tiempo ilimitado, manteniendo las propiedades físicas, químicas, biológicas y sensoriales del producto fresco. La disminución de la calidad debido a reacciones de oscurecimiento enzimático y no enzimático también se ven reducidas; sin embargo, la oxidación de los lípidos causada por los bajos niveles de humedad alcanzados durante el secado, es alta en productos liofilizados. El uso de empaques impermeables de oxígeno puede controlar esta oxidación. El oscurecimiento no enzimático ocurre ligeramente durante el secado, ya que la reducción del contenido de humedad del producto durante el proceso es también instantánea. El uso de una baja temperatura reduce también la desnaturalización de las proteínas en este tipo de secado.

Los productos liofilizados pueden recuperar su forma estructura originales mediante la adición de agua porque la estructura esponjosa de esos productos permite su rápida rehidratación. Las características de rehidratación son similares a las de un producto fresco. La porosidad de los productos liofilizados permite una más rápida y completa rehidratación que los que los alimentos secados con aire. Sin embargo, una de las grandes desventajas del liofilizado es el alto costo de la energía y el largo periodo de tiempo de secado. Extractos de café y té, vegetales, frutos, carne, pescado han sido obtenidos por medio de liofilización. Estos productos tienen de 10 a 15% de su peso

original y no requieren refrigeración. También pueden ser obtenidos productos con una humedad inferior al 2% (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

La liofilización se lleva a cabo en dos etapas; congelamiento y secado. El congelamiento debe ser muy rápido, con el objetivo de obtener un producto con pequeños cristales de hielo y en un estado amorfo. El secado se lleva a cabo a baja presión con el fin de sublimar el hielo.

Se deben considerar tres importantes variables en la liofilización: (1) el vacío dentro de la cámara de secado, (2) el flujo de energía radiante aplicada al alimento, y (3) la temperatura del condensador (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

### **2.5.3. Deshidratación osmótica**

La concentración de alimentos en una inmersión de solución hipertónica se conoce como deshidratación osmótica. La osmosis consiste en el movimiento molecular de ciertos componentes de una solución a través de una membrana semipermeable hacia otra solución menos concentrada (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

La pérdida de agua en los alimentos durante la deshidratación osmótica puede ser dividida en dos periodos: (1) un periodo perdurable de 2h con una alta velocidad de remoción de agua, y (2) un periodo de 2 a 6 horas, con una disminución de la velocidad de remoción de agua. La temperatura y concentración de la solución osmótica afecta la velocidad de la pérdida de agua del producto. Comparada con el secado con aire o la liofilización, la deshidratación osmótica es rápida ya que la eliminación de agua ocurre sin cambio de fase. La diferencia en el potencial químico a través de la membrana semipermeable entre el producto y la solución osmótica es la fuerza motriz de transferencia de masa (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

La velocidad de difusión de agua puede ser estimada por medio de la ley modificada de Fick y depende de la geometría del producto. La temperatura tiene un gran efecto sobre el proceso de la deshidratación osmótica, ya que un incremento de la temperatura intensifica la remoción del agua y la penetración de la solución osmótica dentro del tejido. El agua y el contenido de soluto en el alimento está en función del tiempo.

La selección del soluto de la solución osmótica es también muy importante; tres factores deberían tomarse en cuenta: (1) las características sensoriales del producto, (2) el costo del soluto, y (3) el peso molecular del soluto. En general, las soluciones más utilizadas en

el proceso de deshidratación osmótica son el cloruro de sodio, sacarosa, lactosa, fructosa y glicerol (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

#### **2.5.4. Secado por microondas**

Las microondas son ondas de alta frecuencia. Las ventajas del calentamiento con microondas por sobre el calentamiento por convección y conducción son:

- Solo el producto a calentar es el que absorbe energía
- No hay pérdidas debido al calentamiento del área circundante (aire y paredes)
- La profundidad de penetración de la fuente de calentamiento es más uniforme y efectiva.

Las microondas son utilizadas en la industria de los alimentos para secar papas fritas, hortalizas escaldadas, descongelar pescado, pollo precocinado y tocino, y eliminar mohos en fruta seca y productos lácteos (Ibartz & Barbosa Cánovas, 2003).

#### **2.5.5. Secado solar**

##### **2.5.5.1. Condiciones**

Para alimentos, particularmente frutas y vegetales se requiere de aire caliente en el rango de temperaturas de entre 45-60°C para obtener un secado seguro, a fin de mantener intactas sus propiedades comestibles y nutricionales (Kant et al., 2016). Si se requiere un contenido de humedad definido y una calidad superior del producto puede lograrse controlando las condiciones de temperatura y humedad.

Sin embargo, cuando se utilizan los rayos solares como fuente de energía se tienen dos debilidades. Una, que resulte ser un proceso intermitente y otra que depende de las condiciones ambientales del lugar en donde se lleve a cabo el proceso (Dina et al., 2015). Una alta humedad en el ambiente promueve largos periodos de secado.

##### **2.5.5.2. Características**

El desarrollo del secado solar, es un método muy popular, efectivo y económico en muchos países. Pero los parámetros externos que en este proceso se aplican, tales como el contenido de humedad, el calor introducido, la temperatura, la velocidad de flujo del aire, entre otros, no se pueden controlar y resulta un proceso de secado largo o

indeseable. En otras palabras, el secado al sol puede incluir la degradación de la calidad del producto ya sea por polvo, lluvia, aire del ambiente, insectos o animales.

La primera idea sobre secado solar fue desarrollada para evitar los problemas que conlleva el secado a sol abierto por Everitt y Stanley en 1976. Esta constaba de una caja en forma de una casa con una cubierta transparente receptora de rayos solares. Esta invención tuvo el propósito de corregir las deficiencias que el antiguo sistema de secado al sol presentaba (patente de Estados Unidos) (Kumar, 2016).

El secado es un proceso básico para reducir la humedad de un producto y es también una antigua técnica para conservar alimentos o productos agrícolas. En este proceso, la humedad es removida mediante aire caliente. El porcentaje del contenido de humedad es diferente y varía de producto a producto (Kumar, 2016).

El secado es un proceso de energía intensa, especialmente cuando es utilizado en productos alimenticios, ya que el contenido de agua en ellos es muy alto (aproximadamente 25-80%). Es esencial reducir el contenido de humedad a un cierto nivel, para desacelerar la acción de enzimas, bacterias, hongos y levaduras, esto permite la conservación de alimentos por largos periodos de tiempo.

Muchos diseños de secadores solares para productos agrícolas pueden consultarse en la literatura. Un buen diseño de secador solar resulta utilizando aire caliente de entre 10 y 25°C por encima de la temperatura ambiente (Jain & Tewari, 2015).

### **2.5.5.3 Proceso**

El secado solar es una muy importante aplicación de la energía solar. Los secadores solares utilizan un colector como fuente de energía.

Tradicionalmente, los agricultores aplicaban el secado al sol abierto (open-to-the-sun-dryer) o una técnica de secado natural, que logra secar utilizando la radiación solar, la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire del ambiente y el viento natural. La técnica consiste en esparcir el producto en capas delgadas para ser secado sobre largas superficies o pisos de concreto, donde se deja tendido hasta que se haya retirado el contenido de humedad deseado. De un momento a otro el material tiene que ser revuelto para acelerar el proceso de secado y permitir que la humedad atrapada escape. Generalmente, las superficies de secado son lineales o planas y son pisos hechos de concreto con cubiertas de polietileno, sin embargo, el material es colocado en charolas perforadas. Obviamente, la velocidad del proceso de secado es lenta y se extiende por

largos periodos de tiempo, de 10 a 30 días, dependiendo del producto y las condiciones ambientales del lugar.

La radiación solar cae por encima del material y simultáneamente la humedad del mismo se transfiere hacia el aire del ambiente. La transferencia de calor y humedad toman lugar por medio de convección natural y difusión respectivamente, ambos dependen de las condiciones climatológicas, debidamente de la radiación solar y de la velocidad del aire (Kalogirou, 2014).

#### **2.5.5.4 Ventajas y desventajas**

La energía solar es el recurso más abundante de energía disponible durante el día, convirtiéndose en la manera más eficiente y factible de hacerle frente al incremento de la demanda energética. Para facilitar el secado de alimentos, la energía solar es la más adecuada pero es intermitente por naturaleza, debido a que no está disponible por las noches. Por lo tanto, el almacenamiento de la energía térmica facilita su uso en horas sin sol (Tabla 9).

#### **2.5.5.5. Clasificación de secadores solares**

Los secadores solares, en general, son clasificados en cuatro categorías: directo, indirecto, secador solar mixto y secador solar híbrido.

##### **2.5.5.5.1. Secador a Sol abierto**

Es el método de secado más común utilizado en países tropicales y subtropicales, involucra extender el alimento en capas delgadas sobre bandejas y exponer el producto al viento y directamente a los rayos del sol (Figura 5). Este proceso no es adecuado para procesar grandes cantidades de producto. Aparte de tener desventajas como alto costo de mano de obra, se requieren grandes áreas y disminuye la calidad del producto, esto también envuelve una labor intensa antes de que los productos estén listos para el almacenamiento (Tabla 9). El secado a sol abierto depende de las condiciones ambientales, tales como la radiación solar, viento y otras condiciones. Esto conduce al deterioro del producto a causa de muchos inconvenientes, como la reducción de la calidad debido al viento, lluvia, desperdicios y animales. Almacenar el alimento durante la noche y someterlo a la lluvia bajo un techo puede conducir a la rehidratación.

**Tabla 9. Ventajas y desventajas del secado solar.**

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<p>Desarrollo del sector doméstico e industrial, para un número de productos alimenticios y agrícolas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Haciendo el proceso de preservación más fácil</li> <li>▪ Desarrollando un cierto producto más accesible</li> <li>▪ Incrementando la capacidad de almacenamiento y disminuyendo el costo del transporte del producto</li> <li>▪ Técnicamente sencillo</li> <li>▪ Bajo costo de mantenimiento e implantación</li> <li>▪ No se requiere de mano de obra especializada</li> <li>▪ Se puede aprovechar el excedente de frutos en el huerto, aumentando el valor económico</li> <li>▪ Al eliminar agua del producto, se concentran las proteínas y minerales</li> <li>▪ Los materiales procesados se pueden almacenar por periodos largos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Dependiendo del tipo de secador y debido a la humedad del ambiente, puede resultar un proceso largo</li> <li>○ Un mal secado del material en cuestión promueve el enmohecimiento y descomposición del mismo</li> <li>○ En caso de ser un secado al aire libre, es necesario proteger el alimento por lluvias, polvo o animales.</li> <li>○ La exposición directa de los rayos del sol sobre el alimento puede ser perjudicial en cuanto a la calidad debido a los rayos ultravioletas: cambio de color, destrucción de vitaminas y por lo tanto, disminución del valor nutritivo</li> <li>○ Para aumentar el rendimiento del procesamiento, en ocasiones se necesita de una amplia área de exposición aplicando el material en capas delgadas para satisfacer el secado</li> <li>○ Si no es automatizado, se requiere de que un personal renueve la carga o la manipule para seguir con el proceso</li> </ul>
<p>La energía solar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Se difunde fácilmente en la naturaleza y provee de un bajo nivel de calor.</li> <li>▪ La energía solar está disponible en cualquier sitio</li> </ul>	
<p>Aplicando convección forzada.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El proceso se realiza bajo mejores condiciones sanitarias</li> <li>• Los parámetros de secado se pueden ajustar con precisión, controlados y modificados a lo largo del tiempo de procesamiento, logrando un producto uniforme con menor degradación de calidad</li> <li>• Tiempos de secado más cortos</li> </ul>	

Fuente; (Andrea Catraro, 2014); (Kant *et al.*, 2016)

Como el proceso de secado es relativamente lento, ocurren considerables pérdidas, incluyendo infestación de insectos, reacciones enzimáticas, crecimiento de microorganismos, y aumento de micotoxinas, lo que causa una asertiva reducción de la calidad del producto. Surgen serios problemas, particularmente en cuestión de humedad en áreas tropicales y subtropicales, donde los productos agrícolas tienden a ser secados durante temporada de lluvia. Son muchas desventajas las que conduce remplazar el secado al sol abierto con el secado mecánico, tales como el uso de combustibles fósiles para calentar el aire de secado y la electricidad para transportar el aire seco a través del alimento.

El secado al Sol abierto es un proceso lento y conlleva a pérdidas considerables. Los productos deshidratados con este sistema usualmente no llegan a la calidad estándar internacional (Mustayen *et al.*, 2014).



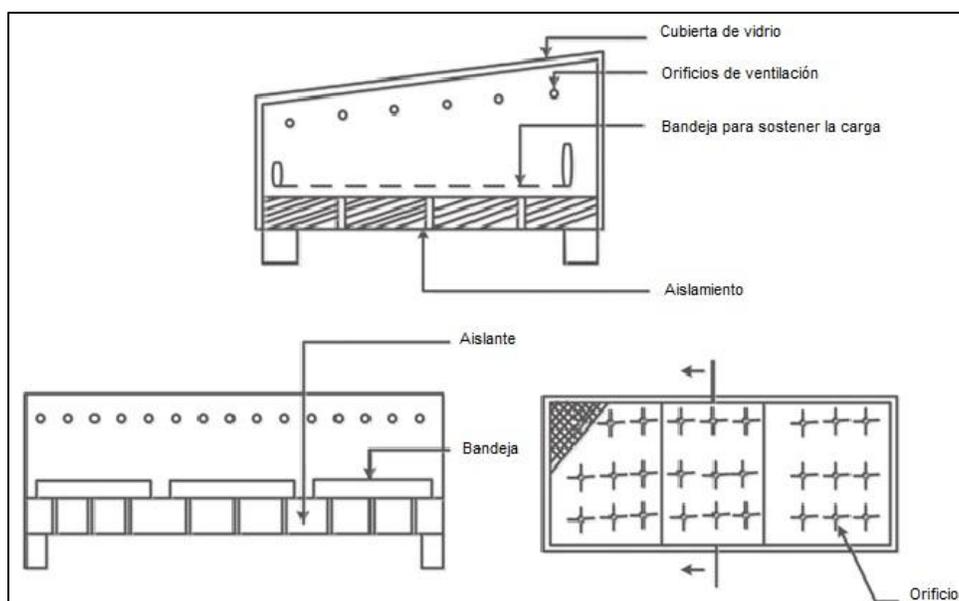
**Figura 5. Secado a sol abierto. Fuente: Osman, 2017.**

#### **2.5.5.5.2 Secador solar directo**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el secado solar es una buena alternativa al uso del secado a sol abierto. En lugares como granjas, ranchos, fincas, etc., el secado de pequeñas cantidades de frutas y vegetales se lleva a cabo en carpas y secadores de cajas, utilizando materiales locales disponibles, fabricados por los mismos trabajadores o dueños.

En este tipo de secadores solares, se utiliza una cubierta transparente para reducir las pérdidas de calor, y simultáneamente el producto se encuentra protegido ante la lluvia y el polvo. La aireación requerida para remover el agua evaporada es proporcionada por las fuerzas ascendentes del aire. Sin embargo, en este proceso, es imposible evitar infestaciones (Figura 6).

El mejor ejemplo de secador solar directo es el de tipo caja o gabinete. Este tipo de secador es comúnmente utilizado en áreas que reciben luz solar directa por largos periodos de tiempo durante el día. El secador de gabinete es construido con madera de 1cm de espesor y sus paredes (inferior, laterales y posterior) son aisladas con fibra de vidrio. La pared frontal e inclinada es cubierta con un vidrio que permite el paso de los rayos solares a través del interior. Esta pared transparente puede ser cubierta con una capa opaca y aislada para una aplicación en modo indirecto. La pared posterior del secador contiene agujeros mediante los cuales el aire húmedo sale por medio de un ventilador. La parte más baja de la pared frontal está hecho de tal modo que ésta pueda re direccionar el aire caliente del colector solar en la cámara usando un ventilador. Sin embargo, este tipo de secador solar tiene algunas limitaciones. Por ejemplo, el producto puede decolorarse debido a la exposición directa con la radiación. La compresión de la humedad dentro de la cubierta de vidrio también disminuye su transividad (Mustayen *et al.*, 2014).



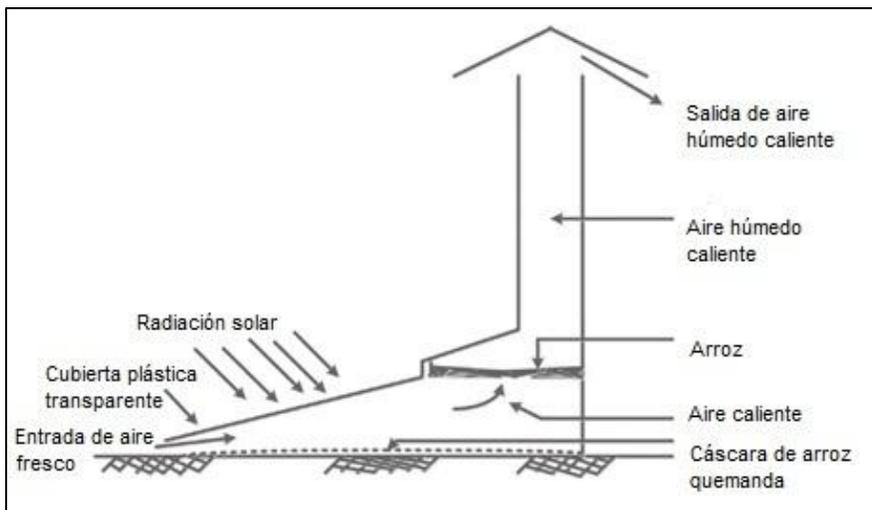
**Figura 6. Secador solar directo. Fuente: Mustayen *et al.*, 2014**

### **2.5.5.5.3 Secador solar indirecto**

En un secador solar indirecto, el calor del sol es recolectado por el colector solar y posteriormente es transportado a la cámara de secado, donde ocurre el secado del material. El aire que entra a la cámara es calentado y se hace pasar atravesando el alimento húmedo. Aquí el calentador solar (colector solar) es usado para calentar el aire

que entra a la cámara de secado (Figura 7). El aire caliente pasa entonces a ser aire húmedo y sale finalmente del proceso. Este tipo de secador es mejor que otros equipos de secado en términos de solución de varias ecuaciones basadas en el balance de energía. También actúa mejor que otros secadores convencionales de tipo gabinete (Mustayen *et al.*, 2014).

Sharma & Sharma (2012), examinaron el desempeño de un secador solar indirecto y encontraron que bajo condiciones hostiles del ambiente, el secador es aún capaz de dar buenos resultados en la calidad del producto final. Además, es ideal para pequeños establecimientos agrícolas porque es un equipo de bajo costo. También, el estudio mostró que pueden obtenerse productos secos de alta calidad por el incremento de la velocidad y la eficiencia del secado. En este tipo de proceso de secado, la temperatura de la cámara de secado y el espesor de las muestras son factores a considerar.



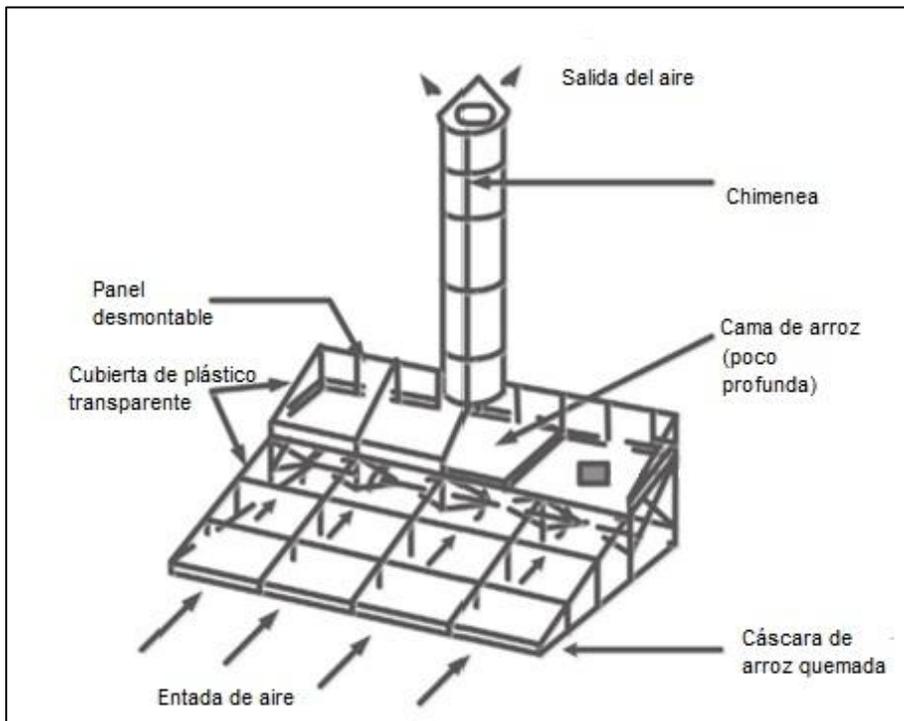
**Figura 7. Secador solar indirecto. Fuente: (Mustayen *et al.*, 2014).**

#### **2.5.5.5.4 Secador solar mixto**

También es llamado secador pasivo. Este secador adquiere energía de los rayos del sol que entran mediante el colector. La superficie interior del colector es pintada de color negro, y los rayos del sol son aprovechados atrapando el calor del aire que es recolectado dentro de la cámara. Existen estudios que han examinado el diseño y desempeño de este tipo de secador verificando el proceso acelerado de secado y su capacidad para secar productos agrícolas por llegar rápidamente nivel de humedad condicional (Figura 8).

Este tipo de secador consiste de un colector solar separado y una unidad de secado. Una cubierta transparente es fijada encima del secador, del colector solar y de la unidad de

secado. El colector recibe la radiación solar. Este equipo es sencillo y barato para agricultores. Así mismo, es frecuentemente usado para secar alimentos en temporadas húmedas (Mustayen *et al.*, 2014).



**Figura 8. Secador solar mixto. Fuente: (Mustayen *et al.*, 2014).**

#### **2.5.5.5.5 Secador solar de convección natural (secador solar de modo pasivo)**

El secador solar de convección natural necesita un gasto mínimo para controlar la temperatura de secado. Sin embargo, la velocidad de secado es limitada. Este tipo de secador solar obviamente juega un rol vital en el sector de secado porque es de bajo costo. También se ha hecho popular porque es un equipo de simple mantenimiento y operación. Entre un secador solar de convección natural y uno de convección forzada, el primero es más adecuado y es uno de los secadores más antiguos y disponibles. Consiste de un colector, una capa transparente y una unidad de secado; ésta se encuentra cubierta por encima. Estas partes se encuentran conectadas en serie, que comprende un sistema que puede obtener velocidades de secado muy satisfactorias (Mustayen *et al.*, 2014).

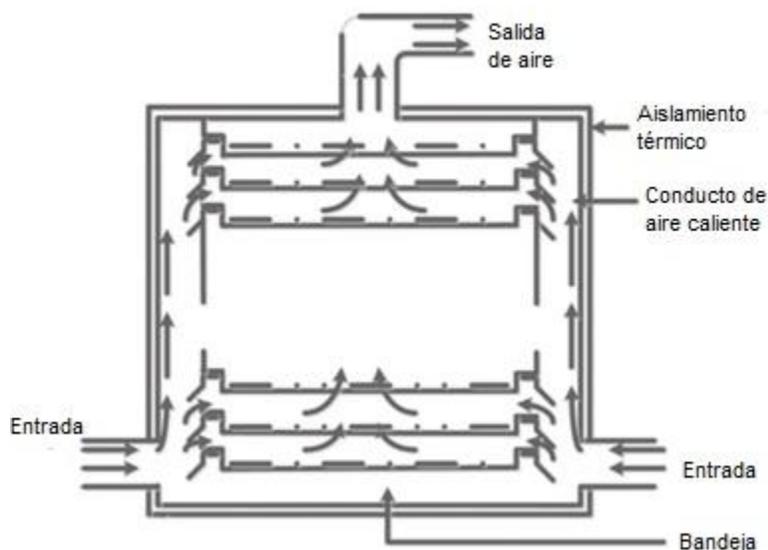
Existen secadores solares de convección natural de tipo directo e indirecto. Un secador solar de convección natural de tipo directo es diseñado y construido utilizando madera, hojas de vidrio y metales locales disponibles. Este secador ha sido probado

experimentalmente para el secado de productos agrícolas. Para predecir la eficiencia del secado, es importante determinar algunos parámetros como la temperatura ambiente, el flujo másico del aire del sistema y el flujo de calor. El sistema de secado por convección natural tiene una capacidad limitada. Además, la velocidad de secado es retardada y altamente dependiente de las condiciones atmosféricas (Mustayen *et al.*, 2014).

**2.5.5.5.6 Secador solar de convección forzada (secador solar de modo activo)**

Es necesaria la energía eléctrica para operar los ventiladores que incluye este equipo de secado. Sin embargo, muchas áreas rurales no cuentan con electricidad o al incluirla se elevan los costos del uso de este secador (Figura 9).

Son diseñados incorporando medios externos como ventiladores o turbinas para mover la energía solar en forma de aire caliente desde el área del colector hasta las camas de secado. Estos secadores encuentran importantes aplicaciones en las operaciones de secado comercial a gran escala en combinación con combustibles fósiles convencionales para tener un mejor control sobre el secado mediante el manejo del efecto de las fluctuaciones de la radiación en la temperatura del aire de secado (Andrea Catraro, 2014).



**Figura 9. Esquema de un secador de convección forzada. Fuente: (Mustayen *et al.*, 2014).**

### **3.0. Objetivos**

#### **Objetivo general**

Diseñar y construir un secador solar indirecto que permita mejorar el proceso de secado de diversos productos de origen vegetal, como una alternativa tecnológica para la producción agrícola.

#### **Objetivo particular 1**

Realizar el diseño de un secador solar indirecto ayudados de un software de diseño en 3D que permita realizar el deshidratado de productos de origen vegetal.

#### **Objetivo particular 2**

Construir un secador solar indirecto con el fin de obtener un equipo para su aplicación experimental en un proceso de deshidratado de productos hortofrutícolas.

#### **Objetivo particular 3**

Evaluar los resultados generados por el secado solar indirecto en su aplicación destinada al deshidratado de alimentos hortofrutícolas para conocer los posibles alcances del equipo.

#### 4.0. Metodología experimental

La secuencia metodológica para llevar a cabo el presente trabajo se muestra en la siguiente figura:

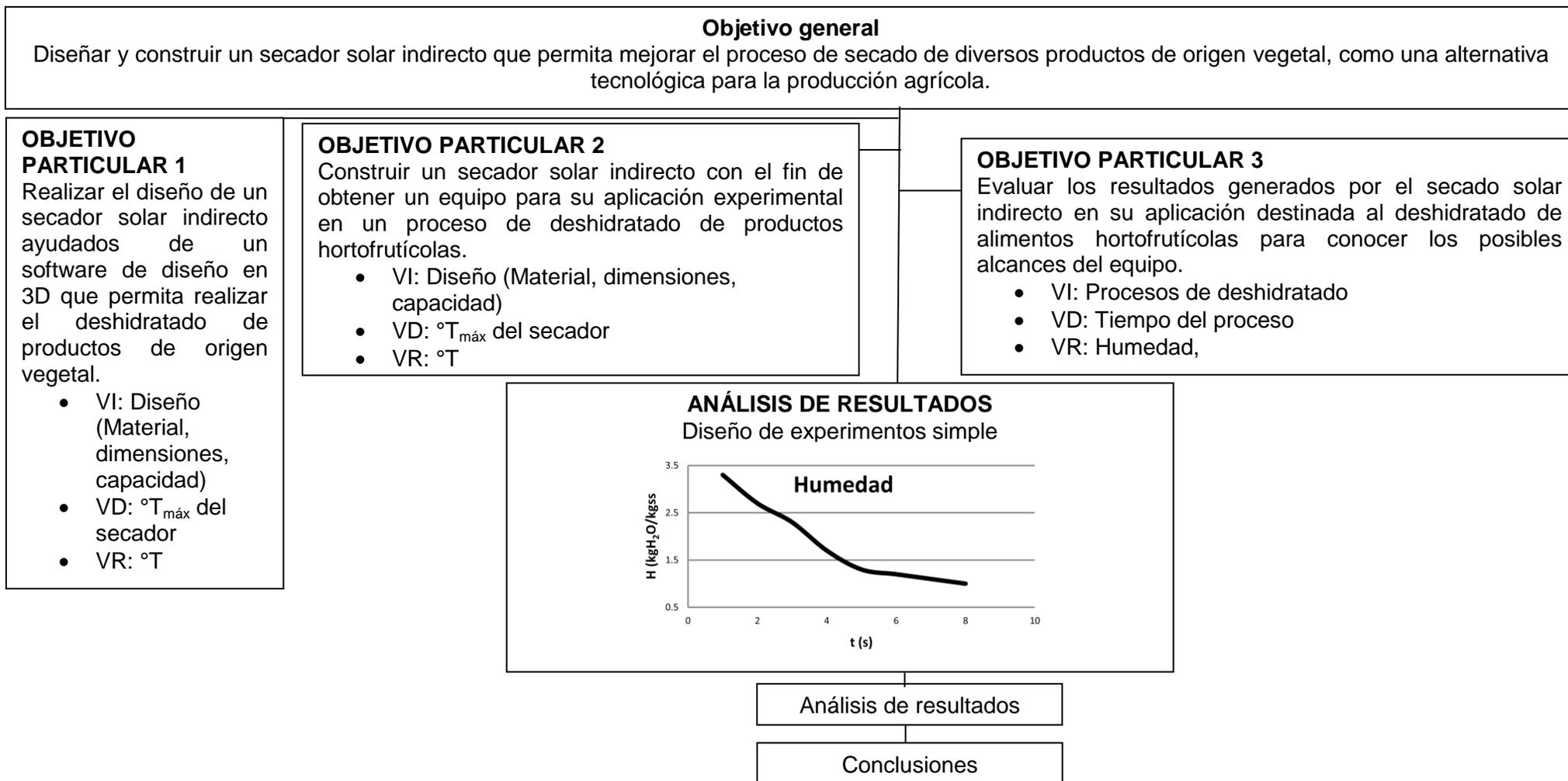
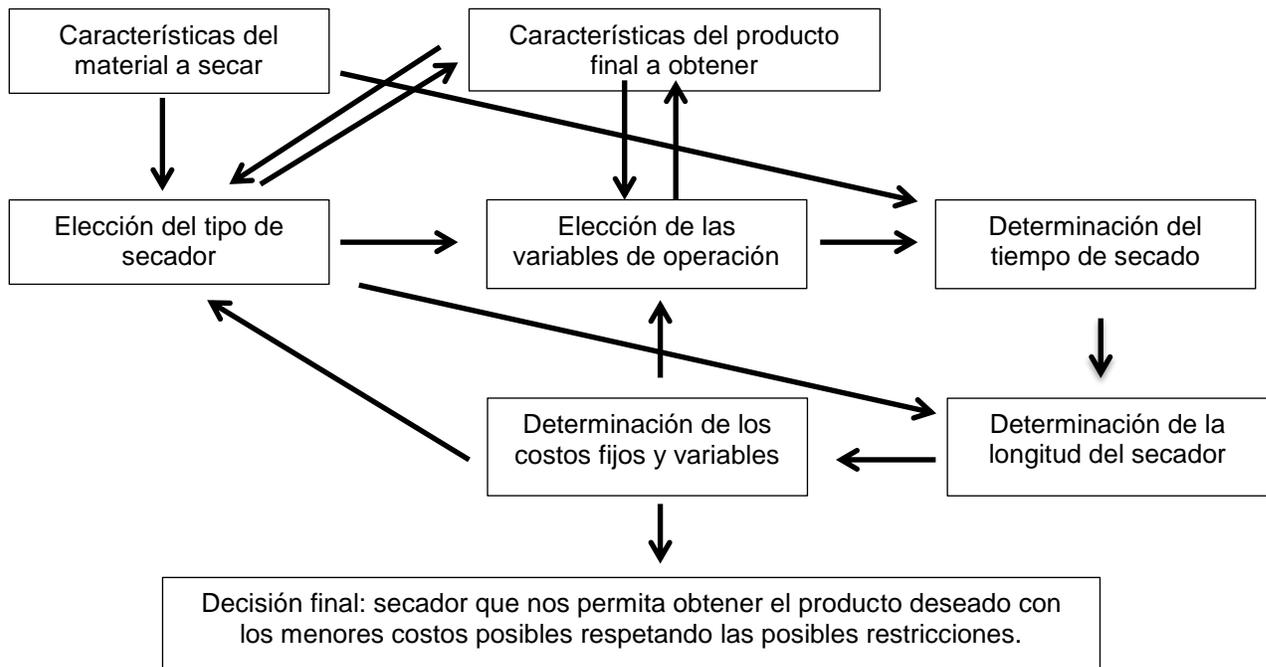


Figura 10. Cuadro metodológico.

#### 4.1. Diseño del equipo.

Pese a que puede parecer un proceso secuencial en una única dirección, en realidad se trata de un proceso en el que cada etapa va dando información para pasar a la siguiente pero también obliga a modificar planteamientos de la anterior, y en su conjunto lleva a hacer un ejercicio de iteración y de planteamiento de los distintos escenarios posibles, entre los que se encuentran aspectos relacionados con la demanda del producto que se fabrica y lo que el consumidor está dispuesto a pagar por él. Por eso es muy importante hacer especial énfasis en esta cuestión, para la que el empleo de programas de diseño son herramientas muy útiles (Maupoey *et al.*, 2001). En la Figura 11 se muestran los aspectos que se tomaron en cuenta para el diseño del secador.



**Figura 11. Esquema de la dirección de la toma de decisiones en el diseño de un secador**

Un dibujo en 3D del diseño del secador solar se realizó utilizando el software Solid Edge ST7. Solid Edge es un portfolio de herramientas de software accesible y fácil de usar que abordan todos los aspectos del proceso de desarrollo de productos - diseño en 3D, simulación, fabricación, gestión del diseño y mucho más gracias a un creciente ecosistema de aplicaciones (Siemens, 1996).

#### **4.1.1. Características del material a secar**

El secador se diseñó tomando en cuenta que el material a secar serán principalmente frutos, hortalizas o flores, las cuales por lo general contienen más de un 90% de agua y que, por lo general, se colocan en forma de rebanadas y de manera extendida en cada bandeja que comprende el equipo, tomando en cuenta que la cantidad del material dependerá de la naturaleza que este tenga.

#### **4.1.2. Elección del tipo de secador**

Existen variados estudios relacionados con el secado de frutas y hortalizas, utilizando uno o varios sistemas de secado. La radiación solar, en forma de energía térmica, es una fuente alternativa de energía para el secado, especialmente para frutos secos, vegetales, granos y otros tipos de materiales como la madera (Kalogirou, 2014), por lo que en el presente trabajo se diseñó un secador solar indirecto.

El uso de la energía solar como fuente de calor no es la excepción y es uno de los sistemas empleados en la deshidratación de una gama variada de alimentos. A pesar de que depende de las condiciones ambientales del lugar de operación, no deja de ser efectivo.

Las condiciones ambientales en las cuales se llegó a operar en el proceso de secado, proporcionan las características para el empleo de este sistema en este proyecto. El buen diseño de un secador solar puede resultar en un aire caliente de secado en orden de 10-25°C por encima de la temperatura ambiente (Dina *et al.*, 2015). Es decir, las condiciones climatológicas, así como el espacio en donde se llevará a cabo la experimentación se encuentran a favor al utilizar el sistema de secado solar.

Emplear un sistema de secado solar indirecto, principalmente permitió no dañar el alimento como sería en el caso de un sistema de secado solar directo, al igual que un producto final más inocuo. Así, se utilizó un equipo de secado utilizando como fuente de calor la radiación solar y un flujo por convección natural del aire en el sistema, con el fin de obtener un equipo con menor coste energético (Kant *et al.*, 2016).

### 4.1.3. Determinación de la longitud del secador

Para el cálculo de las dimensiones del secador se tomó en cuenta la velocidad del aire a la salida de la cámara de secado, es decir, la velocidad a la que se quiere llegar: 1m/s (Hedge *et al.*, 2015). Para ello, se realizaron los siguientes cálculos basándose en el principio de continuidad:

$$Q_1 = Q_2 \dots\dots\dots \text{ecuación 16}$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \dots\dots\dots \text{ecuación 17}$$

Dónde:

$Q_1$  = Flujo de entrada de aire (m<sup>3</sup>/s)

$Q_2$  = Flujo de salida de aire (m<sup>3</sup>/s)

$V_1$  = Velocidad de flujo a la entrada (m/s)

$V_2$  = Velocidad de flujo a la salida (m/s)

$A_1$  = Área a la entrada (m<sup>2</sup>)

$A_2$  = Área a la salida (m<sup>2</sup>)

El  $A_2$  del conducto circular que será el área de salida en la cámara de secado, es igual a:

$$A_2 = \frac{\pi D^2}{4} \dots\dots\dots \text{ecuación 18}$$

$$A_2 = \frac{\pi(0.1 \text{ m})^2}{4} \dots\dots\dots \text{ecuación 19}$$

$$A_2 = 0.007853 \text{ m}^2 \dots\dots\dots \text{ecuación 20}$$

Esto debido a que el material que se tomó en cuenta dispone de estas dimensiones. La  $V_2$  es igual a 1m/s. Por lo que sustituyendo en la ecuación 17:

$$V_1 A_1 = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.007853 \text{ m}^2 \dots\dots\dots \text{ecuación 21}$$

Por lo tanto, la ecuación 16 queda:

$$Q_2 = 0.007853 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Al suponer que la entrada de aire (colector) tendrá 6 orificios de 1 in de diámetro cada una (nuevamente disponiendo del material en mercado), utilizando la misma ecuación que para  $A_2$ , se obtiene un  $A_1$  de:

$$A = \frac{\pi(0.0254 \text{ m})^2}{4} * 6 \dots\dots\dots \text{ecuación 22}$$

$$A = 0.00304 \text{ m}^2$$

Por lo tanto, despejando de la ecuación de continuidad, se puede calcular la velocidad de flujo a la entrada:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_1} \dots\dots\dots \text{ecuación 23}$$

$$V_1 = \frac{0.007853 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.00304 \text{ m}^2} \dots\dots\dots \text{ecuación 24}$$

$$V_1 = 2.5832 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

No rebasar los 3m/s en la velocidad del aire a la entrada es uno de los parámetros importantes para obtener un producto seco en condiciones aceptables en términos de color, sabor y forma (Hedge *et al.*, 2015). Por lo tanto, a la entrada, en el colector, se aplicaron 6 orificios de 1 pulgada de diámetro, y a su vez, uno de 10cm en la salida del flujo de aire de la cámara de secado.

#### 4.2. Variables de operación

Para la caracterización del equipo de secado (sin material dentro del equipo para proceso de secado) se realizaron tres pruebas que se llevaron a cabo los días 18, 19 y 20 de Octubre del 2017, en el horario de 11:00 a 16:00 horas. La medición de temperaturas, humedades y velocidad del aire, se registraron cada 15 minutos (Tabla 10).

**Tabla 10. Registro de temperaturas, humedad y velocidad del aire en la experimentación en condiciones de carga cero y con carga**

No.	Hora	Cámara				Colector						Chimenea			
		T entrada (°C)	T salida (°C)	T in1 (°C)	T in2 (°C)	OUT				V (m/s)					
						T (°C)	%H	Máximas		Mínimas		N	Min	Máx	
								T (°C)	% H	T (°C)	% H				
1															
2															
3															

Las temperaturas de entrada y salida de aire en la cámara de secado ( $T_{entrada}$  y  $T_{salida}$ , respectivamente) se registraron. También las temperaturas internas en el seno de las bandejas centrales ( $T_{in1}$  y  $T_{in2}$ ); la temperatura y humedad relativa del ambiente ( $T$  y %H), así como sus máximas y mínimas; y la velocidad del aire a la salida de la cámara de secado ( $V$ ), mínima, máxima y la lectura en el momento ( $N$ ); ver Figura 12.

Una vez registrando los datos anteriores de temperatura y velocidad del aire, se llevaron a cabo los cálculos para conocer la eficiencia del colector. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$\eta_c = \frac{\dot{m}C_{pa}(T_o - T_i)}{A_c I} \quad \dots\dots\dots \text{ecuación 25}$$

Dónde:

$\dot{m}$  = Flujo másico del aire (kg/s)

$C_{pa}$  = Calor específico del aire (kJ/kg°K)

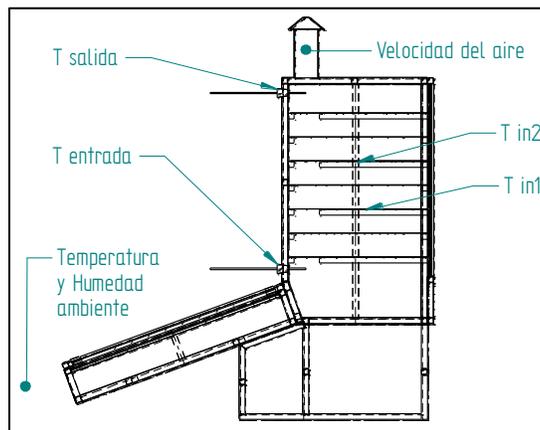
$T_o$  = Temperatura de salida del aire

$T_i$  = Temperatura de entrada

$A_c$  = Área del colector ( $m^2$ )

$I$  = Irradiancia ( $W/m^2$ )

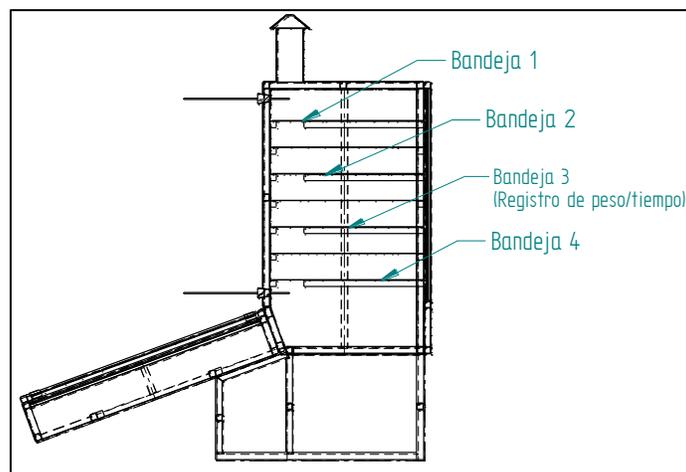
Los datos de irradiancia fueron obtenidos a través del portal PEMBU (UNAM, 2017), mediciones realizadas en las instalaciones del Colegio de Ciencias y Humanidades de la UNAM, campus Naucalpan.



**Figura 12. Secciones del equipo de secado en donde se registraron las diferentes variables en el proceso de aplicación a carga cero y con carga**

### 4.3. Determinación del tiempo de secado

Para este proceso se utilizaron pétalos de flor de cempasúchil para ser deshidratados usando el secador solar indirecto. Se colocaron 4 bandejas en los respectivos lugares dentro del equipo (Figura 13 y 14), las cuales contenían 25g de pétalos cada una. Se realizaron tres pruebas que se llevaron a cabo los días 26 de Octubre, 3 y 7 de Noviembre del 2017, en el horario de 12:00 a 16:00 horas. La bandeja número 3 fue aquella a la que se sometió a mediciones de pérdida de peso cada 15min, datos con los que se trabajó para poder realizar las respectivas curvas de secado (Tabla 11)



**Figura 13. Esquema de la colocación de las bandejas con pétalos de flor de cempasúchil en el interior del equipo**



**Figura 14. Bandeja con pétalos de flor de cempasúchil**

Para realizar las curvas de secado, se calcularon los datos de la siguiente tabla, utilizando las ecuaciones que se presentan posteriormente.

**Tabla 11. Registro de datos para el cálculo y realización de las curvas de secado.**

N°	t (min)	w bandeja (gr)	W bandeja+p étalos (gr)	t (h)	W (kg)	X (kg H <sub>2</sub> O/kg s.s)	ΔX (kg H <sub>2</sub> O /kg s.s)	Δθ (h)	R (kg H <sub>2</sub> O/hm <sup>2</sup> )	XI (kg H <sub>2</sub> O/kg s.s)	1/R	Xeq	Wss (kg)	A (m <sup>2</sup> )
1														
2														
3														

$$X = \frac{W - W_s}{W_s} \dots\dots\dots \text{ecuación 26}$$

$$\Delta X = X_2 - X_1 \dots\dots\dots \text{ecuación 27}$$

$$\Delta \theta = t_2 - t_1 \dots\dots\dots \text{ecuación 28}$$

$$R_c = -\frac{W_s}{A} * \frac{\Delta X}{\Delta t} \dots\dots\dots \text{ecuación 29}$$

$$Xl = X - X^* \dots\dots\dots \text{ecuación 30}$$

Dónde:

t = tiempo (h)

W = peso (kg)

X = humedad (kg H<sub>2</sub>O /kg s.s.)

R<sub>c</sub> = velocidad de secado para el periodo de velocidad constante

XI = humedad libre (kg H<sub>2</sub>O /kg s.s.)

X\* = humedad de equilibrio (kg H<sub>2</sub>O /kg s.s.)

W<sub>s</sub> = peso del sólido seco (kg)

A = área de la bandeja (m<sup>2</sup>)

Para conocer el valor de la X\*, se realizó una gráfica de X vs t. Cuando se observó que el valor de la humedad fue constante, que fue el menor valor de humedad o humedad final, este se tomó como el valor de la X\*, ya que es el punto en donde la humedad se mantiene en dicho estado. Para el W<sub>s</sub>, los pétalos de flor de cempasúchil se sometieron a pruebas de termobalanza. El valor arrojado por el equipo se tomó en cuenta para conocer el peso del sólido seco.

Posteriormente se elaboraron las curvas de velocidad de secado graficando la XI vs t y con ello definir la humedad crítica (X<sub>c</sub>), la humedad inicial (X<sub>i</sub>) y la humedad final (X<sub>f</sub>). Para calcular el tiempo de velocidad de secado en el periodo constante (t<sub>vc</sub>), se utilizó la siguiente ecuación:

$$t_{VC} = \frac{-W_s}{A * R} (X_c - X_i) \dots \dots \dots \text{ecuación 31}$$

Donde  $R$  es el valor de la velocidad de secado a la que se encuentra la humedad crítica. Ya que en el periodo de velocidad decreciente la velocidad no es la misma, es decir, no es constante, para calcular el tiempo de velocidad decreciente se determinó del área bajo la curva haciendo uso de la Regla de Simpson:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{6} \left[ f(a) + 4f\left(\frac{a+b}{2}\right) + f(b) \right] \dots \dots \dots \text{ecuación 32}$$

Dónde:

$a$  = último valor de la  $XI$  de la curva de velocidad decreciente; o humedad final  $Xf$

$b$  = humedad crítica

$f(a)$  = valor de  $1/R$  al que se encuentra la  $Xf$

$f(b)$  = valor de  $1/R$  al que se encuentra la  $Xc$

Al ubicar las dos funciones,  $f(a)$  y  $f(b)$ , se realiza una interpolación potencial ( $y = ax^b$ ), teniendo como incógnita o valor a calcular, el valor de  $1/R$  de  $a+b/2$ , o, dicho de otra manera  $f(a+b/2)$ , como se observa en la siguiente tabla:

**Tabla 12. Valores para el cálculo de la interpolación potencial**

<b>x</b>	<b>y</b>
$a = Xf$	$f(a) = 1/R$ del valor de $a$
$b = Xc$	$f(b) = 1/R$ del valor de $b$
$a+b/2 = (Xf+Xc)/2$	$f(a+b/2) = ?$

Por último, se sustituyen los valores obtenidos en la ecuación 32, obteniendo el tiempo de velocidad decreciente ( $t_{VD}$ ) en horas. Y para conocer el tiempo total de secado se suman el tiempo de velocidad constante y el tiempo de velocidad decreciente, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$t_{TOTAL} = t_{VC} + t_{VD} \dots \dots \dots \text{ecuación 33}$$

#### 4.4. Instrumentos utilizados para medición de variables.

##### Termómetro para interior/exterior con sensor de humedad



<b>Marca</b>	Taylor
<b>Modelo</b>	1523
<b>Rango/Capacidad</b>	
T interna	De -10 a 50 °C
T externa	De -50 a 70 °C
Humedad relativa	De 20 a 99% interior
<b>Tipo de medición</b>	Ambiental
<b>Unidad de medición</b>	°C/°F %HR
<b>Lectura</b>	Digital
<b>Dimensión/Tamaño</b>	
Cuerpo	4 x 3"
Display	1.5 x 1.5"
<b>Serie</b>	15
<b>Características</b>	
Memoria	min/máx
Batería	AAA
Sustituye	1452

##### Termómetro inalámbrico

<b>Marca</b>	RadioShack
<b>Modelo</b>	63-1140
<b>Monitor</b>	
Pilas	2 X AA
Gama de temperatura de funcionamiento	De 32°F a 122°F (0°C a 50°C)
Gama de temperatura de almacenamiento	De -22°F a 158°F (-30°C a 70°C)



Resistencia de agua	JIS nivel 2
Gama de mostración de diodo luminiscente	De 0°C/F a 100°C/F
<b>Sonda del termosensor</b>	
Pilas	2 X AAA
Gama de temperatura de funcionamiento	De -4°F a 482°F (-20°C a 60°C)
Gama de temperatura de almacenamiento	De -22°F a 158°F (-30°C a 70°C)
Resistencia de agua	JIS nivel 3
<b>Especificaciones generales</b>	
Longitud de la sonda de acero inoxidable	3.28 ft (1m)
Frecuencia de transmitir	433MHz
Resolución de temperatura	±2°F
Temperatura de funcionamiento de la sonda	482°F máxima (250°C)

### Termómetros de Vidrio

Tipo	Mercurio (Inmersión parcial)	Alcohol (inmersión total)
Marca	LAUKA	LAUKA
Modelo	358	147
Rango (°C)	-10 a 400	-20 a 110
Longitud (cm)	40	30
División (°C)	2	1



### Medidor digital de flujo y velocidad de aire (Anemómetro)



<b>Marca</b>	Steren
<b>Modelo</b>	HER-440
<b>Alimentación</b>	9V
<b>Rango de medición</b>	0.8~40 m/s
<b>Precisión</b>	0.80-30 m/s $\pm(2.0\% + 50D)$
<b>Resolución</b>	0.01 m/s, 0.01 km/h, 0.01 ft/s, 0.01 knots, 0.01 mile/h, 1ft/m
<b>Tiempo de muestreo</b>	0.4s
<b>Función de auto apagado</b>	10min (ajustable)
<b>Indicador de batería baja</b>	<7V
<b>Humedad relativa</b>	<95% (No condensada)
<b>Temperatura de operación</b>	-20°C a 80°C
<b>Altitud de operación Máx.</b>	2000m

### Báscula electrónica de laboratorio portátil

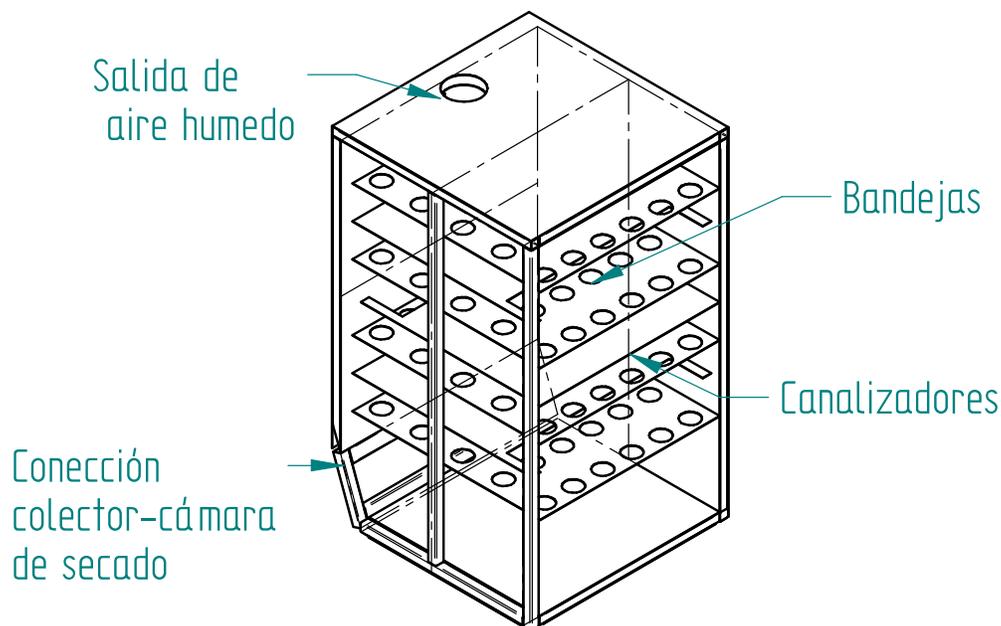
<b>Marca</b>	Ohaus
<b>Serie</b>	Scout Pro
<b>Capacidad</b>	600g
<b>Sensibilidad</b>	0.1g
<b>Unidades de pesaje</b>	gramo, onza, oz t, dwt, kg, libra
<b>Pantalla</b>	LCD
<b>Dimensiones del platillo</b>	16.5cm x 14.2cm
<b>Alimentación</b>	Adaptador estándar AC o 4 baterías AA (no incluidas)



## 5.0. Resultados y discusión

### 5.1. Pre construcción del equipo de secado

Tomando en cuenta los cálculos del apartado 4.1.3. y la semejanza y escalamiento de otros trabajos, las dimensiones de la cámara de secado son de 0.60m x 0.60m x 1m (Sharma & Sharma, 2012) (Romero *et al.*, 2014); que coincide en uno de sus lados con la salida del colector (Figura 15). Al interior de esta sección del secador, se colocaron placas que ayudaron a direccionar el flujo del aire con el fin de retener mayor tiempo el aire caliente, alcanzar una mayor temperatura y arrastrar una mayor cantidad de humedad del alimento. Se elaboraron de tal manera que cubra toda la parte interna de la cámara de secado pero con una abertura de 4in por donde fluiría el aire; abertura relacionada con la salida de aire húmedo. Las dimensiones para esta cámara de secado proporcionó el espacio suficiente para colocar cuatro bandejas donde se colocó el alimento a secar y tres canalizadores, espacio para el cual también se tomó en cuenta una altura adecuada, entre bandeja y canalizador, para el acomodo del material a secar, es decir, que este último no tuviese contacto con el canalizador o el techo de la cámara de sacado.



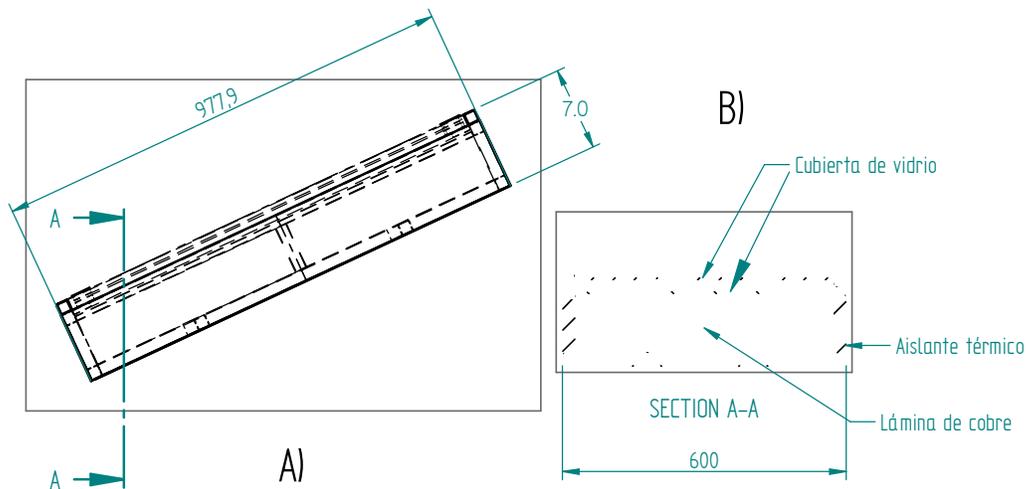
**Figura 15. Vista isométrica posterior del diseño de la cámara de secado, del secador solar indirecto experimental.**

En la parte superior central anterior de esta cámara de secado se realizó una perforación circular de 10 cm de diámetro que sirvió para la salida del aire húmedo, y con ello tener un flujo de aire adecuado al interior de la cámara de secado, como ya se había mencionado anteriormente.

Es importante señalar que en la parte posterior del equipo se encuentra la puerta de la cámara de secado (Figura 17), en donde se observa el proceso cuando se encuentre cerrada, ya que esta puerta cuenta una cubierta transparente en el centro de 0.80m x 0.15m x 0.004m, lo cual ayudó también a leer las mediciones correspondientes a la pérdida de peso del material durante el proceso de secado.

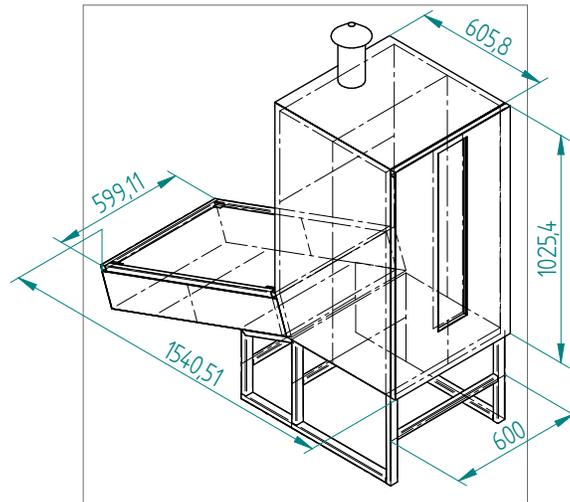
El colector solar se adaptó a las dimensiones de la cámara de secado, ya que el extremo final del colector es la entrada a la cámara de secado. Por lo tanto, las dimensiones del colector solar (Figura 16) son de 0.60m x 1m x 0.1778m (7 in). La parte superior del colector está compuesta por un par de cubiertas transparentes (vidrio templado) de 4mm de espesor separados por 2cm uno del otro (Dina *et al.*, 2015). Las dimensiones descritas anteriormente proporcionaron el espacio adecuado para colocar la cubierta de vidrio, la lámina de cobre y la capa de aislante térmico (Figura 16 B).

Tanto a la entrada como a la salida del colector se hicieron 6 perforaciones de una pulgada cada una que proporcionó el adecuado flujo de aire al interior de la cámara de secado.



**Figura 16. A) Vista lateral del colector; B) Vista frontal con corte del colector solar.**

La base principal del secador solar abarcó no sólo la cámara de secado, sino también el colector solar, que sirvió como soporte adicional de este último al momento de operar el equipo. Con esto se definen las dimensiones del diseño del secador solar y se presentan en la Tabla 13.



**Figura 17. Diseño final del secador solar indirecto experimental.**

### 5.1.2. Selección de materiales para la construcción.

Es importante conocer que materiales se pueden utilizar debido al material a secar, las dimensiones en las que se encuentran en el mercado, costos y la accesibilidad que tenemos para conseguirlos. Como se puede observar, en la Tabla 13 se muestran los diferentes materiales que integran el equipo de secado diseñado.

El material seleccionado para la estructura de cada componente del secador (cámara de secado, colector y base) fue aluminio; ya que el equipo se moverá constantemente de lugar, lo que propiciará la ligereza del equipo. Las características sobresalientes del aluminio y sus aleaciones son su relación resistencia-peso, su resistencia a la corrosión y su alta conductividad térmica y eléctrica. La densidad de este material es de aproximadamente  $2770 \text{ kg/m}^3$  ( $0.10 \text{ lbf/pulg}^3$ ), que se compara con la del acero, de  $7750 \text{ kg/m}^3$  ( $0.28 \text{ lbf/pulg}^3$ ). El costo y la resistencia del aluminio y sus aleaciones los colocan entre los materiales más versátiles desde el punto de vista de la fabricación. Sus aleaciones se pueden maquinar, trabajar en prensa, soldar en forma directa, al bronce o

al estaño. Está comercialmente disponible en forma de placa, barra, lámina, hoja, varilla y tubo y en perfiles estructurales y extruidos. Deben tomarse ciertas precauciones al unir aluminio mediante soldadura directa al bronce o al estaño, los anteriores métodos de unión no se recomiendan para todas las aleaciones (Budynas & Nisbett, 2012). Por supuesto juega un papel importante su resistencia, y con ello tener un equipo con mayor durabilidad en comparación con otros materiales como la madera, por ejemplo, con el que se han realizado trabajos relacionados.

Al tratarse de un equipo térmico es recomendable utilizar un aislante para aumentar la efectividad del mismo en el proceso. Los productos de poliestireno extruido han probado su efectividad como aislantes térmicos a través de los años y recomendados especialmente en casos de humedad extrema y donde hay congelamiento. Es un aislante térmico de espuma rígida que contiene un aditivo retardador de fuego, que inhibe la ignición de acuerdo con la norma ASTM E 84 y es presentado en paneles que tienen una superficie lisa y una estructura de células cerradas, con paredes que se interconectan unas con otras sin dejar vacíos. Esta estructura uniforme le da al material altos valores de resistencia térmica y una resistencia superior al flujo de la humedad contra otros materiales aislantes; ya que la penetración de humedad reduce significativamente la eficiencia de cualquier producto aislante. Estos productos no contienen clorofluorocarbonos que dañan el medio ambiente (C.V., 2016).

La cubierta utilizada en el colector es de vidrio templado. El vidrio templado es un vidrio de seguridad, al que mediante tratamiento térmico se le ha incrementado la resistencia estructural del mismo sin alterar sus propiedades ópticas. La calidad del vidrio templado viene incrementada por el tipo de rotura que presenta, que es en miles de fragmentos pequeños de aristas redondeadas, que no causan heridas cortantes o lacerantes de consideración (Ibermampara, 2016).

En el colector, una lámina de cobre pintada de color negro mate será la responsable de absorber los fotones solares y con ello coleccionar y transmitir el calor al aire que lo rodee, y en consecuencia aumentar su temperatura.

## **5.2. Construcción del secador**

Diseñar y construir el equipo de secado son dos situaciones distintas, sin embargo, estas se encuentran en ciertos puntos conforme se avanza en el momento de trabajar físicamente con los materiales. Es decir, tomar en cuenta todo lo necesario para trabajar

de una manera cómoda y eficiente es un una situación a considerar de manera importante al momento de diseñar. Para la construcción se tomaron en cuenta:

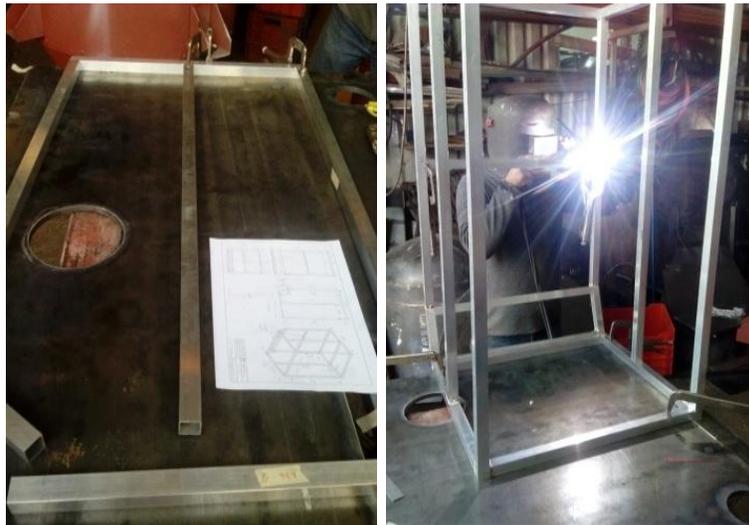
**Tabla 13. Dimensiones y material de construcción del secador solar experimental.**

<b>Componente</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Material</b>
<b>Cámara de secado</b>	0.60m x 0.60m x 1m	Estructura de aluminio Lámina de aluminio (paredes y canalizadores) Poliestireno extruido (aislante térmico) Vidrio templado (mirilla) Acero inoxidable (bandejas: malla 2" x 2")
<b>Colector</b>	0.60 m x 1m x 0.1778m	Estructura de aluminio Lámina de aluminio (paredes) Poliestireno extruido (aislante térmico) Lámina de cobre Vidrio templado
<b>Base</b>	0.60 m x 0.785 m	Aluminio

La elaboración del secador solar se llevó a cabo en un taller de Manufacturas y Servicio de Ingeniería Industrial Ortuño (MYSIO); el cual no solo proporcionó las herramientas necesarias, sino incluso material para la elaboración de ciertos detalles del equipo, así como el servicio de soldadura y otros. Los detalles del equipo conllevaron la fabricación de bisagras en el colector con la unión a la cámara de secado, el sistema de cerraduras en la puerta y el sistema de sujeción del colector a la cámara de secado cuando el equipo no se encuentra en uso (Figura 24). El ensamble del secador solar se ilustra a continuación en las figuras 18-25:



**Figura 18. Corte del material**



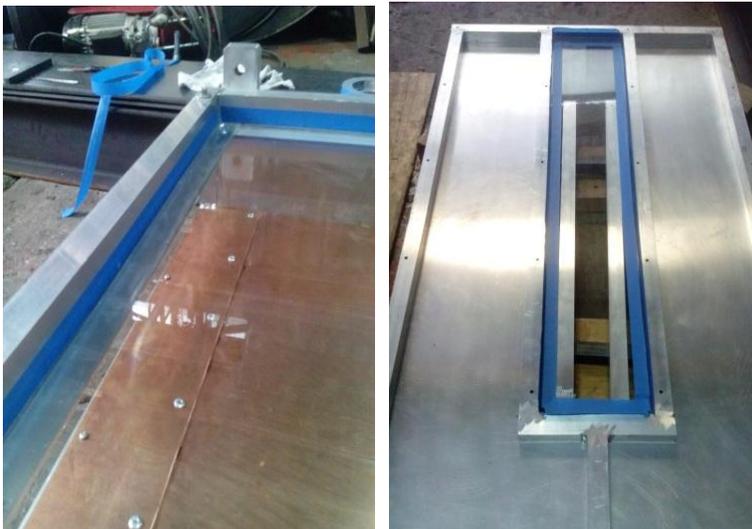
**Figura 19. Armado y fijación de estructuras con soldadura tig**



**Figura 20. Ensamble de las distintas caras que componen la cámara de secado, colector y puerta.**



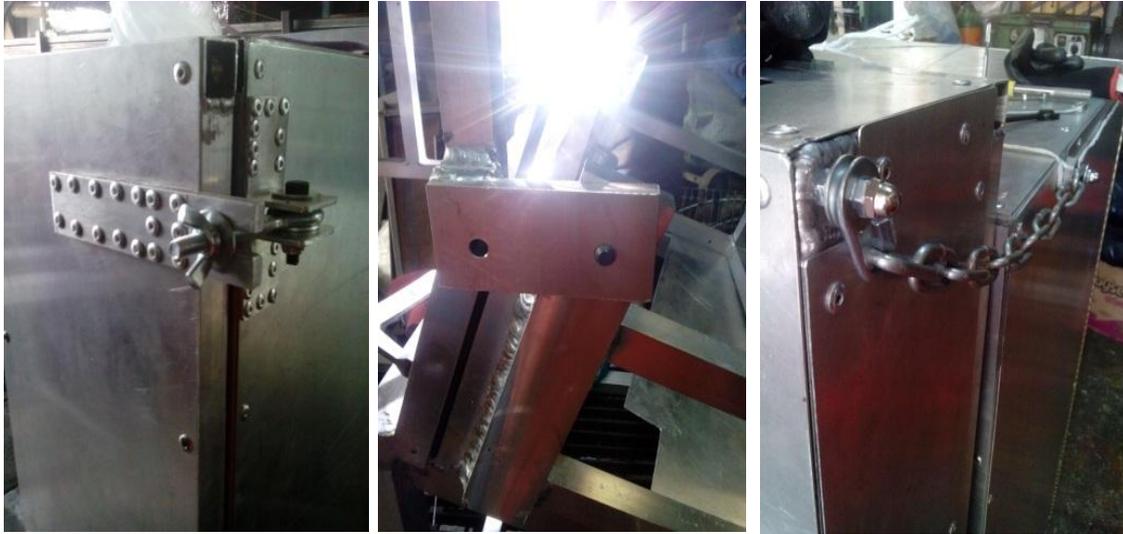
**Figura 21. Instalación del aislante térmico.**



**Figura 22. Sellado de juntas.**



**Figura 23. Instalación de cubiertas de vidrio.**



**Figura 24. Cerradura, bisagra y sistema de sujeción del colector.**



**Figura 25. Ensamble general y ensamble final.**

### 5.2.1. Costos.

Los costos abarcaron la compra del material que constituye al equipo, así como de algunos otros materiales como herramientas básicas de aplicación. También se toma en cuenta un estimado de horas de trabajo tanto del periodo de diseño como para el periodo de construcción. A continuación, en la tabla 14 se desglosa con detalle lo mencionado anteriormente.

**Tabla 14. Costos fijos de diseño y construcción del secador solar indirecto.**

<b>Cantidad (pzs.)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Importe (\$)</b>
5	Tubo cuadrado de aluminio de 25.4mm x 6.1m	865
1	Tubo rectangular de aluminio de 25.4mm x 38.1mm x 6.1m	240
2	Lámina de aluminio C/20 de 1.22m x 3.05m	1530
1	Lámina de aluminio C/20 de 0.91m x 3.05m	572
1	Angulo de aluminio de 1.6 x 9.5mm x 3.66m	24
1	Angulo de aluminio de 1.6 x 25.4mm x 3.66m	66
1	Moldura de aluminio de 3334	36
1	Lámina de cobre C/24 de 0.91m x 1m	800
<b>Total + IVA (16%):</b>		4794.28
2	Rodajas de 2 tipo pesado Pol. con freno	110
2	Rodajas fijas de 2 1/2 polietileno	110
<b>Total + IVA (16%):</b>		255.2
1	Silicón, ducto, cople y sombrero de lámina galvanizada	
<b>Total + IVA (16%):</b>		131.92
1	Vidrio templado 0.80m x 0.15m	
2	Vidrio templado 0.60m x 1m	
<b>Total + IVA (16%):</b>		535
2	Placas de poliestireno extruido de 0.60m x 1.22m	430

**Tabla 14. Costos fijos de diseño y construcción del secador solar indirecto.**  
(Continuación)

	<b>Total + IVA (16%):</b>	860
<b>1</b>	Silicón, thinner estándar 1L, primario Cromato de zinc, solución fosfatizante, pintura, brocha 2"	315
<b>1</b>	Bisagra	140
<b>200</b>	Remache pop aluminio 3/16"	100
<b>150</b>	Remache de acero inox 3/16"	300
<b>2</b>	Tornillos allen guía	80
<b>6</b>	Tornillos de acero inox 1/4" X 2 1/2"	60
	Rondanas, tuercas bellota, armellas, pijas punta de broca, broca 3/32"	50
<b>4</b>	Charolas de acero inoxidable, malla 2X2 cal. 18, 57.5cm X 54.5cm	6000
	<b>Total del costo del material</b>	<b>\$13,621</b>
	Servicio de soldadura TIG	3000
	Horas trabajadas en el diseño (200)	80,000
	Horas trabajadas en la construcción (435)	174,000
	<b>Costo fijo total</b>	<b>\$270,621</b>

En el mercado existen equipos de secado solar de diferentes marcas, variados tamaños, capacidades y diseños, y por supuesto de costos diferentes. Tomando en cuenta algunos ejemplos (Tabla 15), tenemos que el costo es completamente distinto al secador solar indirecto que se construyó en este proyecto. A pesar de que existen diferencias de material y diseño entre los equipos, la importancia recae en que en este caso se construyó un solo equipo y se tomaron en cuenta las condiciones específicas y necesarias para realizarlo, como lo son: la aplicación de los materiales de construcción son para uso en alimentos, se tomaron en cuenta las condiciones del lugar en donde se aplicó el equipo y la disponibilidad de los materiales de construcción. Y en el caso de secadores solares encontrados en el mercado se han fabricado en cantidades mayores, aspecto principal por el que disminuye su costo.

**Tabla 15. Características de secador comercial y el diseño de este proyecto.**

<b>Equipo</b>				
<b>Marca</b>	23 Grados	Bio Renaces	SAECSA	Proyecto
<b>Modelo</b>	DS23G-10KG	DSM0.93m23d	SAE-DSBR	DSMUE-10K
<b>Capacidad</b>	10kg	5kg	20kg	10kg
<b>Cámara de secado (al*an*l)</b>	104 x 64 x 39cm	-----	-----	60x60x100
<b>Charolas</b>	Marco aluminio y malla cuadra inerte	-----	Marco: aluminio, malla de acero inoxidable	Malla 2x2 en acero inox
<b>N° de charolas</b>	9 pzas. (57 x 35 cm)		5	4 (57x54cm)
<b>Colector (al*an*l)</b>	9 x 60 x 151cm	-----	-----	18x60x100
<b>Cubierta</b>	Acrílico cristal	-----	Cristal	Vidrio templado
<b>Área de captación</b>	0.9m <sup>2</sup>	-----	2.6m <sup>2</sup>	0.6m <sup>2</sup>
<b>Estructura</b>	Acero y lámina galvanizados con pintura anticorrosiva	Aluminio anodizado	-----	Aluminio y lámina de aluminio
<b>Temperatura alcanzada (°C)</b>	40-70	50-65	-----	40-60
<b>Precio</b>	\$10,800	\$5,614.01	\$89,635.68	\$270,621

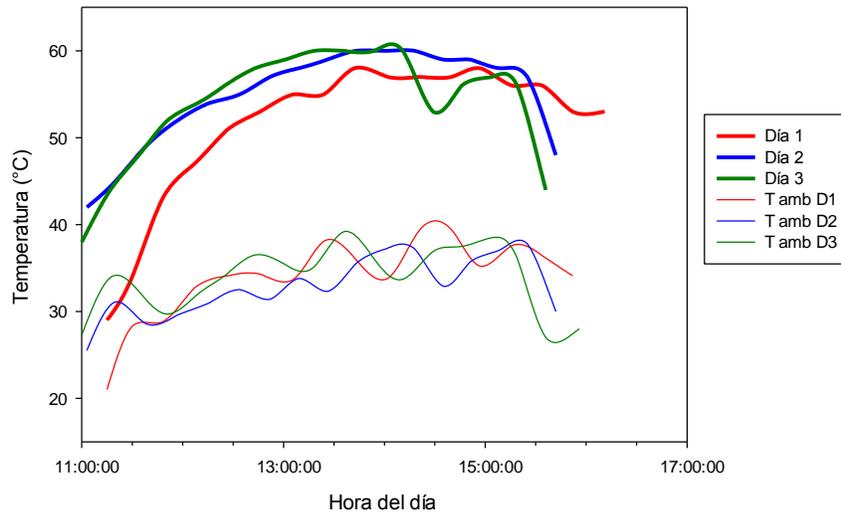
### 5.3. Caracterización del equipo.

La Figura 26 representa la temperatura del aire a la salida del colector (o entrada a la cámara de secado) durante el proceso de experimentación. La temperatura del aire en dicha sección se observó que aumentó gradualmente desde las 11:00 horas, partiendo de los 29, 33 y 24°C para los días 1, 2 y 3 respectivamente, hasta llegar a su punto más alto que se encuentra alrededor de las 14:00 horas, que fue de hasta 60°C para los días 2 y 3, y 58°C para el día 1. Posteriormente, a pesar de aún contar con la incidencia de los rayos de sol, la temperatura disminuyó hasta los 44°C en el caso del día 3, y 46 y 48°C en los días 1 y 2 respectivamente, en alrededor de las 16:00 horas en los tres días.

Al mismo tiempo, en la parte inferior del gráfico se muestran las curvas que representan la temperatura ambiente respecto al tiempo de experimentación, donde se puede apreciar el aumento de esta temperatura desde el comienzo de la experimentación, a las 11:00 horas del día, partiendo desde los 20, 21.5 y 27°C en los días 1, 2 y 3, respectivamente. Sin embargo, este aumento no lo hizo de manera gradual, sufre algunos cambios, aunque no muy drásticos, conforme avanzó el tiempo del día. A pesar de que los días en los que se realizaron las pruebas fueron soleados y con muy pocas nubes, estas oscilaciones se atribuyen principalmente a las pequeñas corrientes de viento en el ambiente que existieron durante el proceso. Pero a pesar de ello, se observó el ascenso de la temperatura conforme transcurre el tiempo en la mayoría del proceso de experimentación.

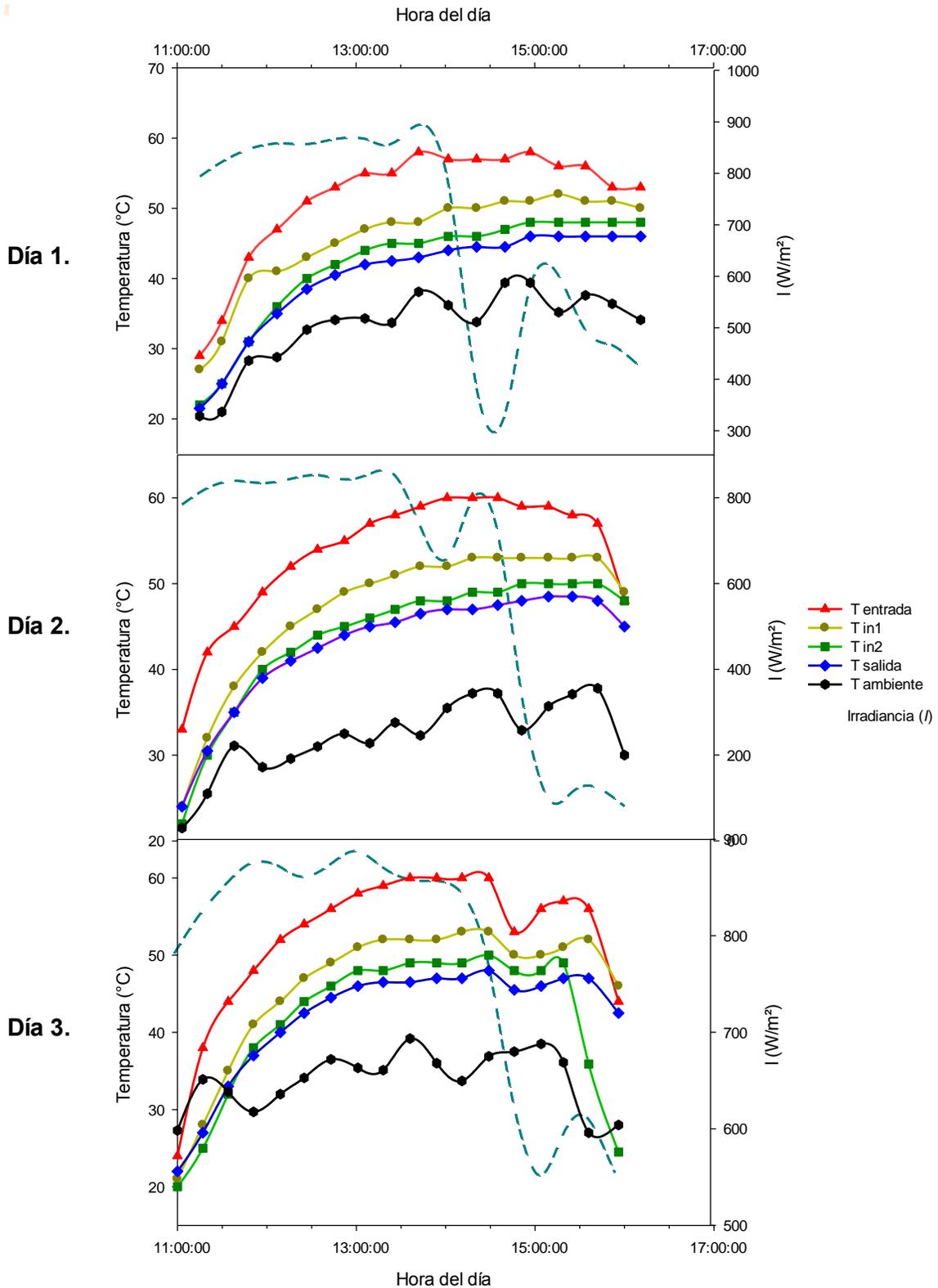
La temperatura ambiente llegó a un punto máximo de 39.4, 37.2 y 38.5°C para los días 1, 2 y 3 respectivamente, entre las 14:00 y 15:00 horas del día. A partir de este momento el valor de la temperatura comenzó a disminuir hasta llegar a los 34, 30 y 28°C para los días 1, 2 y 3 respectivamente, en alrededor de las 16:00 horas para los tres días.

La temperatura del aire a la salida del colector aumentó, mientras del mismo modo lo hace la temperatura ambiente. Al inicio de las pruebas se presentó una diferencia de estas dos temperaturas de poco más de 6°C. Posteriormente, se observó una diferencia de más de 20°C en los valores máximos entre estas dos temperaturas. A pesar de que ambas comenzaron a disminuir alrededor de las 15:00 h y se observaron los valores más bajos a las 16:00 h del día, siguió existiendo una diferencia significativa de más de 15°C entre estos valores finales en los tres días. Consecutivamente, la salida del aire del colector es la entrada a la cámara de secado. El aire atravesó interior de la cámara de secado provocando el aumento de la temperatura.



**Figura 26. Temperaturas a la salida del colector (curvas superiores) y temperaturas ambiente (curvas inferiores) de los tres días de experimentación de la caracterización del equipo.**

En la Figura 27 se muestra el comportamiento de la temperatura en la cámara de secado durante los tres días de experimentación. Claramente se puede observar que las más altas temperaturas se generan a la entrada de la cámara de secado, posteriormente en la sección donde se registró la temperatura interna 1 se obtuvieron temperaturas más bajas que las anteriores. En tercer lugar la sección donde se registró la temperatura interna 2, después la temperatura de salida de aire de la cámara de secado, y por último, las temperaturas más bajas se registraron en el ambiente. La temperatura interior 1 ( $T_{in1}$ ) presentó un aumento progresivo desde el comienzo, a las 11 horas, siendo de 27, 24 y 21°C los valores iniciales en los días 1, 2 y 3, respectivamente. Si se toma en cuenta el primer valor de la línea de color negro que representa la temperatura ambiente y se compara con el primer valor de la  $T_{in1}$ , se aprecia una diferencia de 6°C en los días 1 y 3, y de 3°C en el día 2. La temperatura interior 2 ( $T_{in2}$ ) presentó temperaturas iniciales de 22°C en los días 1 y 2, y 20°C en el día 3; y de igual forma comparando con la temperatura ambiente, se observó una diferencia en los valores iniciales de ambas temperaturas de 2, 1 y 7°C en los días 1, 2 y 3, respectivamente. Pero en el día 3 la temperatura ambiente fue mayor que la  $T_{in1}$  y la  $T_{in2}$ .



**Figura 27. Curvas de las temperaturas al interior de la cámara de secado, temperatura ambiente e irradiancia en la caracterización del equipo de secado.**

Igualmente, la  $T_{entrada}$ , la  $T_{salida}$  y la temperatura ambiente mostraron un ascenso con respecto a la hora del día. Con ello, se observó que desde el momento de inicio en el que se expone el equipo a los rayos solares, comenzó el precalentamiento del mismo y, aunque mínima, existieron temperaturas al interior de la cámara de secado mayores a la temperatura ambiente.

El comportamiento ascendente de las temperaturas al interior de la cámara de secado siguió hasta poco después de las 13:30h, momento en el que dichas temperatura llegaron a sus valores máximos.

La  $T_{in1}$  llegó a ser de hasta 52°C poco después de las 15:00h en el día 1, y de hasta 53°C poco después de las 14:00h en los días 2 y 3. A partir de estos puntos se mantuvieron pequeñas variaciones de uno a tres grados centígrados hasta minutos después de las 15:30h en los tres días. Sin embargo se apreció el comportamiento ascendente de temperatura en esta sección de la cámara de secado.

El punto máximo alcanzado en la curva que representa la  $T_{in2}$  es de 48°C en el día 1 y 50°C en los días 2 y 3. Esto se llevó a cabo alrededor de las 15:00h los días 1 y 2, y a las 14:30h en el día 3. Al comparar las temperaturas de estas últimas dos secciones de la cámara de secado se observó una diferencia de 4°C en el día 1 y una diferencia de 3°C en los días 2 y 3°C, en los valores más elevados. A su vez, si tomamos en cuenta la temperatura ambiente y las comparamos con los valores de temperaturas más altas de estas últimas dos secciones, se obtuvieron valores más altos en el interior de la cámara de secado, teniendo una diferencia de 17°C y 9°C con las  $T_{in1}$  y  $T_{in2}$  respectivamente, en el día 1; 16°C y 17°C con las  $T_{in1}$  y  $T_{in2}$  respectivamente, en el día 2; y 19°C y 13°C con las  $T_{in1}$  y  $T_{in2}$  respectivamente, en el día 3.

Entonces, entre estas dos secciones no existió diferencia significativa de temperatura, sin embargo, si existió una diferencia con la temperatura ambiente, que llegó a ser en promedio de 15°C mayor que la  $T_{ambiente}$ .

El comportamiento de la temperatura a la salida de la cámara de secado abarca las temperaturas más bajas dentro de la misma en la mayoría del tiempo de las pruebas, en los tres días, y mantuvo un comportamiento similar al de la  $T_{in2}$ . Los valores iniciales de esta curva son de 21.5, 24 y 22°C para los días 1, 2 y 3, respectivamente. Si observamos la temperatura ambiente, la diferencia que existió entre ésta y la  $T_{salida}$  fue mínima para los días 1 y 2, siendo de 1 y 3°C respectivamente; y para el día 3 la diferencia resaltó en

5°C, pero en este día existe una excepción ya que esta diferencia está de parte de la *T salida*.

Esta diferencia de temperaturas iniciales entre las diferentes secciones de la cámara de secado y la temperatura ambiente, dependió de la hora del día a la que se comience con la prueba respectiva y el tiempo en que el equipo se sometió a los rayos del Sol antes de comenzar con el registro de datos, a mayor tiempo de exposición inicial del equipo mayor fue dicha diferencia.

La curva de *T salida* ascendió respecto a la hora del día, hasta llegar a las 15:00 horas donde se presentan las temperaturas más altas en los días 1 y 2, tomando los valores de 46°C y 48.5°C respectivamente. En el día 3, la temperatura más alta se presenta a las 14:30 horas siendo de 48°C. En el día 1, los 46°C permanecieron constantes hasta el final de la prueba. Mientras que en los días 2 y 3 la temperatura más alta permaneció casi constante hasta las 15:30 horas, donde comenzó a descender hasta los 45°C en el día 2 y 42.5°C en el día 3, a las 16:00 h. Como se muestra en la gráfica, la sección de salida del aire de la cámara de secado comprendió temperaturas mayores que la temperatura ambiente notándose una mayor diferencia en el día 2, siendo de 13°C tomando en cuenta el punto más alto de la *T salida*. En los días 1 y 3, la misma diferencia fue de 7 y 9°C respectivamente. A pesar de que a partir de las 15:30 horas se observó el descenso de la temperatura, siguió permaneciendo una diferencia significativa entre los valores finales de estas dos curvas, siendo de 12°C en el día 1, y 15°C en los días 2 y 3. Por lo tanto, en esta última sección de la cámara de secado, se siguió manteniendo una diferencia mayor a 10°C por encima de la *T ambiente*.

También, en la Figura 27 se muestra la irradiancia que se presentó durante cada uno de los días. Se observó que para este parámetro se tuvieron los valores iniciales de 794, 784 y 782 W/m<sup>2</sup> para los días 1, 2 y 3, respectivamente. Así pues, a partir de las 11:00 horas la irradiancia presentó un ascenso notable hasta alrededor de las 12:00 horas en los tres días. Posteriormente se mantuvo ascendente mostrándose casi constante hasta llegar al valor más alto que fue de 856 y 888 W/m<sup>2</sup> en los días 2 y 3 en alrededor de las 13:00 horas; y de 894 W/m<sup>2</sup> en el día 1 a las 13:42 horas. Se apreció que desde este momento, en el día 1, la irradiancia descendió de manera pronunciada hasta tener un valor final de 423 W/m<sup>2</sup> a las 16:00 horas. La irradiancia descendió levemente hasta poco después de las 14:00 horas en los días 2 y 3, y de ahí comenzó una drástica disminución hasta las

16:00h hasta los 80 y los 554 W/m<sup>2</sup> de nuevo en los mismos días. La irradiancia es un parámetro que fue distinto en los tres días y mostró tener los valores más altos desde antes del mediodía hasta las 14:30horas, posteriormente cayó drásticamente. A pesar de ello, la temperatura ambiente no presentó una relación con la irradiancia, se mantuvo e incluso se observó un aumento en algunos casos.

Al aumentar la temperatura por medio del colector, se afecta la densidad del aire. Es decir, disminuye la densidad produciendo que el aire entre y transite a través de la cámara de secado. En la Figura 28 se expresa la velocidad del aire registrada en la cámara de secado durante distintos momentos de cada uno de los tres días de la caracterización. Al inicio de los tres días, la velocidad mostró valores de 0.2-0.4 debido a que apenas comenzó el aumento de la temperatura del aire, fue casi imperceptible. Posteriormente, poco después de haber transcurrido una hora, la velocidad adquirió valores mayores de 0.6 m/s en los días 1 y 2. En el día 3, se observó que esta velocidad se sobre pasa a poco menos de una hora y media después de iniciar, siendo de 0.8 m/s. A partir de alrededor del mediodía se comenzaron a registrar velocidades del aire más altas, llegando a alcanzar los 0.8 m/s en los tres días y manteniéndose constante entre los 0.6-0.8 m/s hasta el final de los tres días.

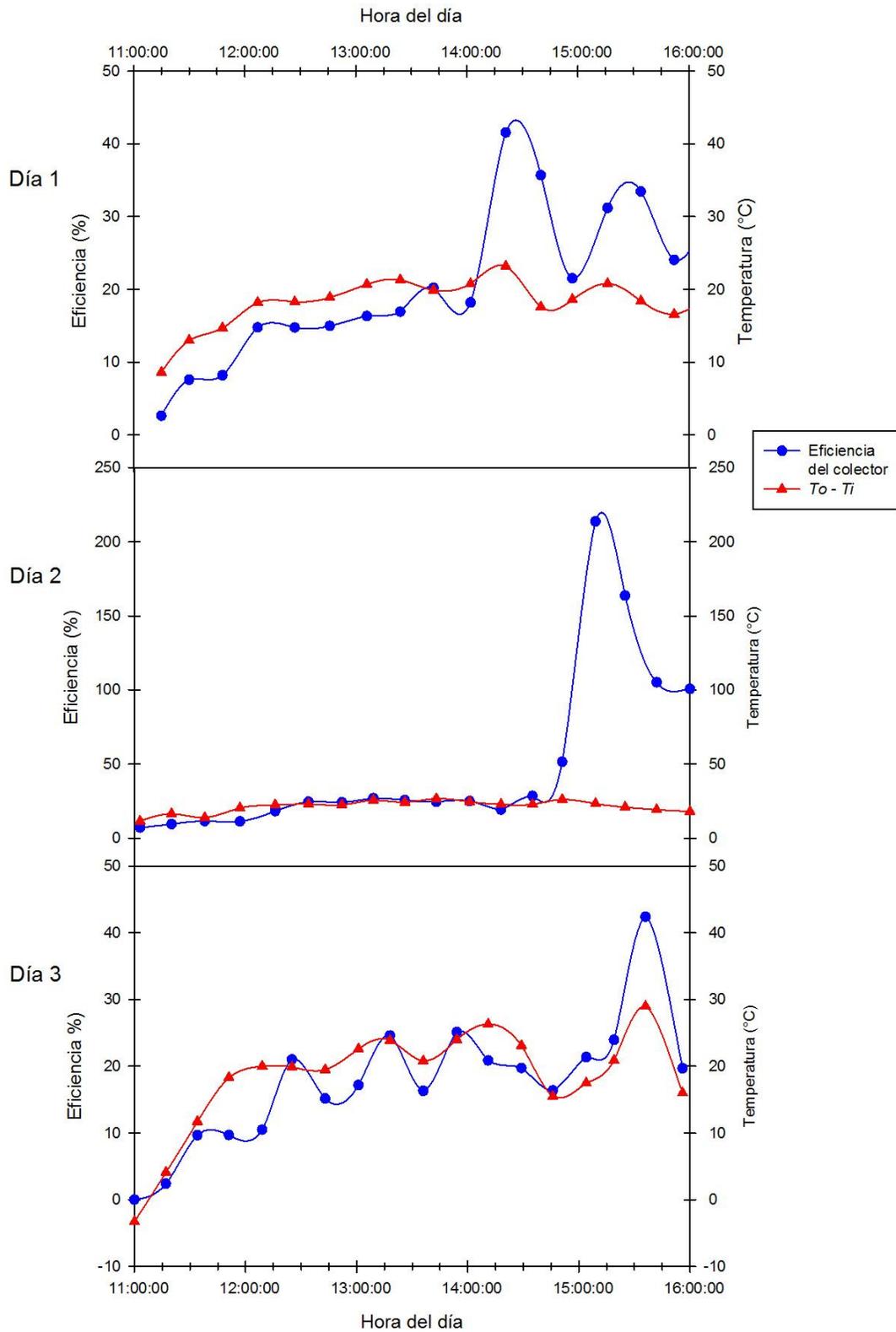


**Figura 28. Velocidad del aire en la cámara de secado en la caracterización del equipo de secado.**

En la figura 29 se grafican la eficiencia del colector en contraste con la diferencia de temperaturas a la entrada ( $T_i$ ) y salida del colector ( $T_o$ ), que son la temperatura ambiente y la temperatura a la entrada de aire de la cámara de secado respectivamente.

Cabe mencionar que la eficiencia aumentó conforme avanzó el día, dicho comportamiento fue similar en los tres días. También se mostró que en la mayoría de los puntos de la curva, la eficiencia se incrementó cuando a su vez también lo hizo la diferencia de las temperaturas en el colector.

Esto se presentó desde el inicio de las pruebas, teniendo entre el 8-18%, entre el 10-28% y entre el 10-24% de eficiencia, hasta aproximadamente las 14:00, 14:30 horas y poco después de las 15:00 horas en los días 1, 2 y 3, respectivamente. A partir de estos momentos, la eficiencia ascendió drásticamente obteniéndose hasta 41, 214 y 42% de eficiencia en el colector, en los días 1, 2 y 3, respectivamente. Se obtuvo una eficiencia muy alta en el día 2 debido a que la irradiancia es un parámetro que actuó sobre la eficiencia. Observando la Figura 27, se percibe que la irradiancia para ese punto de la eficiencia fue de  $97 \text{ W/m}^2$ , fue uno de los valores más bajos, de manera que afectó notablemente a la eficiencia, a pesar de que en ese punto también se registró una diferencia de temperaturas en el colector de  $25^\circ\text{C}$ . Después de esto los valores descendieron hasta el 25, 100 y 20% en los días 1, 2 y 3, respectivamente.



**Figura 29. Curvas de eficiencia y diferencia de las temperaturas de entrada y de salida del colector, en la caracterización del equipo de secado.**

#### 5.4. Proceso de aplicación del secador solar indirecto Con Carga.

Las temperaturas involucradas en el equipo, así como la irradiancia en cada uno de los días de experimentación, se presentan en la Figura 30. La temperatura ambiente a partir de las 12:00 horas fue de 25, 34 y 41.5°C en los días 1, 2 y 3 respectivamente, instantes del día en el que comenzó el proceso de secado de los pétalos de flor de cempasúchil. En el día 1, esta temperatura aumentó conforme transcurrió el tiempo teniendo temperaturas de 29°C y mayores a partir de las 13:50h hasta las 16:00h, llegando a tener un valor máximo de 33.5°C a las 15:34h. En el día 2 se registró el valor más alto de temperatura ambiente de los tres días, comenzando desde los 34°C y tuvo un aumento pronunciado que llegó hasta los 44°C poco después de las 13:00h, valor máximo de temperatura en este día. Posteriormente disminuyó poco a poco conforme avanza el tiempo, sin embargo, se mantuvieron temperaturas por encima de los 30°C hasta que, a las 16:00horas, el valor final fue de 33°C. Caso contrario, en el tercer día se observó una temperatura ambiente, al inicio del proceso, mayor que en los días 1 y 2, siendo de 41.5°C. Pero a continuación, las temperaturas disminuyeron poco a poco conforme transcurrió el día hasta su punto final de 35.3°C a las 16:00h. A pesar de las variaciones que existieron en los tres diferentes días, la temperatura ambiente (o también temperatura de entrada de aire al colector) se mantuvo alrededor de los 35°C en la mayoría del tiempo en los días 2 y 3. No tan lejano, en el día 1 se mantuvo alrededor de los 30°C de igual forma en la mayoría del tiempo.

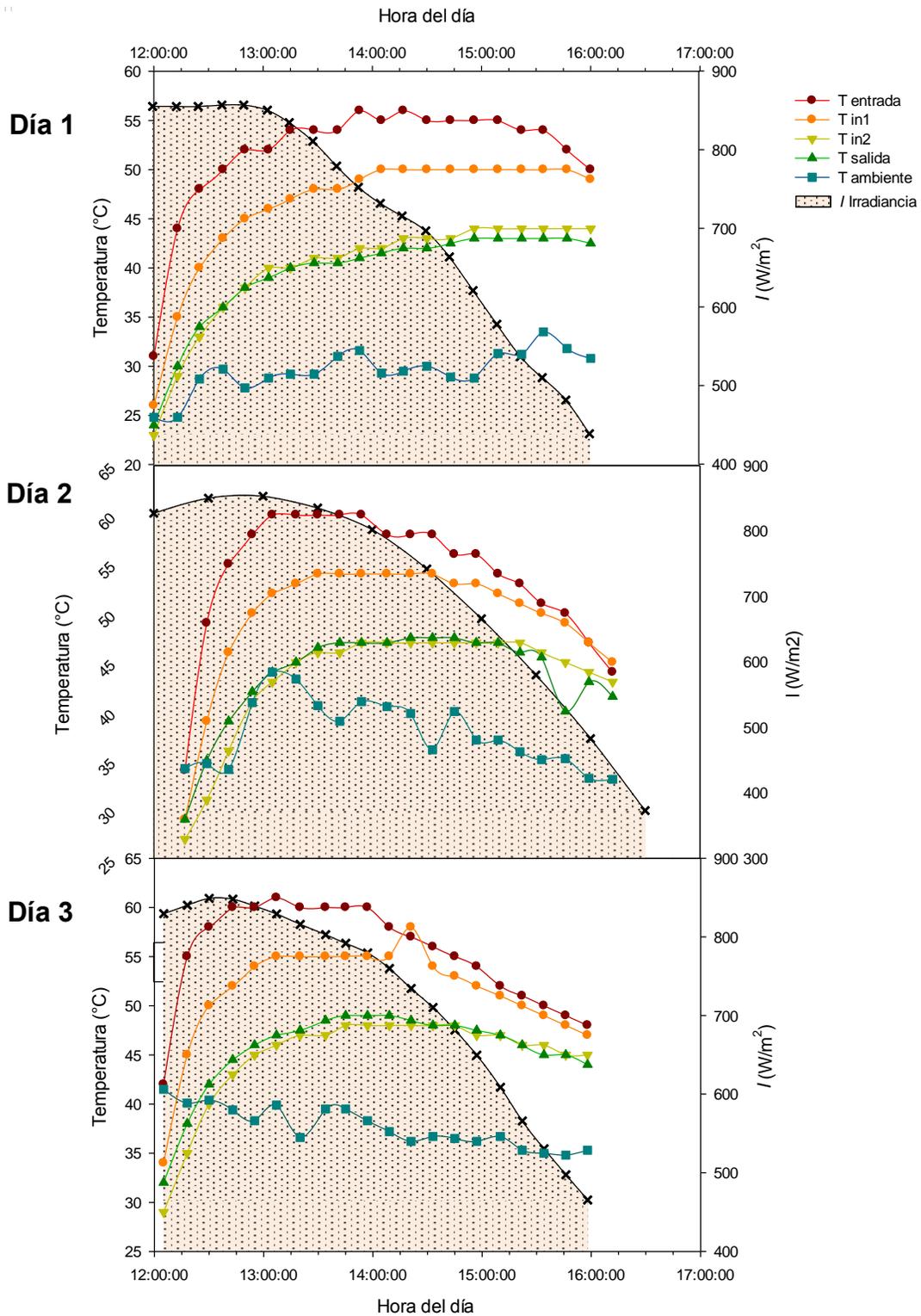
La temperatura de entrada de aire a la cámara de secado (o también temperatura de salida de aire del colector) mostró los valores más altos registrados en el equipo. Comenzando a las 12:00h con 31, 34 y 42°C en los días 1, 2 y 3 respectivamente, esta zona aumentó de temperatura más rápidamente que en las otras zonas del secador. Aproximadamente a la primera hora del proceso de secado, alrededor de las 13:00h, se registró una temperatura de 60°C, punto máximo que se mantuvo aproximadamente hasta las 14:00h en los días 2 y 3. De manera similar, en el primer día, la temperatura en esta zona aumentó hasta poco antes de las 14:00h siendo de 56°C. Esta se mantuvo  $\pm 1^\circ\text{C}$  hasta minutos después de las 15:00h, momento en el que comenzó a disminuir lentamente hasta los 50°C al final de la experimentación. Al comparar la temperatura de entrada de aire a la cámara de secado con la temperatura ambiente, se apreció que al haber mostrado los valores más altos de temperatura registrados en el equipo, en

consecuencia la diferencia entre estas dos secciones del equipo de secado también es la más notable. Es decir, que la  $T_{entrada}$  mostró ser mucho mayor que la temperatura ambiente, teniendo desde 19°C hasta 26.5°C por encima de esta última, a lo largo del día 1; de 14°C hasta 22°C por encima de la  $T_{ambiente}$  en el día 2; y desde 15 hasta 22°C en el día 3. Lo que indica que existió desde un 53% a un 65% mayor temperatura a la entrada de la cámara de secado en comparación con la temperatura ambiente.

La temperatura interior de la cámara de secado 1 ( $T_{int1}$ ) que corresponde a la posición de la bandeja 3, aunque a valores menores que la  $T_{entrada}$ , también ascendió de manera rápida conforme avanzó el tiempo en los tres días. Comenzando en los 26, 29°y 34°C en los días 1, 2 y 3 respectivamente, elevándose hasta los 50°C a las 14:00horas en el día 1, hasta los 54°C a las 13:30horas en el día 2 y hasta los 55°C a las 13:00h en el día 3, puntos máximos de temperatura que se alcanzó en esta zona del secador. En el día 1, esta temperatura se mantuvo constante hasta casi el final de la experimentación. En el penúltimo punto de la curva se observó el comienzo de su descenso a los 49°C. Mientras que en el día 2 se mantuvo constante durante una hora después, comenzando a disminuir hasta culminar en los 45°C. La temperatura interna 1 más alta que se registró en el día 3, tuvo el mismo comportamiento, también fue constante durante una hora, finalizando en los 47°C.

Las curvas muestran que existió una diferencia notable entre la temperatura ambiente y la  $T_{int1}$  de la cámara de secado. En el día 1 hubo una diferencia máxima de 21.2°C alrededor de las 15:00horas. En los días 2 y 3 se presentó una diferencia máxima alrededor de las 14:30horas de 17.9°y 21.8°C respectivamente. La Figura 30 muestra que la diferencia entre estas temperaturas se situó vigente en la mayoría del día y muestran también un comportamiento similar, es decir, que si la temperatura ambiente desciende también lo hace la temperatura interna 1. A pesar de su posterior descenso, esta sección del secador registró de 10°C o mayores por encima de la temperatura ambiente, hasta el final de la experimentación.

Una zona un poco más elevada en la cámara de secado es donde se registraron los valores de la temperatura interna 2 ( $T_{int2}$ ) y, aún más, la temperatura de salida de la cámara de secado ( $T_{salida}$ ). Ambas, en los tres días, presentaron un mismo comportamiento e incluso mismos valores provocando que en ciertos puntos las curvas se traslapen.



**Figura 30. Curvas de temperaturas en la cámara de secado, temperatura ambiente e irradiancia en cada uno de los tres días de experimentación con carga (pétalos de flor de campesúchil)**

En el día 1, la  $T_{int2}$  y la  $T_{salida}$  comenzaron en 23 y 24°C respectivamente, y aumentaron al paso del tiempo hasta situarse en los 44 y 43°C poco antes de las 15:00horas, ambas comportándose constantes hasta el final de la prueba. En el día 2, los valores en los que se inició en estas zonas fueron de 27 y 29°C para la  $T_{int2}$  y la  $T_{salida}$  respectivamente, aumentando hasta llegar a los 47°C después de las 13:30horas ambas temperaturas, y manteniendo este valor hasta poco después de las 15:00horas, momento en el que se mostró el descenso hasta los 43°C para la  $T_{int2}$  y 41.5°C para la  $T_{salida}$ . Resaltando con los valores más altos en esta sección de la cámara de secado, el tercer día comenzó con 29°C en la  $T_{int2}$  y 32°C en la  $T_{salida}$ , ascendiendo hasta que la  $T_{int2}$  llegó a los 48°C a las 13:45horas y la  $T_{salida}$  a los 49°C a las 13:30horas, situándose en este valor por una hora ambas temperaturas, donde posteriormente disminuyen hasta que adoptan los valores finales de 46 y 50°C, la  $T_{int2}$  y la  $T_{salida}$ , respectivamente.

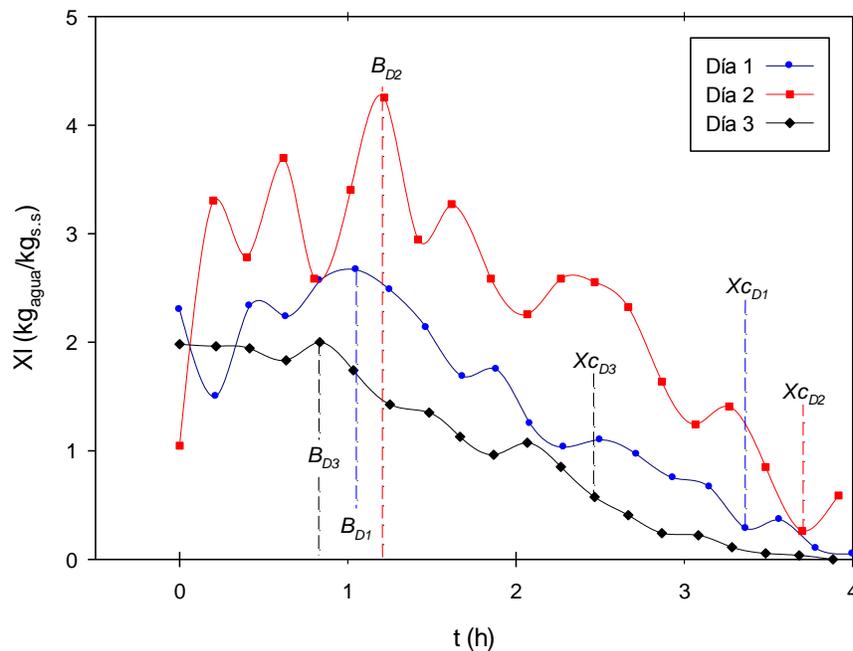
La diferencia de temperatura promedio entre estas dos zonas de la cámara de secado fue de 0.9°C y se observó que se mantuvo de esta manera durante todo el tiempo de experimentación.

A pesar de que la temperatura más bajas se presentaron en estas últimas dos secciones de la cámara de secado, se observó una diferencia mayor de entre 10 a 15°C respecto a la temperatura ambiente, aunque no totalmente, en los tres días. El día 1 es el que resalta en esta característica, teniendo una diferencia mayor a 10°C en el intervalo de las 13:00horas a las 16:00horas, en estas dos secciones del secador, donde se observaron valores de hasta 15.2°C en la sección de  $T_{int2}$  y 14.2°C en la sección de  $T_{salida}$ , por arriba de la temperatura ambiente. Caso contrario, en el día 2 es donde esta diferencia de temperaturas tuvo una menor duración, comenzando más tarde, alrededor de las 14:30horas en las dos secciones y manteniendo esta diferencia una hora y media en la sección de  $T_{int2}$  y una hora en la sección de  $T_{salida}$ , llegando a ser de hasta 11°C mayor que la  $T_{ambiente}$ , en las dos secciones. En el día 3, alrededor de las 13:30horas comenzaron a verse diferencias mayores de 10°C hasta minutos antes de las 16:00horas, llegando a ser de hasta 11.5°C, en las dos secciones.

Otro de los parámetros presentados en la Figura 30 es la Irradiancia. Mostrando los mayores valores, resalta el día 1, donde la irradiancia llegó a situarse en los 855W/m<sup>2</sup> desde el comienzo de la experimentación hasta una hora después. El valor más alto del segundo día fue de 854W/m<sup>2</sup> a las 13:00 horas, donde a partir de ese momento comenzó

a disminuir con el tiempo. El día 3, por su parte, mostró una irradiancia máxima de  $850\text{W/m}^2$  desde las 12:30 horas hasta algunos minutos después. Es decir, que una alta irradiancia se ubicó alrededor del mediodía en los tres días. A pesar de que existió una temperatura calurosa, cielo despejado y soleado, se observó el descenso de la irradiancia conforme avanzaba la tarde. Sin embargo, el rango de valores observados en los tres días fueron entre los 830 hasta poco menos de los  $440\text{ W/m}^2$  durante el tiempo que duró el proceso de secado.

En los resultados mostrados en la Figura 31, donde se puede apreciar la tendencia de la humedad libre ( $X_l$ ) a disminuir con el paso del tiempo ( $t$ ) en los tres días, se observó que a partir del tiempo 0 donde inició el secado, comenzó un periodo corto de acoplamiento, donde la humedad libre aumentó hasta alrededor del tiempo 1 en los días 1 y 2.



**Figura 31. Curvas de humedad libre de pétalos de flor de cempasúchil en tres diferentes días de experimentación.**

Esto nos dice que durante este periodo los pétalos de cempasúchil adoptaron cierta humedad, la cual provenía de la bandeja número 4, es decir, el aire que comenzaba a calentarse y entraba a la cámara de secado arrastraba humedad de la primer bandeja que tocaba (bandeja 4) y ésta era absorbida, aunque no en su totalidad, por la siguiente

bandeja (bandeja 3), lo que ocasionó este ascenso en las curvas. En particular, al inicio del día 3, la humedad libre se presentó casi constante en alrededor de los  $2 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$ , y de igual manera hasta tiempo 1.

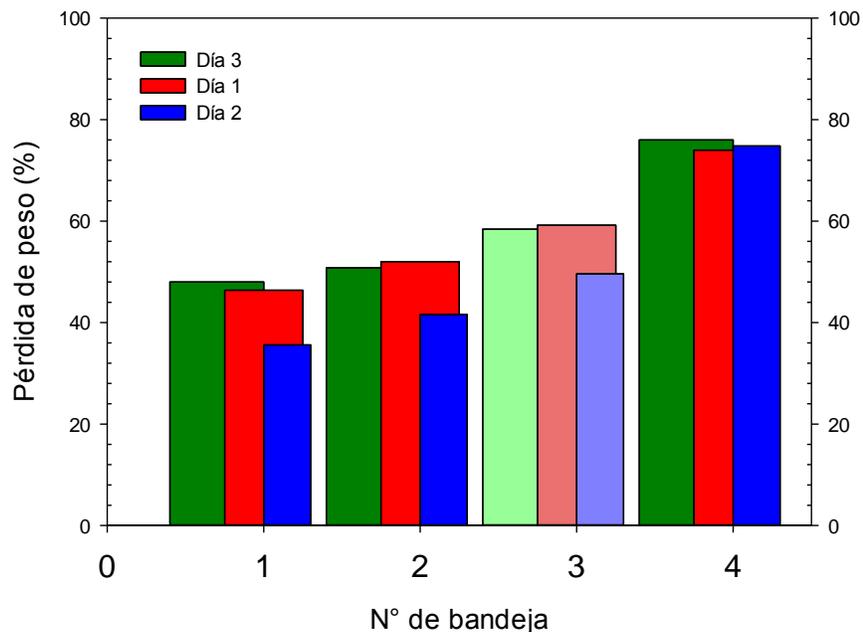
A partir de estos puntos (B), y aunque no se mostró una línea recta, en los tres días fue notable la disminución constante de la humedad libre (periodo de velocidad constante) hasta llegar a  $0.28 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$  al tiempo 3.3,  $0.26 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$  al tiempo 3.7 y  $0.57 \text{ kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{s.s.}}$  al tiempo 2.5, en los días 1, 2 y 3 respectivamente; valores que a su vez también nos indican la humedad crítica ( $X_c$ ). La humedad crítica en el día 2 se presentó en un punto de la gráfica muy avanzado. Esto se refiere a que durante el proceso de secado no existió una pérdida de peso uniforme cada vez que avanzaba el tiempo. Hubo constantes cambios de pérdida y aumento, como antes mencionado, provocados por el arrastre de humedad a partir de la bandeja 4.

Es probable que al extender el tiempo de secado la humedad crítica y la diferencia entre los periodos de la curva hubiesen sido aspectos más notables. Se tomó en cuenta el penúltimo punto de la curva como el que indica la humedad crítica debido a la tendencia que sigue la curva a la pérdida de humedad. En consecuencia, resalta un amplio periodo de velocidad constante y de hecho es casi imperceptible el punto de humedad crítica en este día.

Posteriormente, comenzó el periodo de velocidad decreciente donde la humedad libre disminuyó a intervalos más cortos, observándose de mejor manera en el día 3, lo que señala que los pétalos de cempasúchil se mostraron casi secos. Hasta que finalmente el contenido de humedad libre tendió a cero, en los días 1 y 3. Mientras tanto en el día 2, en la curva no se mostró un periodo de velocidad decreciente, la separación entre los valores de humedad libre entre los puntos que integran la curva sigue siendo significativa, es decir, no se presentaron intervalos más cortos como en el día 1 y 3 como para predecir la existencia de un periodo decreciente.

El comportamiento de la pérdida de peso de los pétalos de cempasúchil se presenta en la Figura 32. La bandeja número 3 sobresale en colores distintos señalando la bandeja a la que se registró el peso cada cierto tiempo, como se mencionó en la metodología. La pérdida de peso de los pétalos de flor de cempasúchil fue mayor en la bandeja 4 siendo de  $18.7\text{g}$  que se traduce en el  $74.9\%$  en promedio, en los tres días. Por lo contrario, en la bandeja 1 se percibió una menor pérdida de peso en los tres días. Un comportamiento

ascendente en la pérdida de peso se observó conforme el número de la bandeja. Es decir, que la tendencia a la pérdida de peso de los pétalos de cempasúchil dependió de la posición en la que se encuentren al interior de la cámara de secado, entre más cerca de la entrada del aire caliente mayor fue la pérdida de peso, debido a que el aire se encontraba menos saturado de humedad y conforme asciende el aire a través de la cámara de secado, este se encuentra cada vez más saturado de humedad provocando tal comportamiento.



**Figura 32. Disminución del peso en el proceso de secado de pétalos de flor de cempasúchil.**

## **6.0. Conclusiones**

Con base en los resultados anteriores se concluye lo siguiente:

1. Diseñar y construir el equipo de secado son dos situaciones distintas, sin embargo, estas se encuentran en ciertos puntos conforme se avanza en el momento de trabajar físicamente con los materiales. Es decir, tomar en cuenta todo lo necesario para trabajar de una manera cómoda y eficiente es una situación a considerar de manera importante al momento de diseñar.
2. La temperatura alcanzada a la entrada de la cámara de secado fue de 60°C cuando la temperatura ambiente oscilaba en los 38°C, se presentó una diferencia de más de 20°C en los valores máximos entre estas dos temperaturas. La temperatura en el interior de la cámara de secado se mantuvo, en la mayoría del tiempo, entre 10 a 26°C por encima de la temperatura ambiente. Y la eficiencia térmica del colector osciló entre el 40-50%. Todo lo anterior, en el proceso de secado con carga cero. Por lo tanto, el equipo de secado mantiene un buen diseño ya que mantuvo temperaturas del orden de 10 a 25°C sobre la temperatura ambiente, lo que conllevó a un proceso adecuado.
3. El proceso de deshidratado en el equipo de secado solar indirecto, depende principalmente de las condiciones ambientales, tales como la temperatura ambiente, y también de las características del material que será secado, es decir, de su contenido de humedad, epidermis, grosor, etc.
4. La utilización del equipo de secado solar indirecto puede funcionar como una alternativa tecnológica para el deshidratado de productos hortofrutícolas, obteniendo un ahorro en el costo de energía debido al uso de una fuente renovable, fácil manipulación, bajo costo de mantenimiento y la probable inocuidad en el producto final.

## **7.0. Recomendaciones**

De acuerdo a los resultados anteriores, se recomienda para continuar este trabajo:

1. Instalar un ventilador con el fin de conocer el proceso de secado utilizando aire en condiciones de convección forzada.
2. Poner en funcionamiento el equipo en meses de primavera y verano, donde las condiciones ambientales, tales como la radiación solar y la temperatura, muestran valores accesibles para un secado más eficiente.
3. Tomar en cuenta las características de la báscula que se va a usar cuando se tengan que realizar curvas de secado, como la capacidad de carga, ya que también se debe tomar en cuenta el peso de la charola de acero inoxidable del equipo. Y que contenga un sistema inferior de agarre para el pesaje (gancho inferior). Así como un sistema que sujete este último con la bandeja donde se encuentra el material a secar.
4. Instalar rodajas con las que el equipo pueda tener mayor movilidad en terrenos con vegetación o terracería, dado el caso
5. Colocar una capa de aislante térmico en la parte inferior externa del colector para tener un mayor aprovechamiento del calor.
6. Realizar pruebas químicas y fisicoquímicas para conocer la calidad final del material secado en este equipo.

## 8.0. Bibliografía

- (SNIM), S. N. (14 de 12 de 2017). *Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal*. Obtenido de <http://www.snim.rami.gob.mx/>
- Aguado Alonso, J., Rodríguez Somolinos, F., Calles Martín, J. A., Cañizares Cañizares, P., López Pérez, B., Santos López, A., & Serrano Granados, D. P. (2002). *Ingeniería de la industria alimentaria* (Vol. 3). Madrid: Editorial Sintesis.
- Altobelli, F., Condorí, M., Duran, G., & Martínez, C. (2014). Solar dryer efficiency considering the total drying potential. Application of this potential as a resource indicator in north-western Argentina. *Solar Energy*, 105, 742-759.
- Andrea Catraro, M. (2014). El Cultivo de la Higuera : Producción de higos y su deshidratación como método para el agregado de valor del producto. *Trabajo final para optar por el grado académico: Especialista en cultivos intensivos*. Facultad de ciencias agrarias. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9 ed.). New York: McGraw-Hill.
- C.V., P. t. (12 de 09 de 2016). *Protección termica Arizpe*. Obtenido de [http://www.protarsa.com/Poliestireno\\_extruido.html](http://www.protarsa.com/Poliestireno_extruido.html)
- Castro Ríos, K. (2010). *Tecnología de los alimentos*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Chang, S. K., Alasalvar, C., & Shahidi, F. (2016). Review of dried fruits: Phytochemicals, antioxidant efficacies, and health benefits. *Journal of Functional Foods*, 21, 113-132.
- Dina, S. F., Ambarita, H., Napitupulu, F. H., & Kawai, H. (2015). Study of effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. *Case Studies in Thermal Engineering*, 5, 32-40.
- Fito Maupoey, P., Andrés Grau, A. M., Barat Baviera, J. M., & Albors Sorolla, A. M. (2001). *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*. Valencia: U. P. V.
- Geankoplis, J. C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias* (3ra edición ed.). México: Continental.
- Hedge, V. N., Hosur, V. S., Rathod, S. K., Harsoor, P. A., & Narayana, K. B. (2015). Design, fabrication and performance evaluation of solar dryer for banana. *Energy, Sustainability and Society*, 5, 23.
- Heldman, D. (1981). *Food process engineering* (2da ed.). Westport, Connecticut: AVI publishing company inc.
- Ibartz, A., & Barbosa Cánovas, G. (2003). *Unit operations in food engineering*. Lleida; Pullman, Spain; USA: CRC PRESS.
- Ibermampara. (12 de 09 de 2016). *Vidrio templado, seguridad garantizada*. Obtenido de [www.ibermampara.com/docs/vidriotemplado.pdf](http://www.ibermampara.com/docs/vidriotemplado.pdf)
- Jain, D., & Tewari, P. (2015). Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage. *Renewable Energy*, 80, 244-250.
- José Suani Cruz, H. D. (14 de 12 de 2017). *Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de México*. Obtenido de <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15121a.html>

- Kalogirou, S. A. (2014). Chapter 7. Industrial process heat, chemistry applications and solar dryers. En S. Kalogirou, *Solar energy engineering. Processes and systems*. (págs. 397-429). Elsevier Inc.
- Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Kumar, A., & Jain, A. (2016). Thermal energy storage based solar drying systems: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, 86-99.
- Karam, M. C., Petit, J., Zimmer, D., & Djantou, E. B. (2016). Effects of drying and grinding in production of fruit and vegetable powders: A review. *Journal of Food Engineering*, 188, 32-49.
- M. Kumar, S. K. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 346-360.
- Mustayen, A., Mekhilef, S., & Saidur, R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 463-470.
- Osman Ismail, A. K. (2017). Open sun drying of green bean: influence of pretreatments on drying kinetics , colour and rehydration capacity. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 1277-1288.
- Potter, N. N. (1978). *La ciencia de los alimentos*. Westport, Connecticut: Edutex, S. A.
- Romero, V. M., Cerezo, E., García, M. I., & Sanchez, M. H. (2014). Simulation and validation of vanilla drying process in an indirect solar dryer prototype using CFD Fluent program. *Energy Procedia*, 57, 1651-1658.
- SAGARPA. (07 de Agosto de 2015). *¿Frutos secos o deshidratados?* Obtenido de <http://www.gob.mx/sagarpa/articulos/frutos-secos-o-deshidratados>
- Sharma, N., & Sharma, A. (2012). Construction and performance analysis of an indirect solar dryer integrated with solar air heater. *Procedia Engineering*, 38, 3260-3269.
- Siemens. (1996). *Solid Edge. Diseña mejor*. Recuperado el 7 de Abril de 2016, de [https://www.plm.automation.siemens.com/es\\_mx/products/solid-edge/](https://www.plm.automation.siemens.com/es_mx/products/solid-edge/)
- Singh Chauhan, P., Kumar, A., & Tekasakul, P. (2015). Applications of software in solar drying systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 51, 1326-1337.
- Treybal, R. E. (1980). *Operaciones de transferencia de masa* (2da ed.). México: Mc Graw Hill.
- UNAM. (21 de Octubre de 2017). *PEMBU*. Obtenido de Programa de Estaciones Meteorológicas para el Bachillerato Universitario: [www.ruoa.unam.mx](http://www.ruoa.unam.mx)
- Vanaclocha, A. C., & Requena, J. A. (2003). *Procesos de conservación de alimentos* (Segunda ed.). España: A. Madrid Vicente, Ediciones.

## 9.0 Anexos

Diferentes vistas del secador solar indirecto finalizado en pruebas preliminares en el CAT.

