



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

---

**División de Ciencias e Ingeniería**

**PROCESO DE SECADO DE CHILE EN UN  
SECADOR SOLAR INDIRECTO**

**TESIS RECEPCIONAL**  
Para obtener el Grado de

*Ingeniero en Sistemas de Energía*

**PRESENTA**

**MIGUEL ÁNGEL CHÉ YAM**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**

Chetumal, Quintana Roo, Noviembre de 2007



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
División de Ciencias e Ingeniería

Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**COMITÉ**

**Director:** Dr. José Hernández Rodríguez

**Asesor:** M.E.S. Roberto Acosta Olea

**Asesor:** M.C. Jaime D. Cuevas Domínguez

Chetumal, Quintana Roo, Enero de 2008

**DEDICATORIA**

*A mi familia, en especial a mi papá.*

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo ha sido realizado en el Departamento de Ciencias e Ingenierías de la Universidad de Quintana Roo bajo la dirección del Dr. José Hernández Rodríguez, a quien quiero expresar mi más sincero y afectuoso agradecimiento por su valioso y permanente apoyo, que ha hecho posible la realización de esta Tesis.

También quiero agradecer al M.E.S. Roberto Acosta Olea y al M.C. Jaime Cuevas Domínguez por su ayuda y colaboración.

Asimismo quiero agradecer infinitamente a una persona muy especial que con su sacrificio, apoyo y sobre todo por su amor y cariño incondicional, me supo orientar y lograr esta meta tan esperada. Gracias PAPÁ... ¡Descanse en Paz.

Gracias también a mi mamá por su amor y cariño.

A mi esposa Beatriz Adriana por su apoyo, amor, comprensión y sobre todo su ayuda no solamente para lograr este trabajo, sino durante toda la carrera, para alcanzar la meta.

Por último quiero agradecer a los maestros de la División Ciencias e Ingenierías que con sus conocimientos me orientaron para lograr este objetivo.

**INDICE**

<b>RESUMÉN</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>CAPITULO I</b>	
<b>1. ANTECEDENTES.</b>	<b>5</b>
<b>1.1 SECADO.</b>	<b>5</b>
<b>1.2 CLASIFICACIÓN DE SECADORES.</b>	<b>5</b>
<b>1.3 SECADOR SOLAR.</b>	<b>6</b>
<b>1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.</b>	<b>8</b>
<b>1.5 EJEMPLOS DE APLICACIONES DEL SECADOR SOLAR.</b>	<b>8</b>
<b>1.5.1 Secador solar tipo gabinete.</b>	<b>8</b>
<b>1.5.2 Secador solar multipropósito.</b>	<b>9</b>
<b>1.5.3 Secador-invernadero de policarbonato.</b>	<b>10</b>
<b>1.5.4 Secador solar tipo túnel.</b>	<b>10</b>
<b>1.5.5 Secador solar tipo túnel con paneles Fotovoltaicos.</b>	<b>11</b>
<b>1.5.6 Secador solar indirecto.</b>	<b>12</b>
<b>CAPITULO II</b>	
<b>2. PROCESO DE SECADO.</b>	<b>13</b>
<b>2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE SECADO SOLAR.</b>	<b>14</b>
<b>2.1.1 El contenido de humedad de un producto.</b>	<b>14</b>

<b>2.2 ETAPAS FUNDAMENTALES DE SECADO SOLAR.</b>	<b>16</b>
2.2.1 Periodo de atemperado.	16
2.2.2 Periodo de velocidad constante.	17
2.2.2.1. Modelos que definen el período de velocidad constante.	17
2.2.3 Periodo de velocidad decreciente.	19
2.2.3.1. Mecanismos que intervienen en la pérdida de humedad.	20
<b>2.3 PSICROMETRIA DEL AIRE.</b>	<b>20</b>
2.3.1 Aire seco y aire húmedo.	20
<b>2.4 LA PRESIÓN DE SATURACIÓN.</b>	<b>22</b>
<b>2.5 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA MEZCLA.</b>	<b>23</b>
2.5.1 Entalpía.	23
<b>2.6 CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA PSICROMÉTRICO.</b>	<b>24</b>
2.6.1 Línea de saturación.	24
2.6.2 Carta Psicrométrica.	25

### **CAPITULO III**

<b>3. MATERIAL, EQUIPOS Y METODOLOGÍA.</b>	<b>27</b>
<b>3.1 MATERIAL Y EQUIPOS.</b>	<b>27</b>
3.1.1 Secador Solar Indirecto.	27
<b>3.2 METODOLOGÍA.</b>	<b>30</b>
3.2.1 Secado en horno.	30
3.2.2 Proceso de secado en el secador solar indirecto.	30

**CAPITULO IV**

<b>4. RESULTADOS.</b>	<b>34</b>
<b>4.1 PRUEBA CON CHILE JALAPEÑO ENTERO.</b>	<b>34</b>
4.1.1 Temperaturas e irradiancia solar.	34
4.1.2 Humedad interior y exterior del secador solar.	36
4.1.3 Contenido de humedad.	37
4.1.4 Color y textura.	38
<b>4.2 PRUEBA CON CHILE JALAPEÑO         CORTADO LONGITUDINALMENTE.</b>	<b>40</b>
4.2.1 Temperaturas e irradiancia solar.	40
4.2.2 Humedad interior y exterior del secador solar.	43
4.2.3 Contenido de humedad.	44
4.2.4 Color y textura.	45
<b>4.3 COMPARACION DE LAS CURVAS DE SECADO         DE LOS CASOS ANALIZADOS.</b>	<b>46</b>
4.3.1 Consumo de energía de proceso de secado.	47

**CAPITULO V**

<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>48</b>
<b>RECOMENDACIONES.</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>50</b>
<b>ANEXOS.</b>	<b>51</b>
Formatos utilizados para la toma de valores durante el proceso de secado solar.	52

<b>Fotografías del chile jalapeño con corte longitudinal.</b>	<b>55</b>
<b>Fotografía del chile jalapeño entero.</b>	<b>58</b>

INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> <i>Fotografía de un secador solar directo.</i>	7
<b>Figura 1.2.</b> <i>Fotografía de un Secador solar indirecto.</i>	7
<b>Figura 1.3.</b> <i>Secador tipo gabinete y detalle del interior de la cámara de secado.</i>	9
<b>Figura 1.4.</b> <i>Secador solar multipropósito.</i>	9
<b>Figura 1.5.</b> <i>Secador-invernadero de policarbonato.</i>	10
<b>Figura 1.6.</b> <i>Secador solar tipo túnel.</i>	11
<b>Figura 1.7.</b> <i>Secador solar tipo túnel con Páneles fotovoltaicos.</i>	12
<b>Figura 1.8.</b> <i>Secador indirecto-Uqroo.</i>	12
<b>Figura 2.1.</b> <i>Esquema de la transferencia de masa y calor en el secado de un producto.</i>	13
<b>Figura 2.2.</b> <i>Comportamiento general del secado bajo condiciones externas constantes.</i>	14
<b>Figura 2.3.</b> <i>Tipos de humedades.</i>	15
<b>Figura 2.4.</b> <i>Curvas de velocidad características.</i>	16
<b>Figura 2.5.</b> <i>Período de atemperado (Etapa A-B).</i>	16
<b>Figura 2.6.</b> <i>Periodo de velocidad constante (Etapa B-C).</i>	17
<b>Figura 2.7.</b> <i>Transferencias de calor y masa.</i>	18
<b>Figura 2.8.</b> <i>Esquema de comportamiento del calor latente y calor total.</i>	19
<b>Figura 2.9.</b> <i>Periodo decreciente (etapa C-D).</i>	20
<b>Figura 2.10.</b> <i>Diagrama generado con la ecuación anterior.</i>	25
<b>Figura 2.11.</b> <i>Diagrama Psicrométrico.</i>	26

<b>Figura 3.1.</b> Termohigrometros.	27
<b>Figura 3.2.</b> Piranómetro.	27
<b>Figura 3.3.</b> Monitor de termopares.	27
<b>Figura 3.4.</b> Balanza.	27
<b>Figura 3.5.</b> Secador solar tipo indirecto.	28
<b>Figura 3.6.</b> Funcionamiento del secador con las ventilas cerradas, para la recirculación del aire.	29
<b>Figura 3.7.</b> Funcionamiento del secador con las ventilas abiertas para la circulación del aire.	29
<b>Figura 3.8.</b> Muestras finales del chile jalapeño.	30
<b>Figura 3.9.</b> Posición de los termopares en la cámara de secado.	31
<b>Figura 3.10.</b> Marcación de las muestras.	32
<b>Figura 3.11.</b> Colocación del producto.	32
<b>Figura 4.1.</b> Temperaturas registradas en el interior (termopar 4) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.	35
<b>Figura 4.2.</b> Temperaturas registradas en el interior (termopar 7) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.	35
<b>Figura 4.3.</b> Temperaturas registradas en el interior (termopar 8) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.	36
<b>Figura 4.4.</b> Humedad relativa en el interior y exterior del secador solar durante el proceso.	37
<b>Figura 4.5.</b> Pérdida de contenido humedad en base seca.	38
<b>Figura 4.6.</b> Color y textura del chile jalapeño durante el proceso.	39
<b>Figura 4.7.</b> Temperaturas registradas en el interior (termopar 2) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.	40

<b>Figura 4.8.</b> <i>Temperaturas registradas en el interior (termopar 3)</i>	
<i>y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.</i>	41
<b>Figura 4.9.</b> <i>Temperaturas registradas en el interior (termopar 4)</i>	
<i>y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.</i>	41
<b>Figura 4.10.</b> <i>Temperaturas registradas en el interior (termopar 5)</i>	
<i>y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.</i>	42
<b>Figura 4.11.</b> <i>Temperaturas registradas en el interior (termopar 7)</i>	
<i>y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.</i>	42
<b>Figura 4.12.</b> <i>Temperaturas registradas en el interior (termopar 8)</i>	
<i>y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.</i>	43
<b>Figura 4.13.</b> <i>Humedad relativa en el interior y exterior</i>	
<i>del secador solar durante el proceso.</i>	44
<b>Figura 4.14.</b> <i>Pérdida de contenido humedad en base seca.</i>	45
<b>Figura 4.15.</b> <i>Color y textura del chile jalapeño durante el proceso.</i>	45
<b>Figura 4.16.</b> <i>Comparación de las curvas de secado para los casos analizados.</i>	46

**INDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b>	<i>Clasificación de Secadores.</i>	6
<b>Tabla 2.</b>	<i>Datos para la construcción del diagrama psicrométrico.</i>	25

### NOMENCLATURA

$M$	Contenido de humedad en Base Húmeda.	gr/gr seco
$X$	Contenido de humedad en Base Seca.	gr/gr húmedo
$A$	Área expuesta al secado.	$m^2$
$m$	<i>Masa total del producto.</i>	gr
$m_s$	<i>Masa seca del producto.</i>	gr
$k_g$	Coeficiente de transferencia de masa.	W/m °K
$P$	Presión.	N/m <sup>2</sup>
$p_v$	Presión de vapor.	N/m <sup>2</sup>
$h_c$	Coeficiente de transferencia de calor.	W/m <sup>2</sup> K
$T_a$	Temperatura ambiente.	°K
$T_{bh}$	Temperatura de bulbo húmedo.	°K
$C_p$	Calor específico del aire.	J/kg °K
$\dot{m}$	Flujo másico del aire.	kg/s
$m_v$	masa de vapor.	gr vapor
$m_a$	masa de aire.	gr aire
$\omega$	Humedad Absoluta.	%
$p_a$	Presión parcial del vapor de agua.	N/m <sup>2</sup> °K
$M_a$	Peso molecular del agua.	kg/mol
$M_v$	Peso molecular del aire seco.	kg/mol
$V$	Volumen.	$m^3$
$R$	Constante de aire.	8.31 J/mol °K
$T$	Temperatura.	°K

$\varphi$	Humedad Relativa.	%
$m_{sat}$	Masa de vapor saturado.	gr
$p_{sat}$	Presión de vapor saturado.	N/m <sup>2</sup> °K
$H$	Entalpía.	kJ
$\lambda$	Calor latente de vaporización del agua.	J/kg
$t$	Tiempo.	s

## RESUMEN

El presente trabajo, se estudia el proceso de secado solar para la preservación del Chile Jalapeño (*Capsicum annulum*), y se compara con respecto a otras formas de secado, con el objetivo de evaluar su posible aplicación en la zona del estado de Quintana Roo, para beneficio de los productores de la región.

Se realizaron pruebas de secado de Chile Jalapeño con dos variantes en el proceso: el primero con el producto entero y otro realizando un corte longitudinal al producto. El primer proceso se logró reducir el contenido de humedad en base seca a 0.5 gr/gr seco en promedio con un tiempo de 48 horas. En tanto, en el segundo estudio se logró reducir el contenido de humedad en base seca hasta 1 gr/gr seco en promedio; pero el producto final presentó indicios de moho, mal olor y fermentación.

Se determinó que el primer proceso de secado es adecuado para la conservación del Chile Jalapeño y por tanto una opción favorable para los productores, ya que permite lograr una reducción del tiempo de secado con respecto al aire libre, con un costo considerablemente menor que el realizado en las estufas tradicionales, con la ventaja adicional de construir una opción limpia ya que no produce contaminación al medio ambiente.

## INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años el hombre ha aplicado la energía solar en la conservación de sus productos agrícolas por medio de la exposición directa al Sol. Esta primera aplicación del proceso de secado y que actualmente se sigue empleando en diversas comunidades rurales de los países en desarrollo, si bien no es la más adecuada, si es el método de conservación más económico; tiene como principal desventaja la generación de productos con mala calidad debido a las lluvias, así como el ataque de insectos y animales.

En la actualidad se busca mejorar los procesos de secado con el empleo de tecnologías para lograr un producto final con la calidad necesaria para el consumo humano, y que además consuma poca energía. Como ejemplo de la importancia económica del problema del secado a nivel mundial, Franzen estima que más de  $2 \times 10^8$  kJ de energía se consumen solamente en el secado de alimentos cada año y por otro lado Strumillo estima que el 12% de todo el consumo de energía en la industria es empleado en los procesos de secado [1].

El secado solar ha demostrado ser una alternativa para el secado de productos agrícolas, ya que permite reducir los tiempos de secado, a un bajo costo con respecto al secado convencional; y que además se puede utilizar para secar una gran variedad de productos agrícolas, tales como:

- ✓ Frutas (uvas, plátanos)
- ✓ Hortalizas (patatas, cebollas, chile)
- ✓ Granos (arroz, trigo, maíz)

Aunado a lo anterior el secado solar tiene otros beneficios tales como la reducción del consumo de los combustibles fósiles, la disminución de la contaminación por la quema de leña y por ende se evita la tala de árboles, y finalmente permite el secado en el sitio de cosecha.

Sin embargo aún a pesar de los muchos beneficios que representa el secado solar en la actualidad son pocos los países que han adoptado esta opción para el secado de los productos agrícolas.

Un producto importante para México es el chile jalapeño, y si bien no es el principal productor de chile, si es de los países importantes que lo producen. Según datos obtenidos en el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), en el 2002 contaba con 68,000 hectáreas de superficie sembrada de chile verde, con una superficie cosechada de 65,000 hectáreas, con un volumen de producción agrícola de 1,092 miles de toneladas cuyo valor asciende a 3,381 millones de pesos. Y en el estado de Quintana Roo, es Othón P. Blanco el único municipio productor del chile jalapeño, con una superficie sembrada de 2,036 hectáreas, cuya superficie cosechada es de 1,631 hectáreas, representando un volumen de producción total de 12,220, con valor total estimado de 29,505 miles de pesos. [2]. A pesar de estas estadísticas demuestran la importancia de este cultivo para Quintana Roo, en particular el municipio de Othón P. Blanco se siguen empleando los procesos tradicionales de secado al aire libre o en secadores de leña que su gran desventaja es la contaminación que produce.

Es así que analizando el potencial de aplicación del secado solar y en vista de la necesidad de los productores quintanarroenses de obtener mejores ganancias y mejores productos se pretende “*analizar la factibilidad de la aplicación del secado solar para la conservación del chile jalapeño a través del uso de un secador solar indirecto*”.

Para este trabajo se estudiaron dos variantes del proceso de secado, el primero con el chile jalapeño entero y el segundo del chile jalapeño con un corte longitudinal, en donde se sometió al producto a un tiempo promedio de secado de 41 horas y 38 horas respectivamente.

Los parámetros que se cuidaron y analizaron fueron principalmente la temperatura ambiente y temperaturas interiores del secador, humedad relativa interior y exterior, el peso, y la radiación solar. A demás que se atendió los cambios que presentaron durante el proceso (textura, olor y color).

En este trabajo se busca alcanzar los siguientes objetivos:

Objetivo general: Estudiar el proceso de secado del chile jalapeño bajo las condiciones ambientales de Chetumal, Quintana Roo.

Como objetivos específicos se tienen:

1. Obtener el tiempo de secado del chile jalapeño (tiempo de equilibrio de los productos).
2. Evaluar y seguir la evolución de las características físicas del chile jalapeño tales como: Color, textura, humedad y pérdidas de peso, durante el proceso, incluyendo la presencia de microorganismos, como bacterias y mohos.
3. Determinar la interrelación que pueda existir entre los distintos parámetros ambientales.

El presente trabajo de tesis se compone de 5 capítulos y están desarrollados de la siguiente manera:

En el capítulo I se describen los antecedentes del secado solar, tipos y la clasificación de secadores; y además se hace mención a algunos de los trabajos más relevantes sobre secado de productos agrícolas desarrollados en otras partes del mundo.

En el capítulo II se presentan las ecuaciones que gobiernan el proceso de secado, así como también el uso de la carta psicrométrica en el secado.

En el capítulo III se describen los equipos de medición utilizados durante el proceso y características del secador solar utilizado, así como la metodología empleada para el trabajo experimental.

El capítulo IV se analiza los resultados de las pruebas realizadas y la interrelación entre los parámetros climatológicos y de estos hacia el proceso.

Por último el capítulo V se desarrolla las conclusiones y algunas recomendaciones del trabajo.

## CAPITULO I

### 1. ANTECEDENTES

En este capítulo se inicia con la definición de secado, formas de secar un producto y la clasificación de los secadores, posteriormente se describe el proceso de secado solar, sus ventajas y desventajas; para finalizar con una recopilación de información sobre trabajos publicados relacionados con el secado de productos agrícolas.

#### 1.1 SECADO

El secado se define como un proceso de eliminación de la humedad contenida por un producto, debido a la transferencia de calor y masa. La transferencia de calor de los alrededores evapora la humedad de la superficie, en tanto que la humedad contenida en el centro del producto se transporta a la superficie para de ahí ser evaporada, o se evapora internamente y luego es transportada como vapor a la superficie [3].

#### 1.2 CLASIFICACIÓN DE SECADORES

Hay cientos de diseños de secadores disponibles en el mercado, y hacer una clasificación de los mismos es casi imposible. Diversos autores lo han intentado atendiendo a diversos criterios, tales como el tipo de materia prima a secar, el modo en que el material se transporta a través del secador, el mecanismo principal de transferencia de energía, temperatura de secado y tiempo de residencia entre otros factores.

La clasificación más extendida es quizás la que proporcionan Mujumdar y Menon y Mujumdar abarca diferentes criterios que serán importantes al momento de seleccionar un secador (tabla 1). Entre algunos criterios que clasifica esta tabla esta la forma en que se trasfiere la energía térmica al material húmedo (radiación, conducción y convección) [4].

A pesar de existir tantos tipos de secadores disponibles, no cualquiera es adecuado para un producto en particular, y la elección de un secador dependerá siempre principalmente de las características del producto.

La tabla 1 además de ser muy útil para seleccionar un secador, también los es para diseñarlo, cabe señalar que un secador comúnmente puede caer dentro de varios criterios de clasificación, en función del parámetro que se emplee para analizarlo.

Para el presente trabajo son de particular interés los secadores solares, los cuales se pueden clasificar dentro de los secadores de tipo por lotes, con suministro de calor convectivo (indirectos) o radiativo (directos), que operan a presión atmosférica y que emplean como medio secante el aire.

Tabla 1. Clasificación de secadores.

Criterio	Tipo
Modo de operación	-Lotes -Continuo
Suministro de calor	-Convección, conducción, radiación, campos electromagnéticos, combinación de modos de transferencia de calor -Intermitente o continuo -Adiabático o no adiabático
Presión de operación	-Estacionario -En movimiento, agitado, dispersión
Medio de secante (convección)	-Vacío -Presión Atmosférica
Temperatura de secado	-Aire -Vapor sobrecalentado -Gases de combustión
Movimiento relativo entre el medio secante y material a secar	-Abajo del punto de ebullición -Arriba del punto de ebullición -Abajo del punto de congelación
Número de etapas	-Contracorriente -Mismo sentido -Flujo mixto
Tiempo de residencia	-Simple -Multietapas
Tiempo de residencia	-Corto (< 1 minuto) -Medio (1-60 minutos) -Largo (> 60 minutos)

### 1.3 SECADOR SOLAR

Un secador solar es un equipo que a través de uno de sus componentes transforma la energía radiante proveniente del Sol en energía térmica capaz de proporcionar la energía necesaria para evaporar la humedad contenida en un producto [5].

Los secadores solares se pueden clasificar en dos grandes grupos, dependiendo de la forma como se transmite el calor a los productos húmedos, y que son: directos e indirectos.

En los secadores tipo directo la energía radiante incide directamente sobre el material a secar incrementando su temperatura, el secado directo es predominantemente un secado por el mecanismo de transferencia de calor por radiación tal y como se observa en la figura 1.1.



*Figura 1.1. Fotografía de un secador solar directo.*

En los secadores indirectos, la energía radiante calienta una corriente de aire en un calentador solar, la cual es conducida a una cámara en la cual se coloca el material a secar, siendo un secado predominantemente convectivo debido a que predomina la transferencia de calor por convección entre el cuerpo a secar y el ambiente que le rodea. En la figura 1.2, se muestra una fotografía de un secador de este tipo.



*Figura 1.2. Fotografía de un Secador solar indirecto.*

## 1.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SECADORES SOLARES

El Secador solar indirecto presenta varias ventajas con respecto al directo. En primer lugar el control del proceso es más simple (sobre todo en el caso de secadores con circulación forzada de aire). Es fácil de integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido. El tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara no permite la entrada de la radiación solar, este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o deteriorarse por una exposición directa al Sol. Para productos a granel (principalmente granos en silos) si se contempla el secado solar, el sistema a emplear es el de un secador indirecto.

Una desventaja de los secadores indirectos es el hecho de que al separar la función colección de energía solar, el tamaño del equipo y sus costos aumentan. Además de que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita mover mayor flujo de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores directos o mixtos.

## 1.5 EJEMPLOS DE APLICACIONES DE LOS SECADORES SOLARES

A continuación se presentan algunos ejemplos de secadores solares para productos agrícolas, desarrollados y probados con éxito en diversas partes del mundo.

### 1.5.1 Secador solar tipo gabinete.

El secador solar tipo gabinete, mostrado en la figura 1.3 [6] es uno de los más comunes para secar productos agrícolas.

En la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura-UNNE, en Argentina, se utilizó este secador para realizar varios estudios de secado de productos agrícolas (Ajo, ortiga, cebolla, caña de azúcar, orégano y pimienta morrón), entre los estudios realizados con este secador, se analizaron las propiedades organolépticas (olor, color y textura) de los productos secos obteniéndose resultados considerados como de buena calidad.

En este secador, el calor se transmite principalmente por el movimiento del aire caliente (convección); en este tipo de instalación la radiación solar es captada por calentadores de aire y después éste pasa a través del producto, donde eleva la temperatura y se evapora el agua de su superficie. Este mismo aire arrastra la humedad del producto, produciendo su secado. Estos secadores pueden ser de convección natural o forzada.



Figura 1.3. Secador tipo gabinete y detalle del interior de la cámara de secado.

### 1.5.2 Secador solar multipropósito.

Estos secadores desarrollados por el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES), Cuba, para el secado de café pergamino. Los resultados obtenidos en ambos secadores fueron excelentes y con características de producto favorables para su comercialización.

El secador solar multipropósito mostrado en la figura 1.4 está constituido por una estructura de perfiles metálicos en forma de paralelepípedo. Posee doble cubierta de vidrio transparente en la parte superior y en los lados. Los vidrios se fijan con juntas y separadores que garantizan la impermeabilización.

El secador se ubica con su dimensión mayor (largo) en la dirección Norte-Sur. Para el acceso a la cámara de secado el secador tiene en su interior un túnel metálico ennegrecido con una pintura negro mate, el cual capta la radiación solar incidente y la transfiere al aire del interior de la cámara de secado. Dentro del equipo existen charolas de malla metálica sobre las que se coloca la carga. Dentro del secador se efectúa el movimiento del aire forzado por tres ventiladores de tiro axial situados en el techo del túnel metálico. Estos ventiladores garantizan el flujo de aire en la dirección transversal, necesario para lograr el secado uniforme del grano. El equipo dispone de pequeñas ventanas para la salida del aire húmedo y reposición de aire fresco del medio en los laterales de norte y sur [7].



Figura 1.4. Secador solar multipropósito.

### 1.5.3 Secador-invernadero de policarbonato.

En Salta, Argentina se desarrollo un secador-invernadero de policarbonato para secado de tomate. El método utilizado para este trabajo consistió en tres pasos principalmente: El proceso de escaldado en agua, pelado del tomate y el corte en rebanadas de 7 mm de espesor aproximadamente para posteriormente colocarlo en las bandejas. En este mismo secador se utilizó para secar manzana, perejil, ajo, orégano y pimienta.

En la figura 1.5 se muestra este secador. El cual está formado por paredes y techos de policarbonato transparente, de tipo alveolar, sin colector, pues la estructura y su lugar de emplazamiento son suficientes para lograr el efecto de secado. Para facilitar la ventilación, el secador permite el ingreso de aire a través de un registro situado a lo largo del lado este, su circulación a través de las bandejas dentro del secador, y su evacuación a lo largo de otro registro ubicado en la zona del techo. No existe recirculación del aire. Se han instalado ventiladores con calefacción eléctrica para que, en caso de ser necesario, se realice el aporte de calefacción auxiliar, principalmente en días muy fríos de invierno y horario nocturno o al amanecer. La estructura del invernadero consiste en columnas y vigas de madera, con los extremos atornillados al suelo. Las láminas de policarbonato se atornillan también sobre la estructura, dando al exterior el lado con tratamiento anti ultravioleta [8].



Figura 1.5. Secador-invernadero de policarbonato.

### 1.5.4 Secador solar tipo túnel.

El secador solar tipo túnel, como el mostrado en la figura 1.6 se desarrollo buscando obtener productos limpios y con un bajo consumo de energía. Se utilizo originalmente para estudiar el secado de chile ancho, aunque también se ha aplicado para secar chile serrano, jalapeño, pasilla, morita y poblano..

Este secador tiene 10 m de largo por 2.5 m de ancho y 2 m de altura con una cubierta transparente de polietileno. La estructura consta de 11 elementos desarmables de varilla circular de 1.3 cm de diámetro, cada elemento se coloca a intervalos de 1 m. La entrada de aire se realiza por la parte posterior y la salida por tres chimeneas colocadas a lo largo de la parte superior del secador.

El colector solar que precalentará el aire se coloca a la entrada del túnel. Este colector es de manufactura sencilla mide 1.5 m de largo, 0.6 m de ancho y 10 cm de alto es de lámina galvanizada pintada de negro mate en el interior con cubierta y aislamiento externo para evitar las pérdidas de calor. El aire circula a través de este sistema y entra al túnel propulsado por un ventilador de  $\frac{1}{4}$  hp colocado por la parte posterior del colector.

El producto se coloca en charolas con capacidad aproximada de 2.5 kg cada una, son charolas estirables y se pueden colocar hasta diez por columna. El túnel está diseñado para colocar 20 columnas a cada lado dejando un pasillo central [9].



*Figura 1.6. Secador solar tipo túnel.*

#### 1.5.5 Secador solar tipo túnel con paneles fotovoltaicos.

En la universidad de Hohenheim, Alemania se diseño y desarrollo un secador solar tipo túnel para secar chile. Es un secador para pequeñas cantidades y considerado como muy práctico, ya que permite obtener un producto de buena calidad y se puede utilizar para otros productos agrícolas.

Este secador mostrado en la figura 1.7 tiene 18 m de largo y 2 m de ancho, con un área del colector de  $16 \text{ m}^2$  y un área de secado de  $20 \text{ m}^2$ , y cinco ventiladores de 14 W de flujo radial para retirar el aire húmedo. El aire que entra en el colector solar se calienta y posteriormente enviado a los productos por los ventiladores [10].



Figura 1.7. Secador solar tipo túnel con páneles fotovoltaicos.

#### 1.5.6. Secador solar indirecto.

En la universidad de Quintana Roo, campus Chetumal, se diseño y construyo un secador indirecto para madera con las dimensiones en su cámara de 1.20 x 3 x 1.5 m, con un área de captación de 13.5 m<sup>2</sup> [11] figura 1.8. Este mismo secador se empleó para el secado de chile jalapeño. En el capítulo 3 se describe con detalle.



Figura 1.8. Secador indirecto de la Universidad de Quintana Roo.

## CAPITULO II

En este capítulo se describen los conceptos físico-matemáticos que rigen el proceso de secado, cuyo conocimiento es necesario para analizar los fenómenos que ocurren durante el proceso de secado.

Se inicia con la definición de algunos conceptos básicos del proceso de secado y al final se ilustra la importancia del uso de la carta psicométrica en el análisis de estos procesos.

### 2. PROCESO DE SECADO

El secado o deshidratación consiste en la extracción del agua contenida en los alimentos por medios físicos hasta que el nivel de agua sea adecuada para permitir su conservación por largos periodos.

El secado es un proceso en donde ocurren simultáneamente una transferencia de masa y calor debido a los gradientes de temperatura y concentración entre el medio secante y el producto tal y como se ejemplifica en el esquema de la figura 2.1. La velocidad de secado está directamente influenciada por el gradiente de temperatura o concentración existente, el área de transferencia y los coeficientes de transferencia de masa y calor.

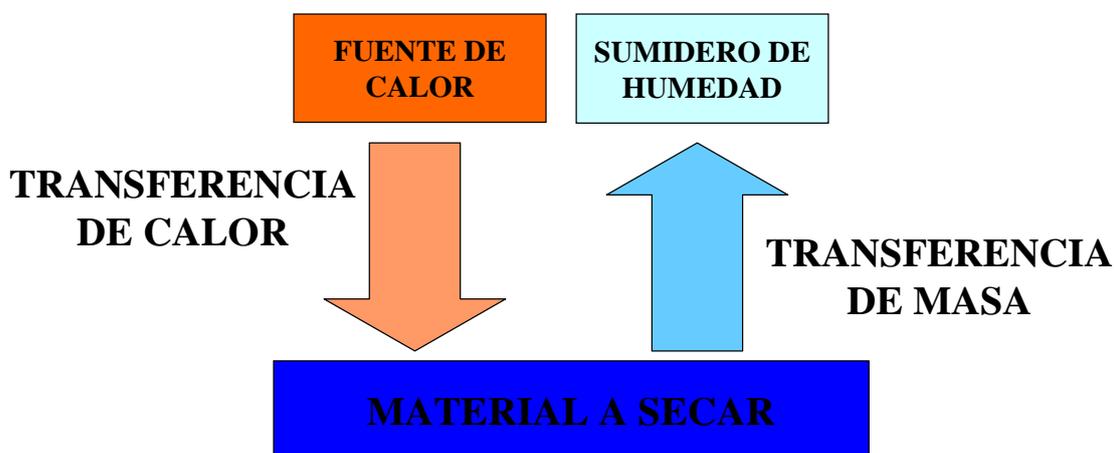


Figura 2.1. Esquema de la transferencia de masa y calor en el secado de un producto.

Durante el secado, un fluido que puede ser el aire cede parte de su energía al producto por secar, proporcionando la eliminación de humedad en éste. En la figura 2.2 se ilustra este comportamiento.

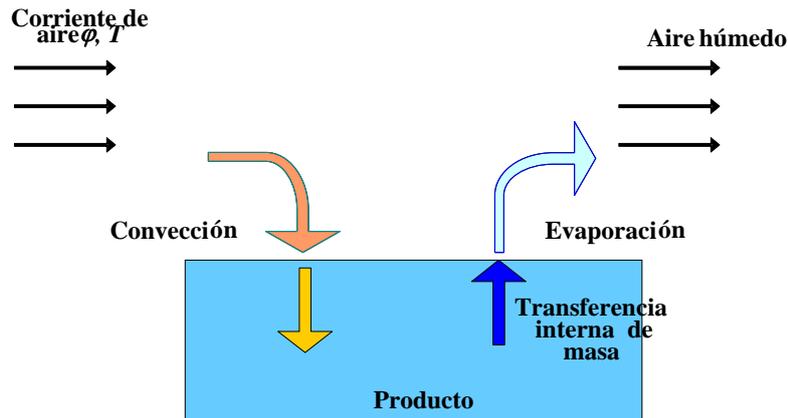


Figura 2.2. Comportamiento general del secado bajo condiciones externas constantes.

## 2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL PROCESO DE SECADO

### 2.1.1. Contenido de humedad de un producto

El contenido de humedad, es decir la cantidad de agua evaporable existente en un producto, se expresa en relación a su masa total o a su masa seca (esto sin contar la masa de agua evaporable que contiene) [12].

Se conocen dos tipos de contenido de humedad: en base seca y en base húmeda, las cuales se expresan de la siguiente forma:

#### ✚ Contenido de Humedad en Base Húmeda (bh), $M$ :

$$M = \frac{m - m_s}{m} \quad (2.1)$$

#### ✚ Contenido de Humedad en Base Seca, $X$ :

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2.2)$$

Se puede transformar el contenido de humedad en base seca a base húmeda o viceversa a través de las siguientes relaciones:

$$X = \frac{M}{1 - M} \quad (2.3)$$

$$M = \frac{X}{1 + X} \quad (2.4)$$

La humedad asociada a un producto puede estar presente como:

- ✚ **Humedad ligada:** Líquido que se encuentra fuertemente unido al producto. (Retención en capilares diminutos, adsorción química o física) y puede eliminarse sólo calentando el producto hasta altas temperaturas o como resultado de una reacción química. Esta humedad generalmente no se elimina en un proceso de secado convencional.
- ✚ **Humedad no ligada:** Líquido que se encuentra en espacios vacíos y que no está unida al producto.
- ✚ **Humedad libre:** Líquido que se puede separar a una temperatura y humedad dadas. Puede incluir las dos anteriores.

La figura 2.3 muestra los tipos de humedades del producto previamente descritas.

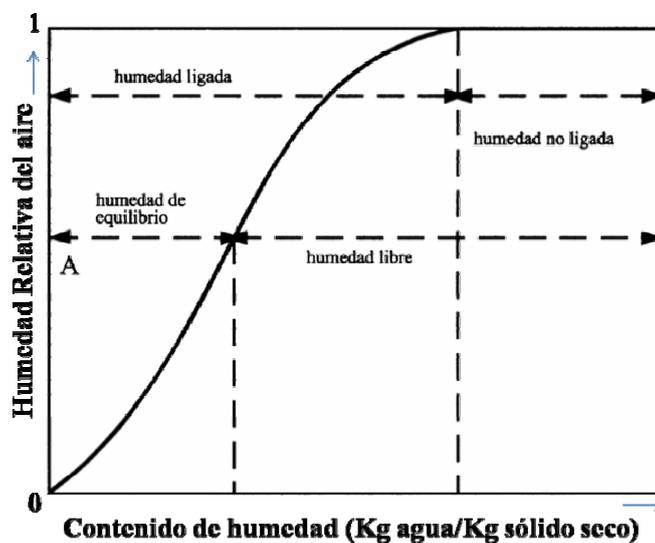


Figura 2.3. Tipos de humedades [13].

Dependiendo del producto que se trate, las humedades ligada, no ligada y libre afectaran las características físicas de un producto tales como: textura, color, olor y sabor entre otros.

**La humedad de equilibrio** es la humedad del producto cuando su presión de vapor se iguala a la presión de vapor del aire (ambiente). Es decir, humedad del producto cuando está en equilibrio con el aire (ambiente)

## 2.2 ETAPAS DEL PROCESO DE SECADO.

Diversos investigadores [14] coinciden en que la pérdida de humedad de un producto, se realiza en etapas bien definidas, las cuales normalmente se denominan como: periodo de atemperado, periodo de régimen de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente, tal y como se observa en la figura 2.4.

- ✓ Etapa A - B Período de atemperado.
- ✓ Etapa B - C Período de velocidad constante.
- ✓ Etapa C - D Secado decreciente.

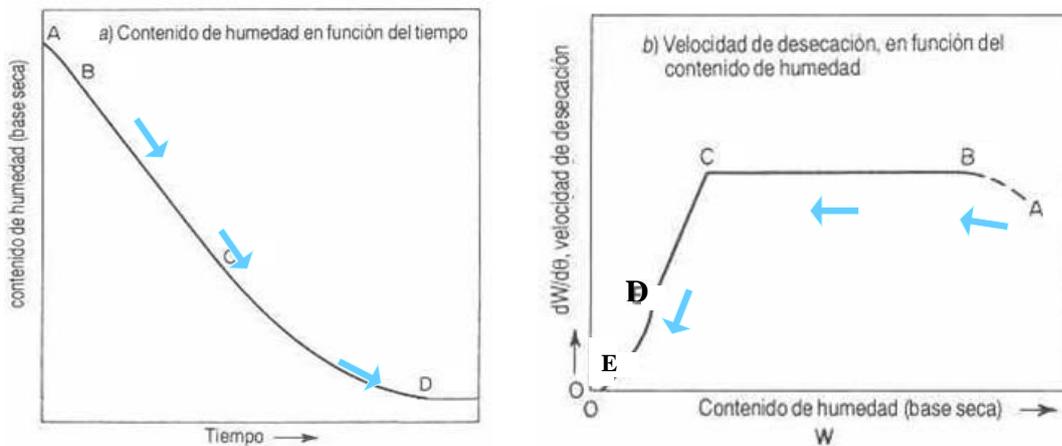


Figura 2.4. Curvas de velocidad características [15].

### 2.2.1 Período de atemperado

En esta etapa el producto a secar alcanza la temperatura de bulbo húmedo de la corriente de aire de secado, regularmente este período es corto dependiendo del tipo de producto que se trate por lo que puede no ser tan importante (figura 2.5).

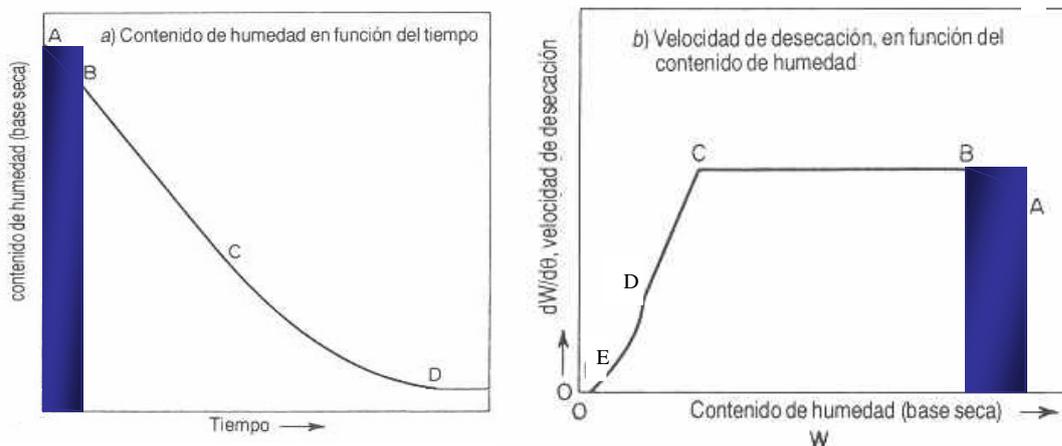


Figura 2.5. Período de atemperado (Etapa A-B) [16].

2.2.2 Periodo de velocidad constante

La curva de la figura 2.6 es recta entre los puntos B y C, por lo que la pendiente y la velocidad son constantes durante este período. A esta zona se le conoce como región de velocidad de secado constante. Se lleva a cabo a temperatura constante, esto se debe a que la superficie del producto se mantiene a condiciones de saturación y, por lo tanto, la presión de vapor del agua en el alimento es igual a la presión de vapor del agua pura a la temperatura de bulbo húmedo. Este período está afectado por el área expuesta al secado, la diferencia de humedad entre la corriente de aire y la superficie del producto, el coeficiente de transferencia de masa y calor en la interfase sólido-gas o a la transferencia interna de humedad y de las condiciones del medio de secado (Figura 2.6).

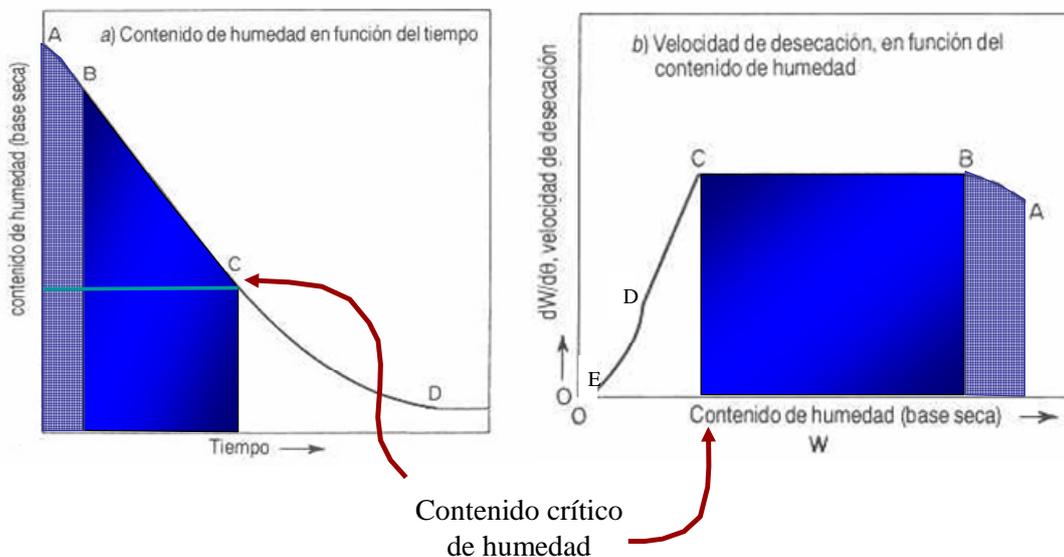


Figura 2.6. Periodo de velocidad constante (Etapa B-C) [17].

El punto crítico del producto (figura 2.6) es un punto límite para el cual el volumen de un líquido es igual al de una masa igual de vapor o, dicho de otro modo, en el cual las densidades del líquido y del vapor son iguales. Si se miden las densidades del líquido y del vapor en función de la temperatura y se representan los resultados, puede determinarse la temperatura crítica a partir del punto de intersección de ambas curvas [18].

Después de pasar este punto el producto empieza una etapa de cambios muy significativos como son: la velocidad de secado tiende a disminuir y el color y textura aumentan.

2.2.2.1. Modelos que definen el período de velocidad constante.

Cuando se seca un producto existen dos procesos fundamentales y simultáneos, conocidos como transferencia de masa y calor. En el primero el producto que debe secarse se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el producto a través de la conductividad del propio producto. En el segundo el secado, el calor necesario para la evaporación del líquido

se transmite por un agente gaseoso (aire) o por un vapor que pasa por encima del producto o lo atraviesa.

Las ecuaciones que determinan los procesos se presentan a continuación.

- Transferencia de masa.

$$\frac{dm}{dt} = Ak_g(P - p_v) \quad (2.5)$$

- Transferencia de calor por convección.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{Ah_c(T_a - T_{bh})}{\lambda} \quad (2.6)$$

Para determinar la velocidad de secado durante el período constante expresada en términos de la transferencia de calor, puede escribirse, que el calor sensible que proporciona el aire para la evaporación de cierta cantidad de agua del producto, es igual al flujo de calor entre la superficie a secar a la temperatura del bulbo húmedo y la corriente de aire a la temperatura de bulbo seco, lo cual se expresa como sigue (figura 2.7):

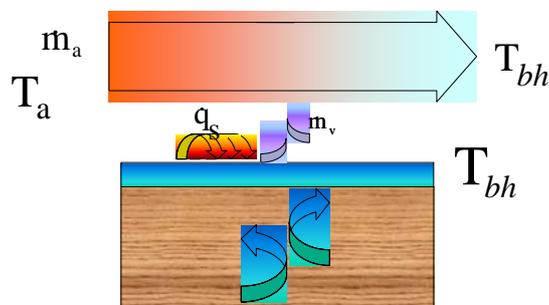


Figura 2.7. Transferencias de calor y masa.

Calor sensible que Proporciona el aire = Flujo de calor entre superficie y corriente de aire

$$q_s = \dot{m}_a C_p (T_a - T_{bh}) = h_c A (\bar{T}_a - T_{bh}) \quad (2.7)$$

donde  $m_a$  es el flujo másico del aire. Ahora si se tiene que el calor latente de vaporización del agua, ecuación 2.8, es igual al calor total transferido  $q_s$  (figura 2.8) evaluado en la ecuación 2.7 podemos describir:

$$\lambda = C_p(T_a - T_{bh}) \quad (2.8)$$

$$q_L = m\lambda = h_c A(T_a - T_{bh}) \quad (2.9)$$

Por lo tanto,

$$m_a = \frac{h_c A}{\lambda}(T_a - T_{bh}) \quad (2.10)$$

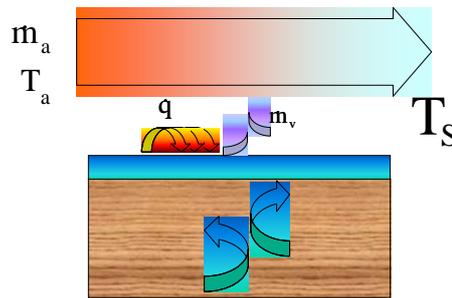


Figura 2.8. Esquema de comportamiento del calor latente y calor total.

donde,  $m$  es la masa de agua evaporable por unidad de tiempo y se expresa como en la ecuación 2.5,  $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$

### 2.2.3. Periodo de velocidad decreciente

En el punto C de la figura 2.9, la velocidad de secado comienza a disminuir durante el período de velocidad decreciente, que se conoce como el período de secado de superficie no saturada, hasta llegar al punto D.

Finalmente, en el punto D, la velocidad de secado disminuye, hasta que llegar al punto, donde ya no es apreciable porque el líquido ya se evaporó totalmente, es una etapa conocida como humedad de equilibrio (figura 2.9), y el proceso se detiene.

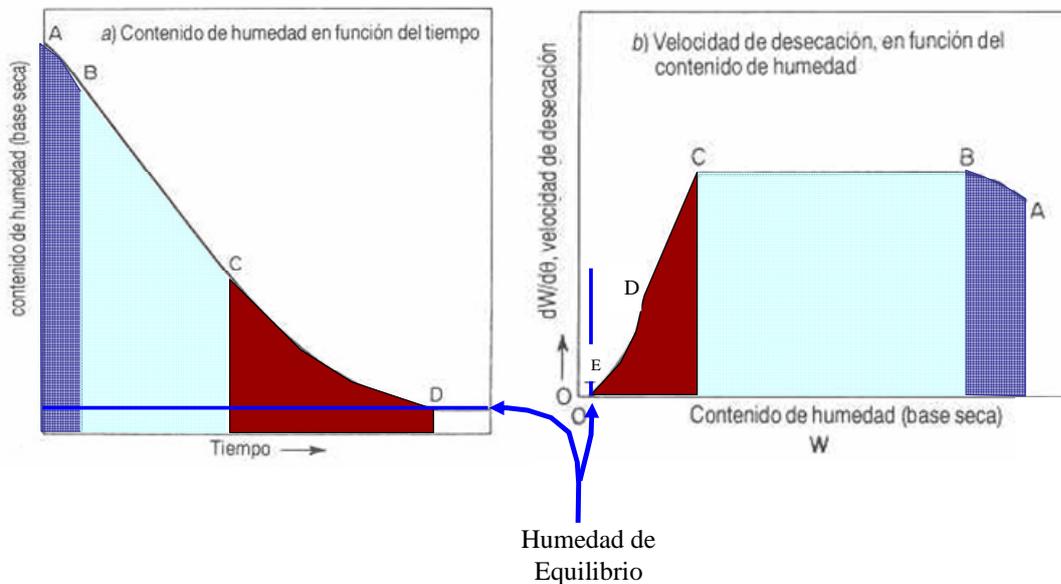


Figura 2.9. Periodo decreciente (etapa C-D) [19].

### 2.2.3.1. Mecanismos que intervienen en la pérdida de humedad

Existen diversas teorías para explicar los mecanismos que intervienen durante el proceso de secado, en general existen dos teorías principales que buscan explicar el comportamiento de la humedad durante el secado y que son:

- DIFUSIÓN
- CAPILARIDAD.

## 2.3 PSICROMETRIA DEL AIRE

### 2.3.1 Aire seco y aire húmedo

El aire es una mezcla de  $N_2$ ,  $O_2$  y otros gases. Normalmente el aire en la atmósfera contiene cierta cantidad de vapor de agua. Es conveniente tratar al aire como una mezcla de vapor de agua y aire seco. A la mezcla de gases que incluye el vapor de agua se le conoce como Aire Atmosférico. Aquel aire que no contiene vapor de agua se denomina Aire Seco.

**La humedad Absoluta:** Es la relación entre la masa de vapor presente en la mezcla por cada unidad de masa de gas:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (2.11)$$

Y empleando la Ley de los gases ideales y la Ley de Dalton de presiones parciales se tienen:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v VM_v / RT}{p_a VM_a / RT} = \frac{p_v M_v}{p_a M_a} = \frac{p_v}{P - p_v} \frac{M_v}{M_a} \quad (2.12)$$

**La humedad relativa:** Es la relación entre la masa de vapor presente en la mezcla entre la cantidad máxima de vapor que el gas puede contener a la misma temperatura:

$$\phi = \frac{m_v(\text{en la mezcla actual a } T, P)}{m_{sat}(\text{en la mezcla saturada a } T, P)} \quad (2.13)$$

$$\phi = \frac{m_v}{m_{sat}} = \frac{p_v VM_v / RT}{p_{sat} VM_v / RT} = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (2.14)$$

La humedad relativa es función de la temperatura a la cual se encuentre la mezcla y de la masa de vapor disponible y existen ciertos casos particulares

En el punto de saturación (**Humedad Relativa de Saturación**)  $p_v = p_{sat}$ .

$$\phi = 1$$

Cuando no existe vapor en el aire (aire seco).

$$\phi = 0$$

El primer caso corresponde para el punto en el que se encuentra la máxima cantidad de vapor en la mezcla a una temperatura dada, conocido como *Humedad Relativa de Saturación*. En este punto se dice que el aire está saturado.

Las cantidades anteriores pueden también expresarse en términos de variables más medibles mediante diferentes funciones: Utilizado la ecuación 2.14 puede obtenerse la ecuación 2.16.

$$p_v = \phi P_{sat} \quad (2.15)$$

$$\omega = \frac{p_v}{P - p_v} \frac{M_v}{M_a} = \frac{\phi P_{sat}}{P - \phi P_{sat}} \frac{M_v}{M_a} \quad (2.16)$$

O despejando  $\varphi$ , se obtiene la ecuación

$$m_v = \omega m_a \quad (2.17)$$

$$\varphi = \frac{\omega P}{\left(\frac{M_v}{M_a} + \omega\right) P_{sat}} \quad (2.18)$$

Para el caso particular de la mezcla de vapor de agua-aire

$$\frac{M_v}{M_a} = 0.622 \quad (2.19)$$

Las cantidades están referidas por unidad de aire seco.

## 2.4. LA PRESIÓN DE SATURACIÓN

El cálculo de la presión de saturación es posible realizarlo de distintas formas:

- ❖ Tablas de vapor
- ❖ Por correlaciones

En el tratamiento clásico, se emplea la ecuación de Clausius-Claperyron [20], ecuación 2.20, la cual proporciona buenos resultados a temperaturas menores de 50°C en concordancia con el modelado considerando al vapor de agua como un gas ideal.

$$P_{sat} = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right) \quad (2.20)$$

Para el agua:

$$P_{sat} = \exp\left(18.811 - \frac{5261.87}{T}\right) \quad (2.21)$$

Con el fin de extender un poco más el cálculo de las propiedades de la mezcla aire-vapor de agua, se emplea la ecuación de Antonie [21], ecuación 2.22 más exacta para rangos de temperatura que cubriría la mayoría de las aplicaciones donde la psicrometría juega un papel importante [22], donde se emplea la presión crítica,  $p_c$ :

$$P_{sat} = p_c \exp\left(A - \frac{B}{C+T}\right) \quad (2.22)$$

## 2.5. PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA MEZCLA

### 2.5.1. Entalpía

La mezcla de aire seco y vapor se ha considerado una mezcla de gases ideales. Sus propiedades pueden estimarse con la misma base. Dado el balance de materia:

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (2.23)$$

Y con referencia al aire seco resulta:

$$h = \frac{H}{m_a} = \frac{m_a}{m_a} h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + \omega h_v \quad (2.24)$$

Es importante notar que la entalpía en este tratamiento se expresa *por unidad de aire seco*. Las entalpías específicas del vapor y del aire pueden calcularse de varias formas. Una de ellas es emplear los valores reportados en tablas (si es que existen). Lo más común es emplear las funciones clásicas vistas en Termodinámica, considerando la ley de los gases ideales y definiendo un estado de referencia  $h_0 = h(T_0, P_0)$ , y se utiliza la ecuación:

$$h_1 - h_0 = \int_{T_0}^{T_1} C_p dT \quad (2.25)$$

Donde el  $C_p$  para el aire se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_p = 28.11 + 0.1923 \times 10^{-2} T + 0.4802 \times 10^{-5} T^2 - 1.966 \times 10^{-9} T^3 \quad (2.26)$$

O aproximadamente  $C_{p,a} = 1.003 \frac{kJ}{kg^\circ K}$

El  $C_p$  para el vapor de agua puede estimarse con la ecuación 2.27.

$$C_p = 32.24 + 0.1923 \times 10^{-2} T + 1.055 \times 10^{-5} T^2 - 3.595 \times 10^{-9} T^3 \quad (2.27)$$

O aproximadamente  $C_{p,v} = 1.872 \frac{kJ}{kg^\circ K}$

Debe notarse que para el caso del vapor de agua, la entalpía de referencia normalmente es la del agua líquida a 20°C, por lo que debe considerarse el calor sensible desde esa temperatura hasta la temperatura a la cual se da la vaporización y la entalpía de vaporización a esa temperatura. La última ecuación será empleada para

calcular el cambio de entalpía del vapor desde la temperatura de vaporización hasta la temperatura deseada, es decir, la ecuación 2.28.

$$h_1 - h_0 = \int_{T_0}^{T_{vap}} C_{p,w} dT + \lambda_{T_{vap}} + \int_{T_{vap}}^{T_1} C_{p,v} dT \quad (2.28)$$

Donde para el agua líquida, el  $C_p$  se calcula de la siguiente manera:

$$C_{p,w} = 10.171 - 0.5157 \times 10^{-2} T + 1.459 \times 10^{-4} T^2 - 1.352 \times 10^{-7} T^3 \quad (2.29)$$

La entalpía de vaporización es una función de la temperatura y puede estimarse con esta ecuación:

$$\lambda_{vap} = 2501.8 - 2.4322T \quad (2.30)$$

O aproximadamente  $\lambda_{vap} = 2501.3 \frac{kJ}{kg}$

## 2.6. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

El diagrama psicrométrico es una forma muy práctica y sencilla de obtener las propiedades de una mezcla de gas y vapor. En él se grafican varias de estas propiedades siendo función de la temperatura, la masa de vapor y de la presión.

### 2.6.1. Línea de saturación

La ecuación 2.12 de la humedad relativa, puede ser utilizada para graficar la línea que representa el punto de saturación, donde  $\phi = 1$  por lo tanto  $p_v = P_{sat}$ .

$$\omega(T) = 0.622 \frac{\phi P_{sat}(T)}{P - \phi P_{sat}(T)} \quad (2.31)$$

Al graficar  $\omega$  versus  $T$  se obtendrá la línea que representa la máxima masa de vapor que puede estar mezclada con el gas sin que exista condensación. Esta línea representa el vapor de  $\phi = 1$ . Para otros valores (entre 0 y 1), representa el porcentaje de saturación relativa:

$$\omega(T, \phi) = 0.622 \frac{\phi P_{sat}(T)}{P - \phi P_{sat}(T)} \quad (2.32)$$

Tabla 2. Datos para la construcción del diagrama psicrométrico.

Temperatura °C	Presión de Saturación (kPa)	Humedad Absoluta $\omega$ (kg vapor/kg aire seco)			
		$\phi = 1$	$\phi = 0.8$	$\phi = 0.6$	$\phi = 0.4$
0	0.6359	0.0039	0.0031	0.0024	0.0016
10	1.2557	0.0078	0.0062	0.0047	0.0031
20	2.3669	0.0149	0.0118	0.0088	0.0059
30	4.2789	0.0274	0.0218	0.0162	0.0107
40	7.4482	0.0494	0.0389	0.0287	0.0188
50	12.5277	0.0878	0.0683	0.0499	0.0324
60	20.4238	0.1571	0.1196	0.0856	0.0546

En la Tabla 2 se muestran unos datos generados con las ecuaciones anteriores para una presión de 101.3 kPa (1 atm).

En la figura 2.10 se muestra el diagrama generado con los datos anteriores.

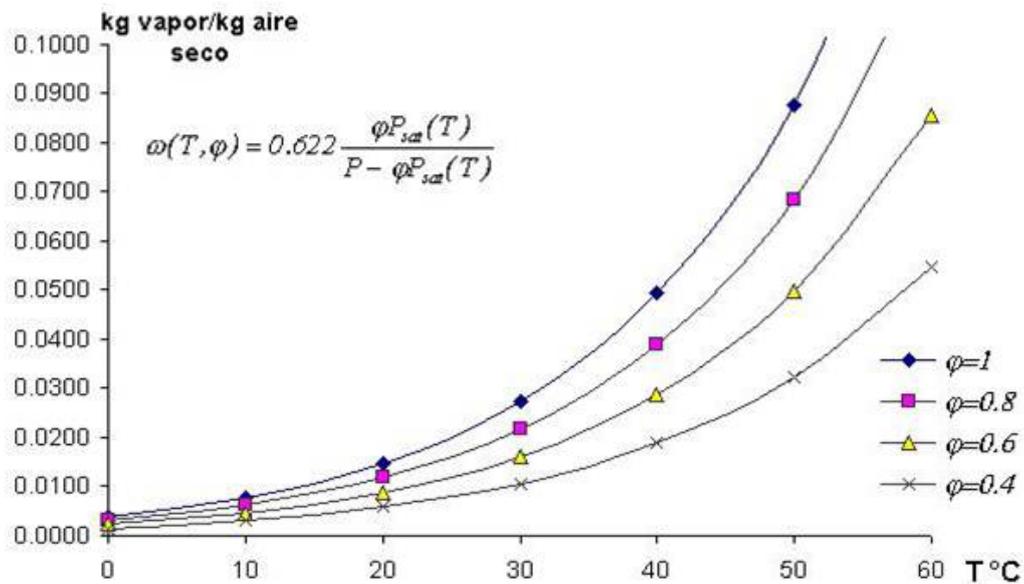


Figura 2.10. Diagrama generado con la ecuación anterior.

2.6.2. Carta Psicrométrica.

La carta psicrométrica es la forma más sencilla de obtener las características termodinámicas del aire. La relación entre la temperaturas de bulbo seco, bulbo húmedo y de puntos de condensación, humedad relativa, volumen específico, entalpia, y contenido de humedad de aire están todas agrupadas en un diagrama, el cual normalmente se basa para la presión atmosférica estándar de  $1.013 \times 10^5$  Pa.

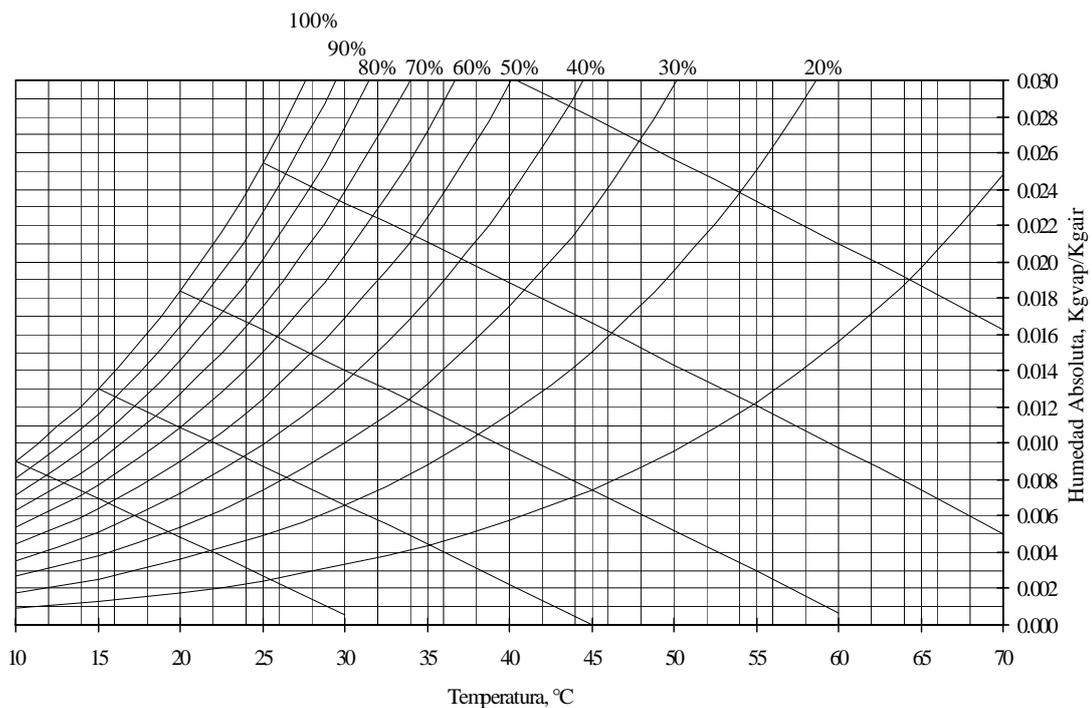


Figura 2.11. Diagrama Psicrométrico.

La carta psicrométrica (figura 2.11.), permite la obtención mediante lectura directa de la mayoría de las propiedades de las mezclas aire-vapor de agua que son necesarias en los cálculos a realizar en el análisis de los procesos de secado, ya que en él se pueden representar los procesos de calentamiento del aire y conocer la cantidad de energía requerida para elevar la temperatura de una masa dada de aire.

## CAPITULO III

En este capítulo se describe la metodología y equipos utilizados para el estudio del proceso de secado del chile jalapeño.

### 3.0. MATERIAL, EQUIPOS Y METODOLOGÍA

#### 3.1. MATERIAL Y EQUIPOS

Las pruebas de secado se realizaron en el Parque eólico-solar de la Universidad de Quintana, lugar donde está instalado el secador solar.

La materia prima utilizada para el estudio es: Chile Jalapeño (*Capsicum annuum* L.), para cada prueba se utilizaron 4 kg de producto.

**Los equipos empleados fueron:** 2 Termohigrometros (figura 3.1), 1 Piranómetro (figura 3.2), Monitor de termopares (figura 3.3), 1 Balanza (Figura 3.4), 8 Termopares tipo K, Termómetro de bulbo, anemómetro y el Secador Solar Indirecto.



Figura 3.1. Termohigrometros.



Figura 3.2. Piranómetro.



Figura 3.3. Monitor de termopares.



Figura 3.4. Balanza

A continuación se mencionaron algunas características constructivas y del funcionamiento del secador solar indirecto empleado en este trabajo.

#### 3.1.1. Secador Solar

El secador solar (figura 3.5) tiene las siguientes dimensiones: La cámara de secado tiene de ancho 1.20 m, 3 m de longitud y 1.5 m de altura, el piso se construyó con un firme en base a cemento y las paredes están forradas con cimbraplay de 5 mm.

En la estructura del secador se realizó en perfil PTR para que sea capaz de soportar el peso del colector y además para desmontarse en caso de una eventualidad, tal como un huracán.

Para el colector solar se empleo cimbraplay de 5 mm como base, lámina galvanizada con un recubrimiento de pintura negra mate, y una cubierta de vidrio, cuyas dimensiones son: 3 x 4.5 m.

En el colector se dejó un espacio de 10 cm entre la base del colector y la placa de lámina galvanizada y de 2.5 cm entre la placa y la cubierta de vidrio, además cuenta con dos ventiladores de 1/22 hp que proporcionan un flujo de aire de 3400 m<sup>3</sup>/hr, a una velocidad de aproximadamente 1 m/s dentro de la cámara de secado.



Figura 3.5. Secador solar tipo indirecto.

En su funcionamiento el secador extrae el aire caliente que se genera en el colector, con la ayuda de dos ventiladores para introducirlo a la cámara de secado, de donde se dirige de manera paralela con respecto a las charolas donde se encuentra el producto (chile jalapeño) colocadas en el interior de la cámara, forzándolo a pasar a través de ellas.

Con las ventilas del secador se puede controlar la circulación del aire en el interior de la cámara; cuando se mantienen cerradas existe un recirculación interior debido a que el aire caliente pasa del colector hacia el chile jalapeño y del chile jalapeño hacia el colector calentándose nuevamente (figura 3.6), pero si se mantienen abiertas, el aire caliente pasará del colector al chile jalapeño y después saldrá por las ventilas, inyectando así aire del medio ambiente hacia el colector (figura 3.7).

Cabe destacar que como en este proceso se necesitaba mayor temperatura y baja humedad interior se optó por cerrar la ventilas durante todo el proceso.

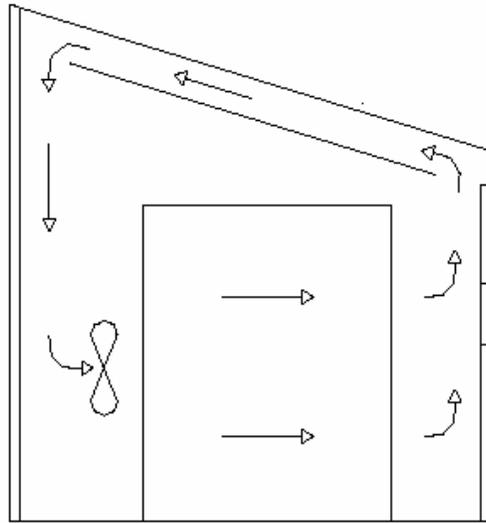


Figura 3.6. Funcionamiento del secador con las ventilas cerradas, para la recirculación del aire.

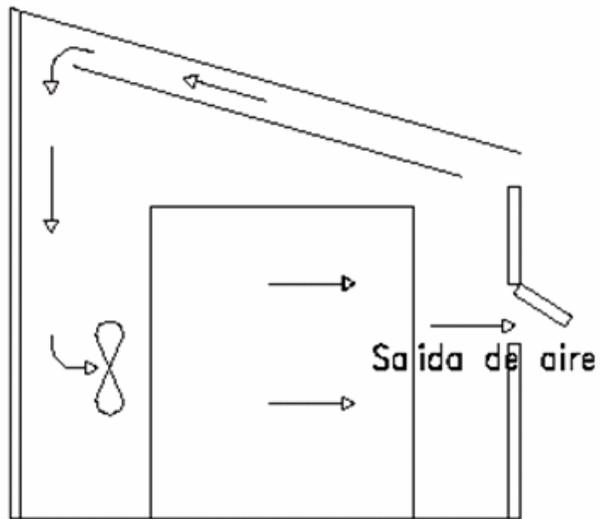


Figura 3.7. Funcionamiento del secador con las ventilas abiertas para la circulación del aire.

### 3.2. METODOLOGÍA

Antes de realizar el proceso de secado solar, se realizó un estudio experimental en el laboratorio de Química la Universidad de Quintana Roo con el objetivo de obtener la masa seca ( $m_s$ ) del chile jalapeño utilizando un horno eléctrico.

A continuación se detalla la metodología utilizada para este experimento:

#### 3.2.1. Secado en horno.

**1. Preparación de horno y balanza:** La etapa experimental se inicio en encender y poner el horno eléctrico a una temperatura  $110^{\circ}\text{C}$  y luego se calibró la balanza.

**2. Selección de muestras:** Una vez preparados los equipos necesarios para el experimento, se seleccionaron 5 muestras de chile jalapeño para su análisis.

**3. Lavado de las muestras:** Se lavó el producto para eliminar las suciedades y cualquier otra contaminación, este el paso primordial para cualquier proceso de secado. Generalmente se usa agua potabilizada lo más pura posible para tener certeza de que el producto tenga la calidad que se necesita.

**4. Pesado de las muestras:** Se pesaron las muestras antes de colocarlas dentro del horno eléctrico, posteriormente se cierra el horno y se cada 15 minutos se extraen algunas muestras para pesarlas, este paso se realizó con mucho cuidado para evitar una quemadura, inclusive se utilizaron guantes. Se continuó este proceso hasta que no se detectan variaciones en el peso, lo cual significa que se ha obtenido la masa seca (figura 3.8) que será útil para determinar la pérdida de contenido de humedad del chile en el proceso de secado solar.



Figura 3.8. Muestras finales del chile jalapeño.

#### 3.2.2. Proceso de secado en el secador solar indirecto.

Una vez obtenida la masa seca ( $m_s$ ) del chile jalapeño se inicio con el proceso de secado solar en el secador solar indirecto.

Para realizar este proceso, se siguió la metodología descrita a continuación.

**1. Construcción y colocación de charolas:** El material utilizado para la construcción de las charolas fueron: madera, clavos y malla galvanizada, con las siguientes dimensiones de 0.80 m. de altura, 1 m. de ancho y 1.20 m. de largo. Estas dimensiones fueron diseñadas en base a estudios previos en la cámara de secado, en donde se midió la altura de la salida del aire y con un anemómetro se evaluó la velocidades máximas y la distribución del aire caliente de los ventiladores en la cámara de secado, para así aprovechar al máximo el flujo al momento de colocar las charolas en la cámara de secado.

**2. Calibración de equipos:** Para obtener resultados correctos se realizo la calibración de todos los equipos involucrados en la medición de los parámetros.

**3. Instalación de equipos de medición:** En la cámara de secado se colocaron 6 termopares tipo K en puntos estratégicos, los cuales fueron fijados a las charolas con cinta metálica para asegurar que no se movieran de su posición. Se ubicaron 4 en la parte alta de la charola y 2 en la parte baja (figura 3.9) y un termohigrometro para el registro de humedad relativa interior de la cámara. Para el caso de las condiciones del ambiente se colocaron un piranómetro, este equipo monitoreaba la irradiancia solar, un termohigrometro para medir la humedad relativa del medio ambiente, un termopar para medir la temperatura ambiente. Todos los termopares se conectaron a un monitor para la lectura de las temperaturas interior y del ambiente.

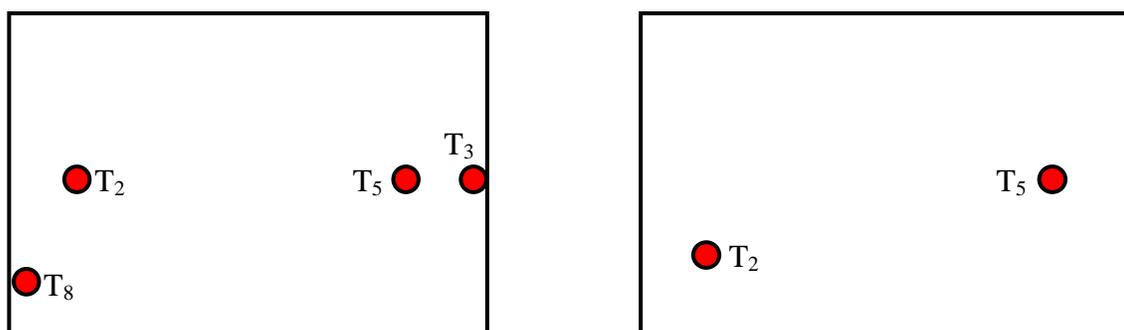


Figura 3.9. Posición de los termopares en la cámara de secado.

Se utilizo una balanza con un margen de error de 0.001 gr. para pesar las muestras, de tal forma que se puede ir comprobando su pérdida de peso.

**4. Selección de las muestras:** Para la prueba se emplearon 4 kg de chile jalapeño, de las cuales se seleccionaron cuatro al azar. Estas muestras se usan para determinar la masa inicial y para llevar el control diario de la pérdida de la masa; además de analizar los cambios que presentan durante el proceso de secado.

**5. Lavado de las muestras:** Los productos se lavaron con agua potable para eliminar las suciedades y otros contaminantes.

**6. Identificación de las muestras:** Las muestras seleccionadas se marcaron como M1, M2, M3 y M4 respectivamente para fines de análisis (figura 3.10).



Figura 3.10. Marcación de las muestras.

**7. Pesado de las muestras iniciales:** En esta etapa las muestras son pesadas con una balanza antes de encender el secador solar para conocer las masas iniciales; al mismo tiempo se analiza condiciones de color y textura de las mismas.

**8. Colocación de las muestras en la cámara:** Una vez concluida la toma de valores iniciales de las muestras e inspeccionada visiblemente cada una de ellas para registrar las condiciones en las que se encuentran; se procede a colocar los 4 kg. de chile jalapeño en las charolas tal como se muestra en la figura 3.11. Las muestras M1 y M3 fueron colocadas en la charola de arriba y las otras dos M3 y M4 se colocaron en la charola de abajo.



Figura 3.11. Colocación del producto.

Nota: Todas las muestras se colocaron cerca de las ventilas para evitar abrir la puerta principal al momento de sacar las muestras para el pesado y así también evitar la pérdida de calor y la introducción de contaminantes.

**9. Secado:** El proceso de secado inicia con el encendido de los dos ventiladores y de los equipos de medición. El proceso se iniciaba a las 8:00 a.m. y finalizaba a las 5:00 p.m durante 5 días.

**10. Medición de parámetros:** Todos los parámetros (irradiancia solar, temperatura interior y exterior, humedad relativa interior y exterior) fueron medidos cada 20 minutos excepto la masa de la muestra que se realizó cada 2 horas durante el proceso de secado.

El contenido de humedad en base seca del producto se determino por medio de la ecuación 2.2 del capítulo II.

**11. Análisis de textura y color de las muestras:** En esta parte las muestras son analizadas visualmente para registrar algún cambio respecto a sus condiciones iniciales, efectuándose al momento de sacar las muestras para su pesado.

**12. Captura de datos en la PC:** Al término de cada día de prueba los valores son capturados para analizar en comportamiento.

**13. Graficar valores:** Finalmente se obtienen las graficas por medio de una hoja de calculo (Programa Excel).

Por último, una prueba adicional se realizo en el secador solar con una variante de hacerle un corte transversal longitudinal al chile.

Durante todo el proceso de secado de las dos pruebas se observaron los cambios físicos que presentaban las muestras con el fin de determinar cuál de las dos pruebas presenta mejores condiciones finales.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en el proceso de secado del Chile Jalapeño con las dos variantes de: chile entero y con un corte longitudinal. Las pruebas se realizaron con ocho horas de exposición al ambiente, iniciando cada prueba a las 8:00 a.m. y concluyendo a las 5:00 p.m., excepto cuando las condiciones climatológicas fueron adversas debido a la presencia de nublados, en dichos casos el tiempo de las pruebas se redujo.

Durante las pruebas realizadas del proceso de secado del chile jalapeño se analizaron las condiciones de temperatura y humedad relativa exterior e interior en la cámara del secador solar, así como la irradiancia solar, cambios de textura y la pérdida de contenido de humedad del producto.

Adicionalmente se analiza un comparativo de los perfiles de comportamiento de tres resultados de procesos de secado: Secado de chile jalapeño entero, tradicional y al intemperie.

A continuación se describe con más detalle los resultados obtenidos con sus respectivas curvas características de cada proceso.

#### 4.1. PRUEBA CON CHILE JALAPEÑO ENTERO

##### 4.1.1. Temperaturas e irradiancia solar.

En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se aprecian los perfiles de las temperaturas interiores obtenidas con los termopares instalados dentro de la cámara de secado durante los cinco días de prueba y la temperatura ambiente e irradiancia solar. Solamente se muestran variables del termopar 4, 7, 8 respectivamente, ya que el resto presenta comportamientos semejantes.

Los efectos de la irradiancia solar registradas durante el proceso presentaron las mismas tendencias con respecto a las temperaturas, esto quiere decir, que al aumentar la irradiancia solar las temperaturas en la cámara de secado tienden a aumentar significativamente, tal y como se observa en las figuras 4.1, 4.2 y 4.3.

La irradiancia solar máxima registrada durante los días de prueba fue de  $1,057 \text{ W/m}^2$  con una temperatura de  $59 \text{ }^\circ\text{C}$  en la cámara, la cual es suficiente para producir una velocidad de secado adecuada ya que no daña al producto; en tanto que la irradiación mínima registrada durante este periodo fue de  $96 \text{ W/m}^2$  con una temperatura de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  en la cámara de secado, esta última generalmente se registra en cada inicio de prueba.

La temperatura de la cámara de secado e irradiancia solar máximas se registraron en el intervalo de 12:00 y a las 15:00 horas.

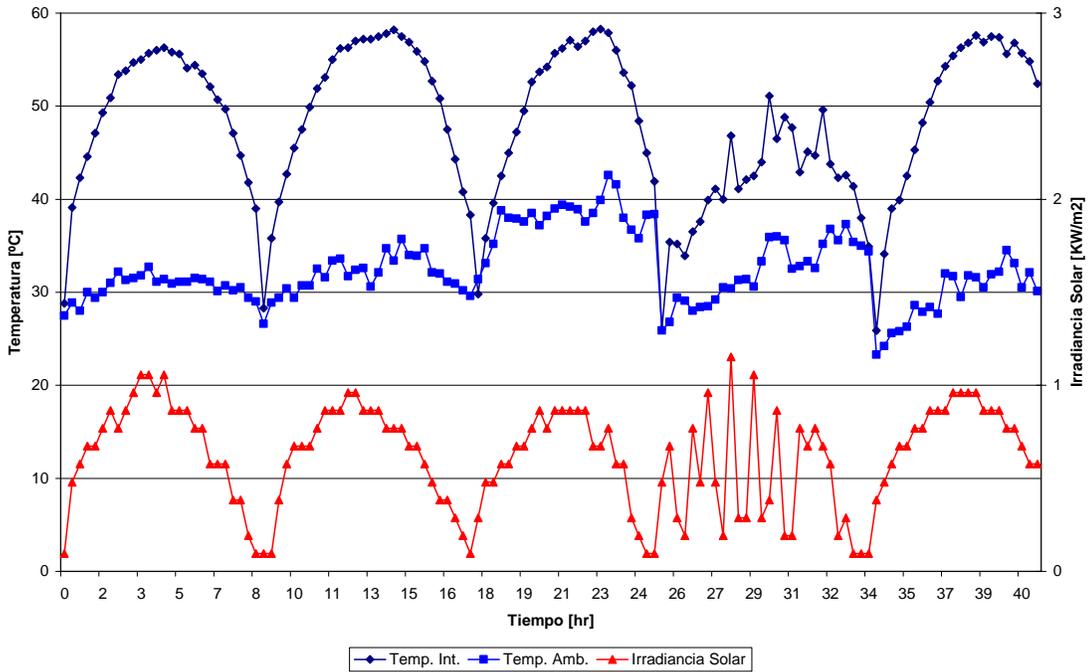


Figura 4.1. Temperaturas registradas en el interior (termopar 4) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.

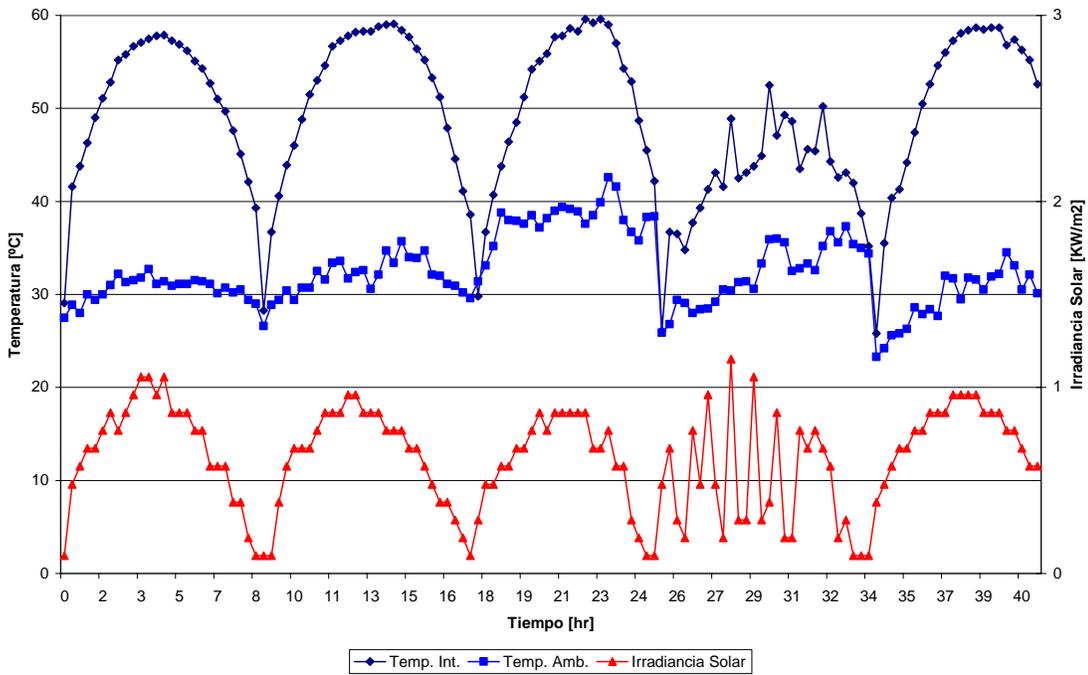


Figura 4.2. Temperaturas registradas en el interior (termopar 7) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.

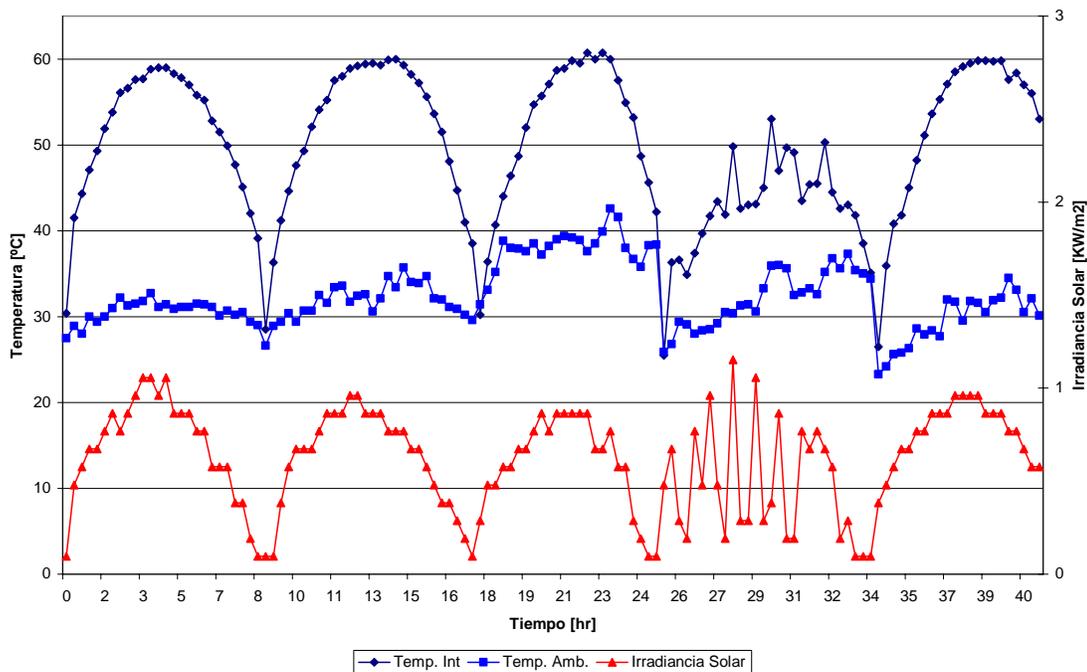


Figura 4.3. Temperaturas registradas en el interior (termopar 8) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.

Para el cuarto día de secado se puede apreciar altibajos de temperaturas e irradiancia tanto en la cámara como en el ambiente esto porque las condiciones ambientales no fueron adecuadas ya que fue un día nublado y con presencia de lluvia.

#### 4.1.2. Humedad interior y exterior del secador solar.

En la figura 4.4 se presenta el comportamiento de la humedad relativa exterior y la interior con respecto al tiempo. Tal y como se aprecia la humedad relativa en el ambiente se mantuvo en promedio superior al 50 % la mayor parte del tiempo, pero en el interior de la cámara se logró reducir hasta un 20 % en ciertos periodos, lo cual resulta bastante benéfico ya que favorece el proceso de secado.

La máxima humedad interior registrada es de 67.7% en las mañanas y en los intervalos de tiempo de 13:00 a 14:00 hrs se registraron humedades en la cámara de secado de 16.2% en promedio.

En la figura 4.4, se muestra el comportamiento de la humedad relativa ambiente e interior de la cámara de secado.

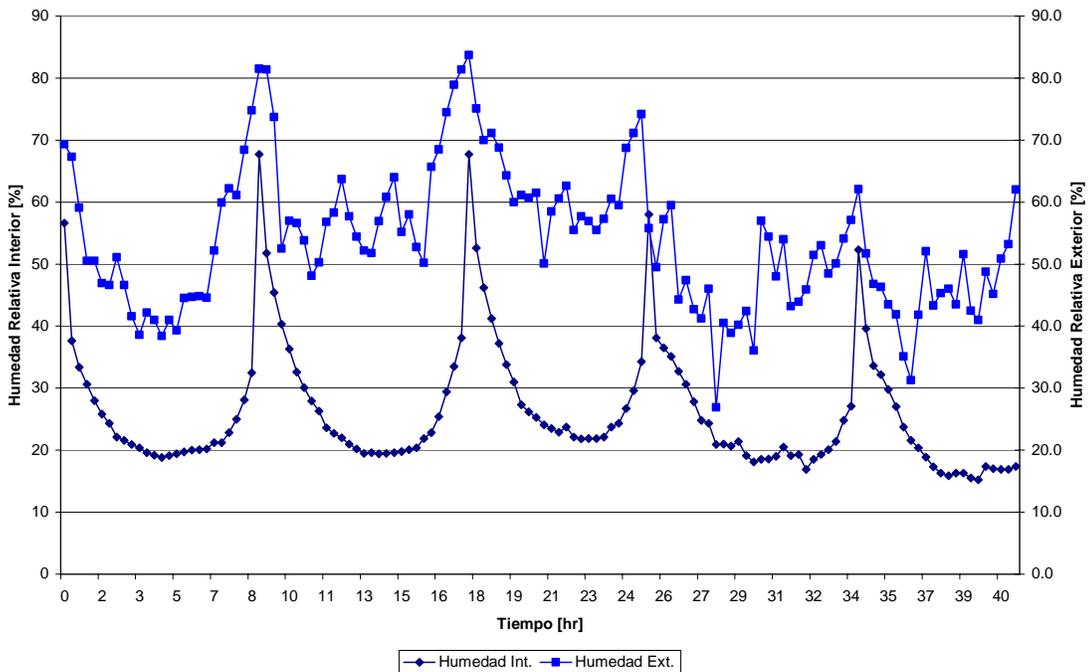


Figura 4.4. Humedad relativa en el interior y exterior del secador solar durante el proceso.

4.1.3. Contenido de humedad.

La figura 4.5 muestra el comportamiento de las muestras seleccionadas para el estudio. Se observa que el proceso de secado se termino cuando se cumplieron 41 horas, obteniendo contenidos de humedad del 0.5 gr/gr seco en promedio.

El perfil de la humedad se obtuvo representándolo frente al tiempo. Se observa que presenta una linealidad en los primeros 2 días de prueba, posteriormente la curva tiende a ser horizontal y finalmente se puede observar el punto de equilibrio, este último se logró a los 5 días de prueba.

En cada inicio de prueba se percató que existe una pérdida de humedad de 0.32 gr/gr seco en promedio en el producto durante la noche debido al calor retenido en la cámara, esto hacia que el último valor tomado de cada día de prueba no sea igual cuando se pesa al otro día, lo cual puede ser debido a la propia inercia térmica del secador (figura 4.5).

Las muestras 1 y 3 presentaron un proceso de secado más rápido que las otras dos, a pesar de que la muestra 1 presentaba un volumen más grande comparado con la muestras 2 y 4; esto debido a que las muestras se colocaron en uno de los ventiladores que tiene como característica mayor velocidad de aire 1.5 m/s y un flujo másico de 0.81 kg/s aproximadamente. El flujo de aire caliente a estas muestras fue determinante para que se presentara este comportamiento.

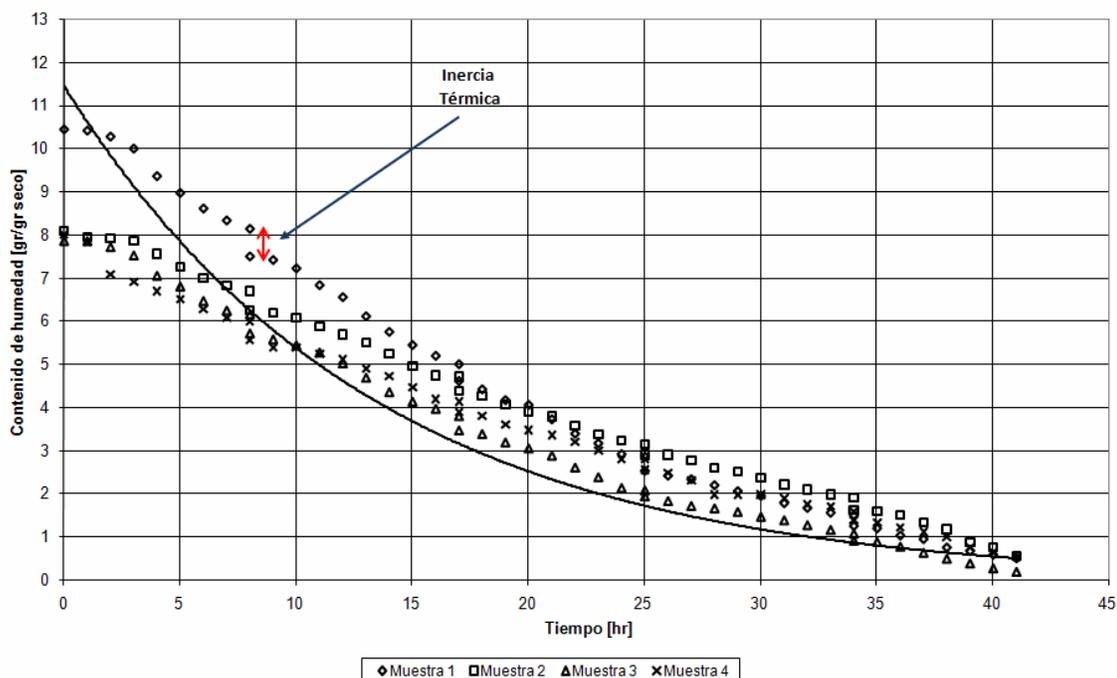


Figura 4.5. Pérdida de contenido humedad en base seca.

#### 4.1.4. Color y textura

En la figura 4.6, se muestran los cambios de color y textura que obtuvieron los productos en cada día. Las fotografías son de una de las muestras seleccionadas al azar.

Los cambios de color y textura se empezaron a notar al término del primer día de prueba, la textura del chile apenas se arrugo de igual manera presentó un cambio de color difícil de percibir.

Estos cambios se producen de forma más acentuada a temperaturas internas elevadas y con humedad relativa interior bajas.

Se observa que a medida que disminuye el contenido de humedad de las muestras se produce un incremento del arrugamiento y de color pasando de verde a café.

El tercer y último día los cambios que produjeron fueron mínimas lo quiere decir que el proceso llegaba a su fin, observándose que el contenido de humedad y apariencia del chile eran muy aceptables.



a) Primer día



b) Segundo día



c) Tercer día



d) Cuarto día



e) Quinto día.

*Figura 4.6. Color y textura del chile jalapeño durante el proceso de secado.*

## 4.2. PRUEBA CON CHILE JALAPEÑO CORTADO LONGITUDINALMENTE

La segunda prueba se realizó con un corte longitudinal al chile jalapeño. Esta prueba corresponde del 5 al 10 de abril con 8 horas de exposición al Sol y con un tiempo de secado de 38 horas.

### 4.2.1. Temperaturas e irradiancia solar.

Durante esta prueba se realizó bajo condiciones climatológicas muy favorables en general.

Las temperaturas interiores registradas en la cámara de secado fueron uniformes en toda la cámara. La temperatura máxima alcanzada es de 60 °C a las 13:00 hrs. y la mínima de 29.9 a las 8:00 a.m. Se observan que durante todo el proceso el comportamiento de las temperaturas fueron similares, solamente se observa que en el cuarto día de prueba se presentan bajas temperaturas al inicio de la prueba; esto es debido a la nubosidad y la temperatura del ambiente.

En las figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, y 4.12 muestra los perfiles de temperaturas interiores de la cámara en diferentes puntos. También se muestran los perfiles de la temperatura ambiente durante el proceso de secado. La temperatura máxima alcanzada en el secado fue de 36.9 °C bajo sombra (registrada a las 13:00 hrs generalmente) y con la mínima de 25.9 °C bajo sombra (al inicio de la prueba).

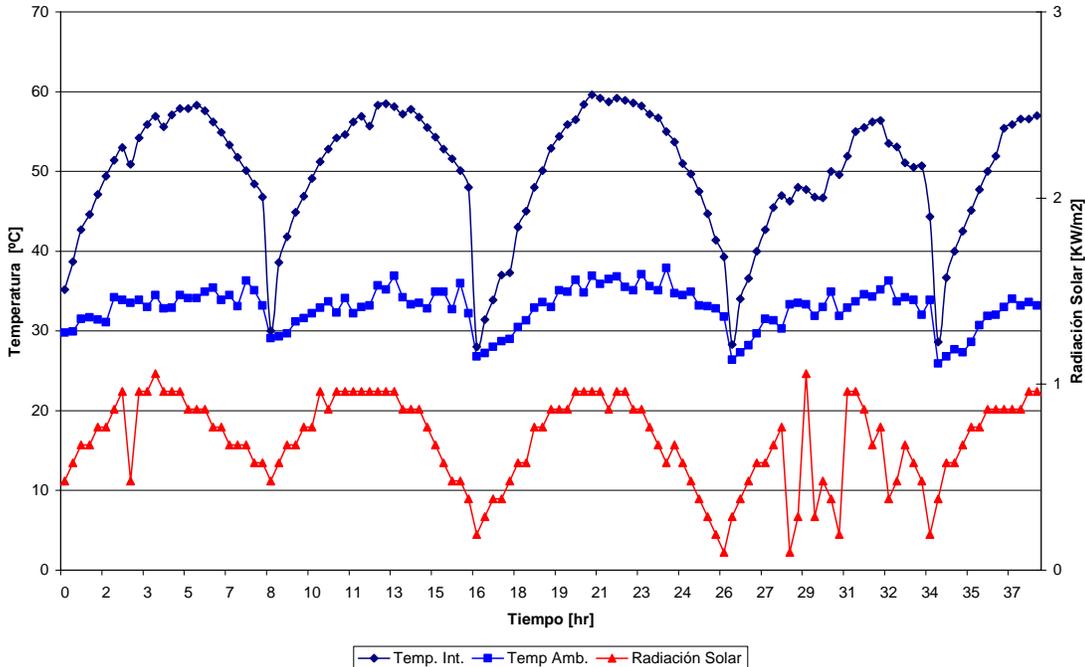


Figura 4.7. Temperaturas registradas en el interior (termopar 2) y exterior del secador y la irradiación solar durante el secado.

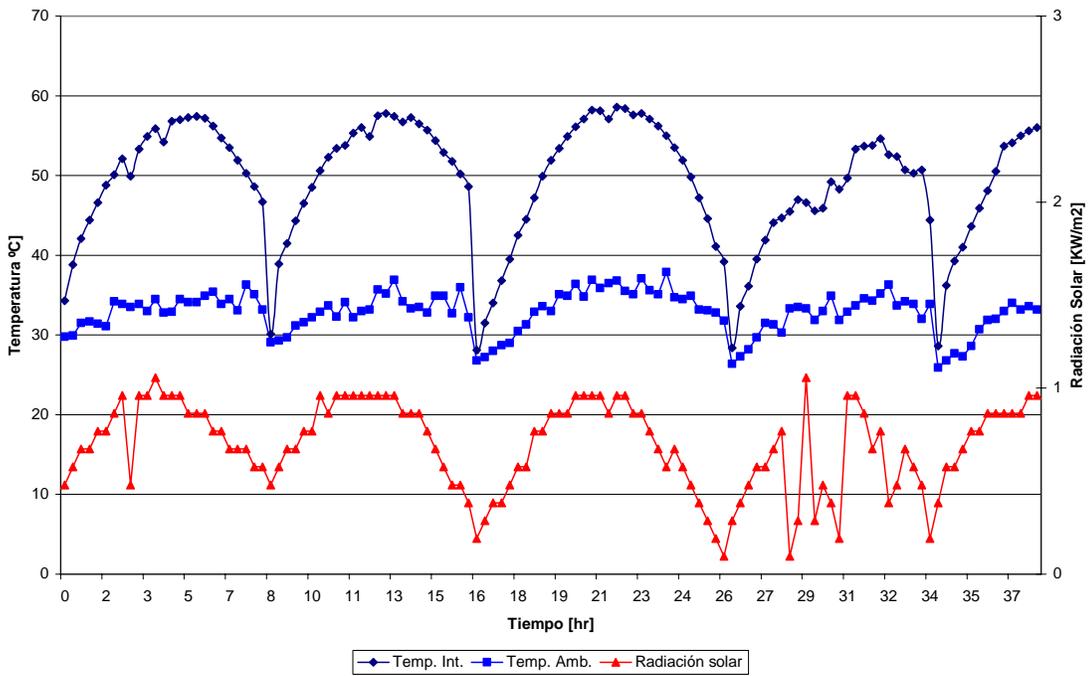


Figura 4.8. Temperaturas registradas en el interior (termopar 3) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.

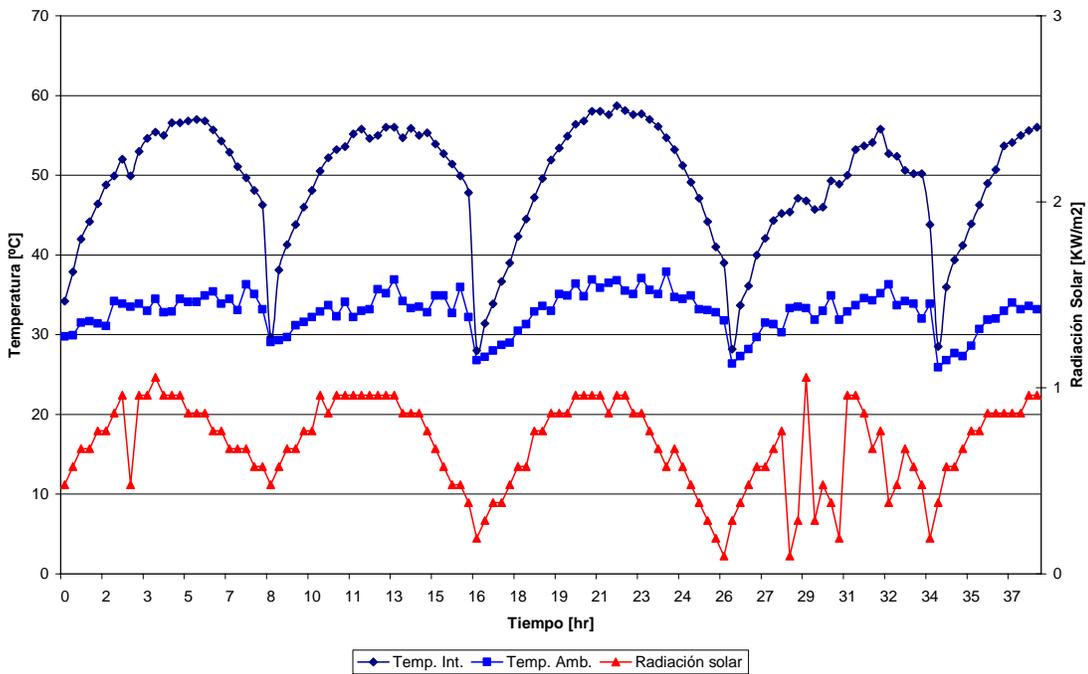


Figura 4.9. Temperaturas registradas en el interior (termopar 4) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.

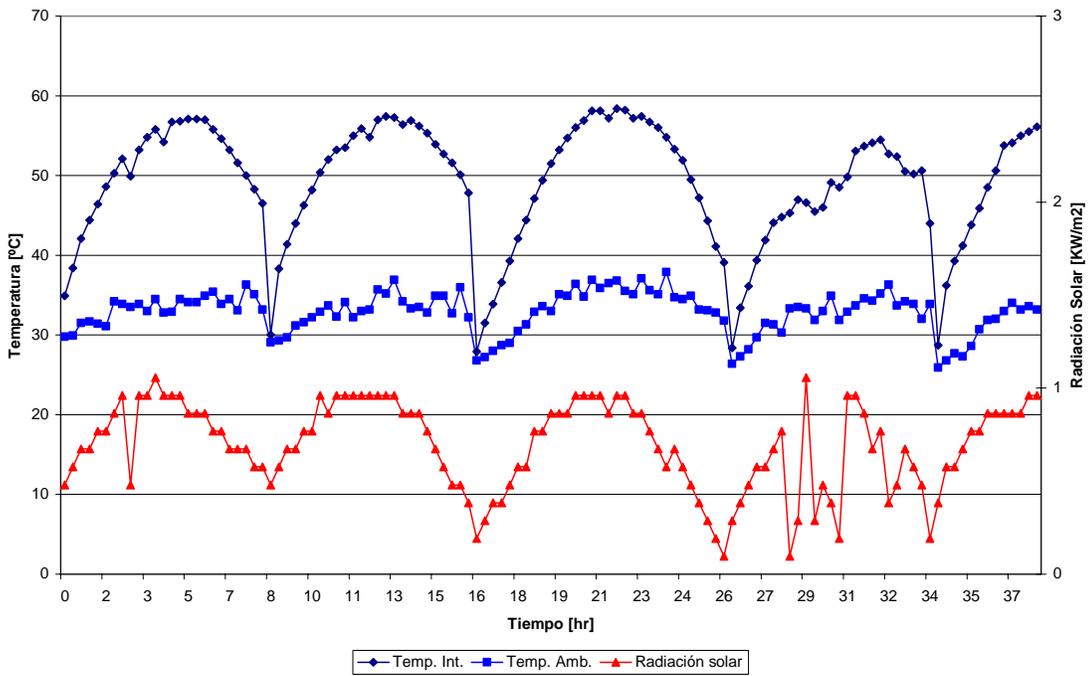


Figura 4.10. Temperaturas registradas en el interior (termopar 5) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.

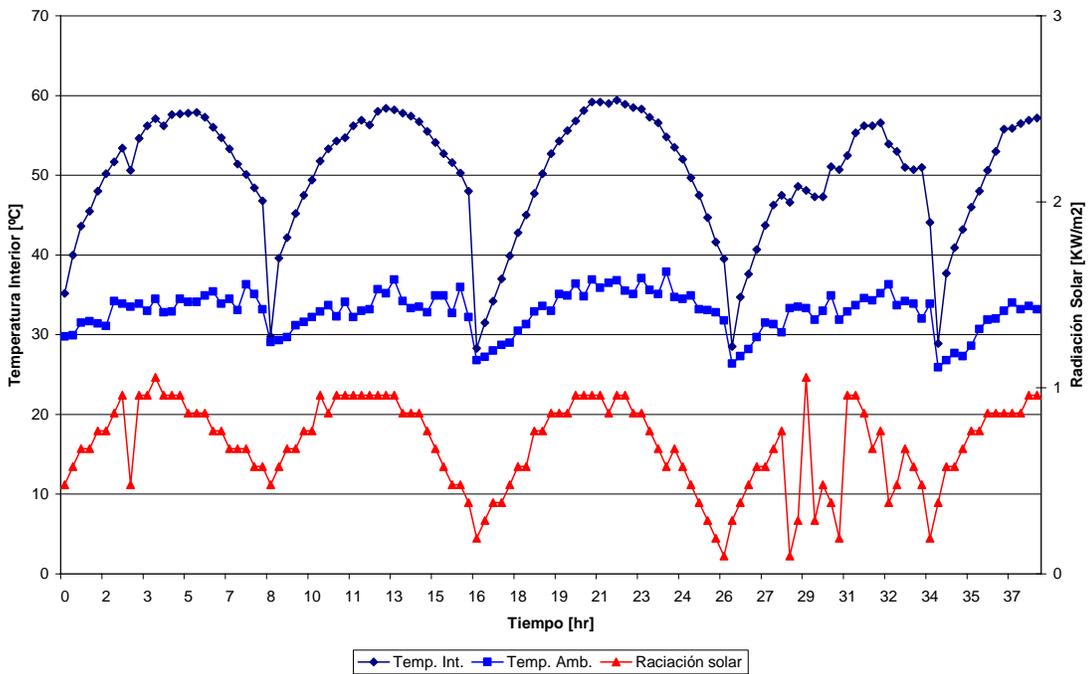


Figura 4.11. Temperaturas registradas en el interior (termopar 7) y exterior del secador y la irradiancia solar durante el secado.

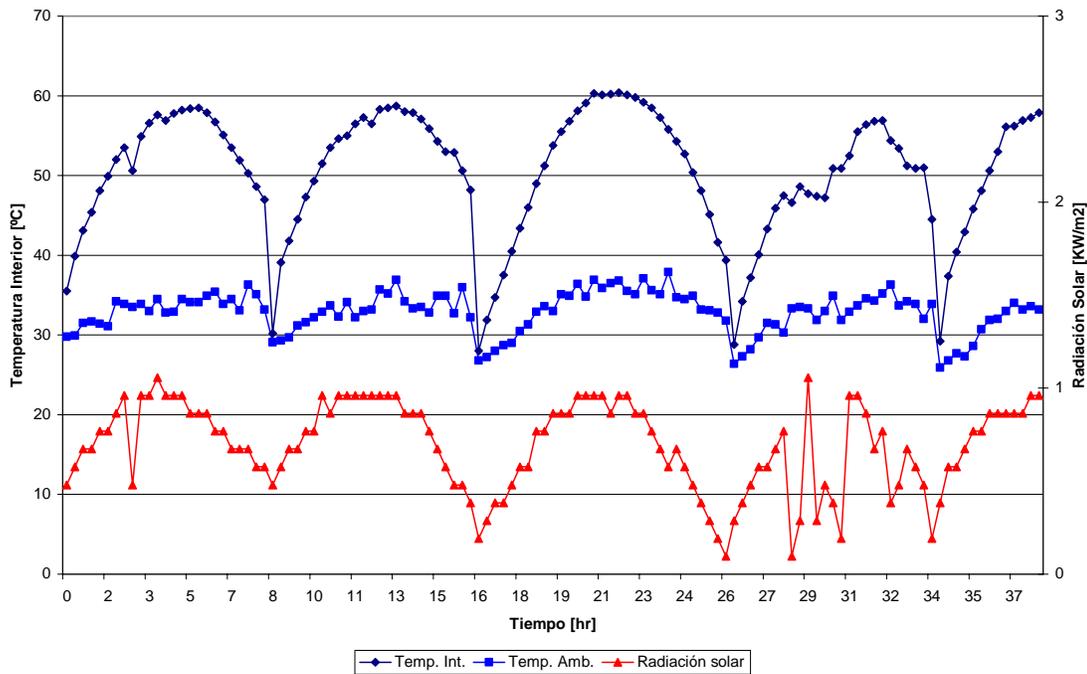


Figura 4.12. Temperaturas registradas en el interior (termopar 8) y exterior del secador y la irradiación solar durante el secado.

#### 4.2.2. Humedad interior y exterior del secador solar.

La figura 4.13 muestra la variación de las condiciones de humedad relativa ambiente e interior de la cámara durante los días de secado del chile.

La máxima humedad interior registrada es de 75 % y la mínima de 18.9 % y en el ambiente se registró una máxima de 89 % con una mínima de 38 %.

La humedad relativa ambiente registro mucha variación durante todos los días de proceso de secado, pero esto no efecto la humedad relativa interior por no presentar cambios significativos como muestra en la figura 5.3.

La humedad relativa interior de la cámara y de ambiente obtenidas presentaron cierto parecido a la figura 4.4 de la prueba con el chile entero.

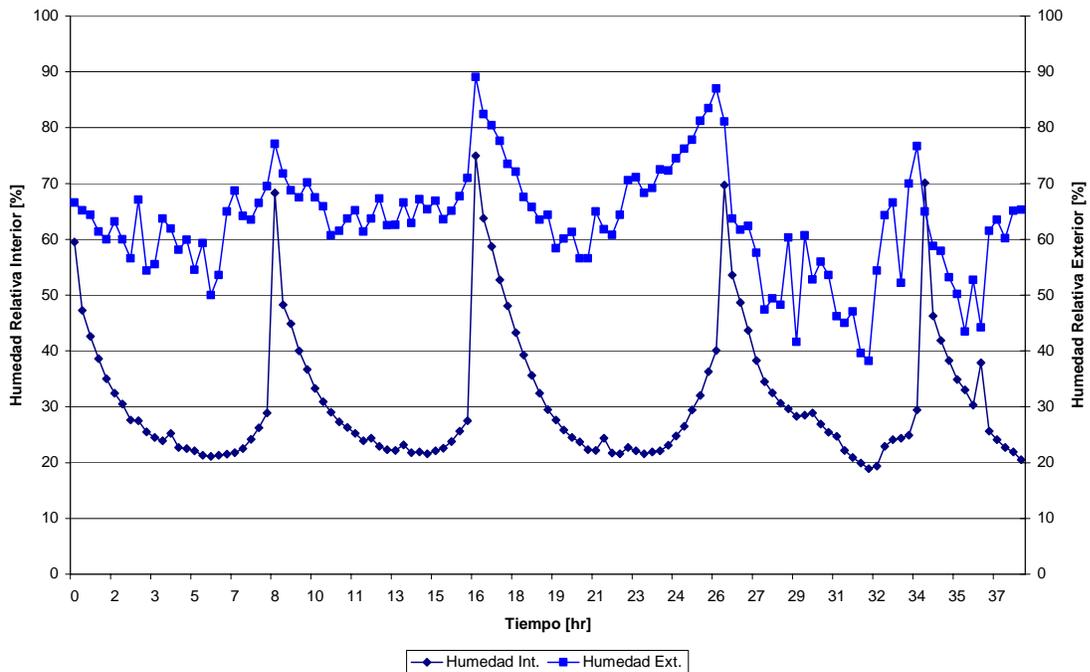


Figura 4.13. Humedad relativa en el interior y exterior del secador solar durante el proceso.

#### 4.2.3. Contenido de humedad

En la figura 4.14 se observa la evolución del secado para cada muestra.

Este proceso de secado tuvo una duración de 38 horas y con una humedad final de 1.24 gr/gr seco en promedio. La figura no presenta un contenido de humedad constante como la primera prueba de chile jalapeño entero, debido a que el producto presentó indicios de moho y de putrefacción por lo que tuvo que suspender el proceso de secado.

Sin embargo, el comportamiento durante el proceso de secado, tanto en la pérdida de contenido de humedad como en la pérdida de peso durante la noche (inercia térmica) fueron similares con la prueba anterior (chile jalapeño entero) pero con la desventaja antes mencionada.

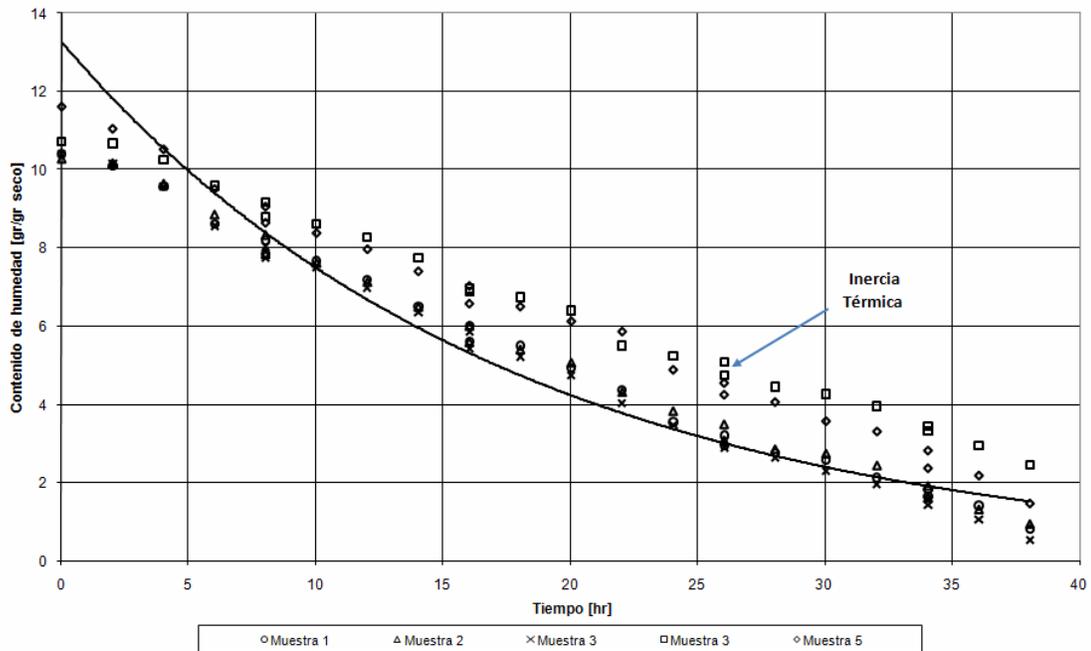


Figura 4.14. Pérdida de contenido humedad en base seca.

#### 4.2.4. Color y textura

En la figura 4.15, se muestran los cambios de color y textura que obtuvieron los productos en cada día. Se puede apreciar que los dos últimos días era muy notorio el estado de degradación del producto.



Figura 4.15. Color y textura del chile jalapeño durante el proceso de secado.

**4.3. COMPARACION DE LAS CURVAS DE SECADO DE LOS CASOS ANALIZADOS.**

Con los resultados obtenidos del proceso de secado de chile jalapeño, se procedió a realizar una comparación con lo reportado por otros autores para el secado de este producto.

En la figura 4.16 se presenta una comparación de las curvas de secado obtenidas en este trabajo, con respecto a otros estudios en el mismo producto pero empleando diferente tecnología.

Se observa que en el caso del secado industrial en un tiempo de 12 horas se puede alcanzar el contenido de humedad en base húmeda deseado (4-5%) [23], para el chile jalapeño, en tanto que para el secado solar estudiado en el presente trabajo se han requerido de aproximadamente 40 horas de operación del secador para alcanzar el contenido de humedad en el chile de 5 %.

En el caso del secado al aire libre se tiene reportado que durante el lapso de tiempo de 35 hrs, el contenido de humedad solo pudo reducirse hasta un 25%.

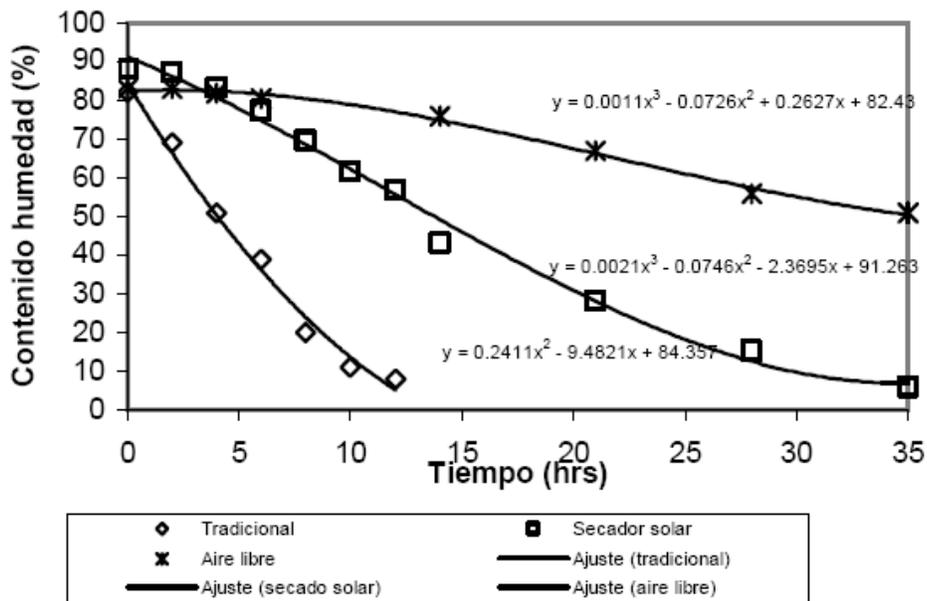


Figura 4.16. Comparación de las curvas de secado para los casos analizados.

Lo anterior implica que el secado solar permite reducir el tiempo de secado hasta en una tercera parte con respecto al secado al aire libre, y aún cuando no es tan rápido como el secado en estufas tradicionales, el costo es mucho menor.

#### **4.3.1. Consumo de energía del proceso de secado**

Para analizar la factibilidad del uso del secado solar, se puede partir de un estudio del consumo de energía en los procesos de secado.

En primer término, en el caso del secado al aire libre no se tiene ningún consumo de energía, ya que el proceso se realiza de forma natural, sin embargo el tiempo necesario para alcanzar el contenido de humedad adecuado es relativamente largo y durante el mismo el chile jalapeño está expuesto a deteriorarse por el efecto de las lluvias o ataque de insectos, lo que implica que al final se puede llegar a tener hasta más de un 20% de pérdida del producto.

Para el caso del secado solar, el único consumo de energía que se tiene durante el proceso es por la operación de los ventiladores, lo cual representa para el lapso de 37 horas de duración del proceso de secado, un consumo de energía de 2275.96 kcal [24]. Además se tiene el beneficio adicional de no producir contaminación del ambiente, ya que no se tiene que utilizar ningún tipo de combustible para el calentamiento del medio secante.

En el secado industrial, se requiere de tomar en consideración tanto al consumo de energía de los ventiladores, como al del sistema de calentamiento del aire, el cual es del orden de 9000 kcal, este consumo de energía toma en cuenta la cantidad de calor necesaria para evaporar el agua contenida en el producto, más las pérdidas de calor.

## CAPITULO V

### Conclusiones.

El proceso de secado solar con chile jalapeño en un secador indirecto demostró buenos resultados para la prueba con chile entero, no así con la prueba del chile con corte longitudinal. La primera prueba se realizó bajo condiciones ambientales muy favorables, en un lapso de 6 días, logrando reducir el contenido de humedad hasta un valor del 0.5 gr/gr seco en promedio y con un producto de alta calidad. La segunda prueba se realizó con semejantes condiciones ambientales y tiempo, pero el producto final no fue el esperado ya que en el penúltimo día de prueba presento indicios de moho y mal olor; en el último día el producto quedo con textura como si fuera una bolsa de nylon; lo cual implica que el producto se comenzó a descomponer y por lo tanto no se cumple con la calidad final requerida.

Los resultados obtenidos permitieron evaluar el comportamiento satisfactorio del secador solar en las condiciones ambientales de la región, ya que el producto final secado presentó características similares a los productores.

Se comprobó que el uso del secador solar indirecto logro disminuir el tiempo de secado respecto al secado tradicional (aire libre). Además, de que el costo de la implantación de esta técnica es bajo, y presenta una gran facilidad de construir en cualquier lugar.

El gasto energético necesario para su funcionamiento es barato, ya que la fuente generadora de calor es la radiación solar que es gratuita por lo que solo implica la operación de los ventiladores. Y algo muy importante que no contamina el medio ambiente.

El producto no está expuesto a la suciedad, lluvia y otros contaminantes ya que el producto se seca en una cámara cerrada, por lo que se puede decir que el producto es bastante limpio.

La pérdida de peso que se registra durante el proceso de secado es atribuible en gran parte a las temperaturas e irradiancias elevadas registradas en el período que comprende de las 12:00 a 14:00 horas en cada día de prueba. De igual manera originan los cambios de textura y color en los productos.

A medida que disminuye el contenido en agua de las muestras de chile se produce un incremento significativo de los valores texturales.

Durante la noche, se observo que el producto perdía peso debido a que continuaba el proceso de secado debido a la inercia térmica del secador.

## **RECOMENDACIONES**

Debido a que no fue posible llevar a cabo más pruebas, no se lograron determinar con exactitud las causas que originaron que el chile en la prueba con corte longitudinal se descompusiera antes de finalizar el proceso de secado.

Sería recomendable realizar más pruebas y con mayores cantidades de producto a fin de corroborar los resultados obtenidos, y que además permitan servir de ejemplo para convencer a los productores de la región de que el secado solar de chile es una buena opción en la región.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Strumillo, C., Jones P., Romuald Z.** Energy aspects of drying in Mujandar AS. Ed. Handbook of Industrial drying. New York, 1995.
2. **INEGI.** Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos. Edición 2005. pp 56-59.
3. **Heldman y Lund.** Curso de Secado Solar, Millennium Solar, Forum 2000. Mexico, DF.
4. **Mujandar A., Menon E.** Industrial drying technology. Edit. Mariel Dekker. 1999.
5. **R. B. Keey.** Theoretical foundations of drying technology, in advances in drying. Edit. Aron S. Mujandar. Vol. 1. 1999.
6. **Busso, A. Sogari, N.** Artículo: Secado solar de productos hortícolas de hoja: Análisis en laboratorio y modelo simple para el proceso de secado. *Dpto. de Física-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura-UNNE.Campus Universitario. Argentina.*
7. **Víctor M. Berrueta-Soriano, Fernando Limón-Aguirre.** Artículo: Participación campesina en el diseño y construcción de un secador solar para café. El Colegio de la Frontera Sur. San Cristóbal de las Casas, Chiapas. México.
8. **V. Passamai.** Artículo: Secador-invernadero solar en Cachi, Salta. Facultades de Ciencias Exactas y de la Salud. Salta. R. Argentina.
9. [www.icar.org.in/ciae/tunnel%20dryer.htm](http://www.icar.org.in/ciae/tunnel%20dryer.htm).
10. **Gauhar A. Mastekbayeva, M. Augustus León and S. Kumar.** Artículo: Performance evaluation of a solar tunnel dryer for Chilli Drying. Energy Program, School of Environment, Resources and Development, Asian Institute of Technology. Thailand.
11. **Rodríguez H. José, Cuevas D. Jaime.** Diseño y construcción de un secador de madera utilizando como fuente de energía el sol. Universidad de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo. 1999.
12. **Campos D.** Conservación de alimentos por deshidratación. En teoría y práctica del secado solar. Instituto General de Investigación, Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. 1988.
- 13, 18. **Marcilla G. Antonio.** Introducción a las operaciones de separación. Publicaciones de la Universidad de Alicante, 1999.
14. **F. Siau. John.** WOOD. Influence of moisture on physical properties. Department of wood science and forest products. New York. 1995.

15, 16, 17, 19. **XXVI Semana Nacional de Energía Solar.** Curso: Secado Solar. Asociación Nacional de Energía Solar (ANES). Chetumal, Quintana Roo. Noviembre 2002.

20. **Cengel, Y. A., Boles, M. A.** Termodinámica. Tomos I y II. McGraw-Hill Interamericana Editores. Segunda Edición. 1996.

21, 22. **Poling B. E., Prausnitz J. M.** The properties of Gases and Liquids. McGraw-Hill. Fifth Edition. New York. 2001.

23, 24. **Rodríguez H. José, Cuevas D. Jaime, Acosta O. Roberto, Ché Yam Miguel A.** Artículo: Aplicación de la energía solar al secado de chile jalapeño. Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo. 2005.

**ANEXOS**

FOTOGRAFÍAS DEL CHILE JALAPEÑO CON CORTE LONGITUDINAL



1. Fotografía de las muestras en el interior de la cámara de secado (Primer Día).



2. Fotografía de las muestras en el interior de la cámara de secado (Segundo Día).



3. Fotografía de muestras en el interior de la cámara de secado (Tercer día).



4. Fotografía de las muestras en el interior de la cámara de secado (Cuarto día).



5. Fotografía de las muestras en el interior de cámara de secado (Quinto Día).

**FOTOGRAFÍAS DEL CHILE JALAPEÑO ENTERO**



**1. Fotografía de las muestras en el interior de cámara de secado (Primer Día).**



**2. Fotografía de las muestras en el interior de la cámara de secado (Segundo Día).**



3. Fotografía de las muestras en el interior de la cámara de secado (Tercer Día).



4. Fotografía de las muestras en el interior de la cámara de secado (Cuarto Día).



5. Fotografía de las muestras en el interior de la cámara de secado (Quinto Día).

**FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DEL CHILE JALAPEÑO.**

No. DE PRUEBA: \_\_\_\_\_

FECHA: \_\_\_\_\_

	HORA	MUESTRA 1 (GRAMOS)	MUESTRA 2 (GRAMOS)	MUESTRA 3 (GRAMOS)	MUESTRA 4 (GRAMOS)	MUESTRA 5 (GRAMOS)	MUESTRA 6 (GRAMOS)	OBSERVACIONES



