



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

ESCUELA DE INGENIERÍA

TESIS

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN,
EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN
SECADOR SOLAR PARA EL SECADO
DEL TE LIMÓN”**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTOR EN CIENCIAS EN
DESARROLLO SUSTENTABLE**

PRESENTA

ROILAN IGLESIAS DÍAZ

DIRECTORES DE TESIS: DR. JOEL PANTOJA ENRIQUEZ

DR: GUILLERMO ROGELIO IBÁÑEZ DUHARTE

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS.

OBTUBRE 2013

ABSTRACT

Production of Lemon grass (*Cymbopogon citratus*) in the municipality of Cintalapa in the State of Chiapas, Mexico, is of economic importance because it is an exportable rube, the same are extracted essential oils useful in the pharmaceutical, cosmetics and food.

For commercialization of this plant is submitted prior to conservation treatment consisting of drying. In Cintalapa place and dried produce are presenting problems final dried product quality, because they do naturally outdoors out of direct sun, but protected by roofs rustic but very craft which brings : prolonged period of drying , the danger of infection of rodents or insects attack , rehydrate when it rains quality problems by not complying with the main feature that is claimed to maintain a greenish color after dry.

To solve this problem was designed, built , tested and validated a prototype solar dryer for drying Limon that protects you from the conditions and environmental pollutants and to maintain a good quality of the final dried product . To achieve the purpose it was designed and built an experimental prototype of indirect solar dryer with forced circulation control system parameters and thermal storage system. Prototype was evaluated and determined drying temperature , drying time , appropriate speed of the air inside the drying chamber and the flow rate was also determined from the initial moisture content and balance of the product, among other drying speed variable drying kinetics of the product ; mathematically modeled to scale it semindustrial level programmatically in Visual Basic and the use of iterative numerical method of Rugen - Kutta of order four and

finally experimental values were compared with those thrown by the mathematical model , concluding that the model fits reality. Finally we propose a project to install solar drying process capacity 300 Kg every other day fresh Lemon Tea. It was concluded that solar drying is a viable alternative for the dehydrated product, the quality is guaranteed with the proposed facility in addition to increasing productivity by reducing the time taken thus solves the problem.

Keywords. Lemon Tea. Solar Drying, Mathematical Model, Dehydration. dryer

RESUMEN

La producción del zacate Te Limón (*cymbopogon citratus*) en el municipio de Cintalapa en el Estado de Chiapas, México, tiene importancia económica ya que constituye un rublo exportable, del mismo se extraen aceites esenciales con gran utilidad en la industria farmacéutica, de cosméticos y alimentaria.

Para la comercialización de esta planta se somete previamente a un tratamiento de conservación consistente en su secado. En Cintalapa lugar donde produce y se seca se están presentando problemas de calidad del producto seco final, debido a que lo hacen de forma natural al aire libre no expuesto directamente al sol sino protegidas por techos rústicos pero de forma muy artesanal lo que trae consigo: periodo prolongado de tiempo de secado, peligro de infección por el ataque de roedores o insectos, rehidratarse cuando llueve, problemas con la calidad al no cumplir con la principal característica que se demanda de mantener un color verdoso después de seco.

Para resolver este problema se diseñó, construyó, evaluó y validó un prototipo de secador solar para el secado del Te Limón que lo proteja de las condiciones y contaminantes ambientales y permita mantener una buena calidad del producto seco final.

Para lograr el propósito se diseñó y construyó un prototipo experimental de secador solar indirecto y de circulación forzada con un sistema de control de parámetros y un sistema de acumulación térmica. Se evaluó el prototipo y se

determinaron la temperatura de secado, el tiempo de secado, velocidad apropiada del aire dentro de la cámara de secado y su flujo, también se determinó la humedad inicial y de equilibrio del producto, velocidad de secado entre otras variable de la cinética de secado de este producto; se modeló matemáticamente para poder escalarlo a nivel semindustrial mediante programación en Visual Basic y la utilización del método numérico iterativo de Rugen-Kutta de orden cuatro y finalmente se compararon los valores experimentales con los arrojados por el modelo matemático, llegando a la conclusión que el modelo se ajusta a la realidad. Finalmente se propone un proyecto de instalación de secado solar con capacidad de procesar 300 Kg cada dos días de Té Limón fresco.

Se concluyó que el secado solar es una alternativa viable para el deshidratado de este producto, que se garantiza la calidad con la instalación propuesta además de aumentar la productividad al disminuir el tiempo de sacado por tanto resuelve el problema planteado.

Palabras Claves. Té Limón. Secado Solar, Modelo Matemático, Deshidratación.

Secador

AGRADECIMIENTOS

La actividad intelectual científico-técnico, que va en aumento en el Estado de Chiapas me ha permitido lograr uno de mis más grandes sueños, pero sobre todo el capital humano me tiene profundamente agradecido.

En primer lugar, agradezco el apoyo que me dio mi familia, que estando lejos siempre estuvo al tanto y alentándome en la realización de este posgrado; en especial a mi guía inspiradora en cada momento que aunque ya no está en este mundo siempre estuvo presente y fue mi mayor motor impulsor, **mi madre**. Agradezco especialmente a mi papa y hermana por su apoyo, a mi hijo y mis sobrinos, en fin a la pequeña y estrecha familia con que cuento; mención especial a mi esposa que estuvo todo el tiempo al tanto de mi desarrollo profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico otorgado a través de los proyectos “Energía Termosolar y eólica” para impulsar el desarrollo de poblaciones rurales (FORDECYT – 174532) y al proyecto Estación de Pruebas de Sistemas Energéticos Renovables e Implementación en Comunidades de Alta Marginación en Chiapas (CONACYT – 152941). Ambos en etapas diferentes del desarrollo de esta tesis.

Agradezco a quienes fueron parte del proceso formativo, a los docentes de los cursos, seminarios, sesiones integradoras, administrativos y directivos de la UNICACH, donde me siento como en casa.

Agradezco a los que de una forma u otra colaboraron con este proyecto, al Ing. Manuel Alejandro Vázquez Morales por su colaboración en la construcción del

prototipo, a la Ing. Nayeli López rodas y Violet Vázquez García por su colaboración en la caracterización físico química del Té Limón, a los Laboratorios de Nutrición de la UNICACH en especial a la Mtra. Rosa Márquez Montes, a los compañeros de la Unión de Pequeños Productores del Sureste por su apoyo y las atenciones sobre todo al Técnico Guillermo Vázquez Mendosa como su presidente, entre otros.

Un especial agradecimiento a los miembros de mi comité tutorial su tiempo y apoyo, a los Doctores Guillermo Ibáñez Duharte, Joel Moreira Acosta de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas; al Dr. Sebastian Pathiyamatton Joseph de la Universidad Autónoma de México y al Dr. Nein Farrera Vázquez de la Universidad del Valle de México.

Quiero mencionar a mis compañeros del Doctorado, agradezco su apoyo y el tiempo que compartimos en los trabajos y proyectos que realizamos. Espero que podamos continuar trabajando en equipo.

Por último, agradezco sinceramente a quien fortaleció y modificó mi visión de la investigación y con quien viajé por este trayecto tan importante en mi vida académica, al Dr. Joel Pantoja Enríquez. Su guía y amistad, pero sobre todo el liderazgo y ejemplo me movieron a lograr los objetivos.

A todos muchas gracias

	INDICE	PÁGINA
	Lista de Tablas	I
	Lista de Figuras	II
	Nomenclatura	III
	Resumen	IV
	Capítulo 1 GENERALIDADES	1
1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	5
1.3	Planteamiento del problema	7
1.4	Objetivos e Hipótesis	10
1.4.1	Objetivos	10
1.4.2	Hipótesis	14
1.5	Límites del estudio	14
1.6	Justificación	15
1.7	Estructura de la Tesis	16
1.8	Conclusiones	18
	Capítulo 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	20
2.1	Introducción	20
2.2	Marco teórico	21
2.2.1	Teoría del secado solar	21
2.2.2	Contenido de humedad	23
2.2.3	Curva de secado	25
2.2.4	Curvas de humedad	26

2.2.5	Curvas de humedad de equilibrio. Actividad del agua	29
2.2.6	Teoria de la difusión del agua	32
2.3	Propiedades psicrometricas del aire humedo	36
2.4	Evolución de aire en el proceso de secado	40
2.5	Eficiencia del proceso secado	42
2.6	Tipos de Secadores Solares	43
2.7	Nuestra fuente de energía. El Sol	46
2.7.1	Naturaleza de la energía solar. Estructura del sol	46
2.7.2	La constante solar	47
2.7.3	La radiación normal extraterrestre	48
2.7.4	Distribución espectral de la radiación solar	48
2.7.5	Geometría sol-tierra. Posición solar	49
2.7.5.1	Los movimientos de la Tierra	49
2.7.5.2	Movimiento de traslación	50
2.7.5.3	Movimiento de rotación	51
2.7.5.4	Posición de un observador sobre la superficie terrestre	52
2.7.5.5	La esfera celeste. Sistemas de referencia	53
2.7.5.6	Movimiento aparente del Sol sobre el horizonte	57
2.7.6	Tiempo solar y tiempo oficial	57
2.7.7	Posición solar	60
2.7.8	Posición del sol relativa a una superficie plana	62
2.7.9	La radiación solar	63
2.8	Conclusiones	67
Capítulo 3	METODOS	68
3.1	Introducción	68

3.2	Área de estudio	68
3.3	Diseño Investigativo	71
3.3.1	Diseño y construcción del prototipo del secador solar	71
3.3.1.1	Determinación del recurso energético	72
3.3.1.2	Selección del tipo de secador	75
3.3.1.3	Cálculo de la demanda energética	75
3.3.1.4	Desarrollo de un sistema de control de temperatura humedad relativa	76
3.3.1.5	Desarrollo de un sistema de acumulación térmica	77
3.3.1.6	Dimensionado de la superficie de captación y de la Cámara de secado	78
3.3.1.6.1	Flujo de aire necesario para el secado	79
3.3.1.6.2	Área de secado en el interior de la cámara	81
3.3.1.6.3	Área de captación de la energía solar	82
3.3.1.6.4	Caída de presión a través del lecho de secado	82
3.3.1.7	Construcción del prototipo de secador solar indirecto y de circulación forzada con los sistemas de control de parámetros y del sistema de acumulación térmica	83
3.3.2	Evaluación del prototipo de secado solar	84
3.3.2.1	Evaluación en vacío	84
3.3.2.2	Evaluación con carga	85
3.3.2.3	Evaluación de la calidad del producto seco	86
3.3.3	Modelo matemático del prototipo de secador	96
3.3.3.1	Modelo del colector solar, su rendimiento y temperatura de salida del aire	98

3.3.3.1.1	Rendimiento del colector y temperatura del aire a la salida	99
3.3.3.1.2	Modelo Matemático del colector solar	102
3.3.3.1.3	Parámetros de entrada y proceso de cálculo del modelo matemático del colector solar	106
3.3.3.2	Modelo matemático de la cámara de secado	110
3.3.3.2.1	Proceso de modelado matemático de la cámara de secado	115
3.3.3.2.2	Parámetros de entrada y proceso de cálculo del modelo de la cámara de secado	115
3.3.4	Validación del modelo matemático y propuesta de un secador a escala semindustrial	118
3.4	Conclusiones	119
Capítulo 4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	120
4.1	Introducción	120
4.2	Mecanismo de deshidratación del Té Limón	120
4.3	Diseño y construcción del prototipo del secador solar	122
4.3.1	Determinación del recurso energético	122
4.3.2	Demanda energética	123
4.3.3	Dimensionado de la superficie de captación y de la cámara de secado.	124
4.3.3.1	Otras consideraciones de diseño del prototipo de secador solar	125
4.3.4	Desarrollo de un sistema de acumulación térmica.	127

4.3.5	Desarrollo del sistema de control de parámetros	128
4.3.6	Descripción del prototipo de secador solar.	132
4.3.7	Construcción del prototipo de secador solar	133
4.4	Resultados de la evaluación del prototipo de secador solar.	135
4.4.1	Evaluación en vacío.	135
4.4.1.1	Comportamiento térmico de dos prototipos de secadores con y sin sistema de acumulación térmica.	139
4.4.2	Evaluación con carga.	144
4.4.3	Resultados del análisis de la calidad final del producto seco	146
4.5	Modelo Matemático	150
4.5.1	Análisis de las variables climatológicas	150
4.5.2	Análisis de las variables relacionadas con los materiales del colector	154
4.5.3	Validación del modelo matemático del prototipo	155
4.5.3.1	Validación del Modelo del colector solar	156
4.5.3.2	Validación del Modelo de la cámara de secado.	159
4.6	Propuesta del secador solar a escala semindustrial	162
4.7	Conclusiones	169
	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	170
	LITERATURA CITADA	176
	ANEXOS	185
	PRODUCTO DE LA TESIS	191

CAPITULO 1. GENERALIDADES.

1.1. Introducción.

En la década de los 80, en México comienza un resurgimiento de una cultura naturalista científicamente fundamentada, que abarca tanto la actividad agronómica, como la médica, se comienza a revalorizar el uso y producción de las plantas medicinales y aromáticas, tanto en estado natural, como de las sustancias y productos elaborados a partir de ellas, este es el caso del Té Limón que es nuestro objeto de estudio. El agradable olor que poseen y por su contenido en aceites esenciales ricos en compuestos terpénicos ha creado una demanda de estos para el desarrollo de la industria en países como: Alemania, Argentina, Brasil, China, Francia, Sudáfrica, México, Guatemala, Honduras y Salvador entre otros.

La producción del Té Limón (*Cymbopogon Citratus*) en México ha alcanzado gran importancia económica y en el Estado de Chiapas precisamente en el municipio de Cintalapa se expresa con mayor fuerza ya que constituye un rublo exportable. En Cintalapa en el Ejido “Los Joaquines” se cultivan hasta el momento 3 hectáreas de este zacate oriundo de Asia llamado en México Té Limón o Zacate Limón (figura 1.1); este producto obtiene varios nombres en dependencia del país que lo cultiva como por ejemplo: Caña Santa, Cañita de Limón, Cañita Santa, Yerba de Calentura (Cuba), Lemongrass (Antillas Inglesas), Limoncillo, Matojo de Limón, Chiendent Citronnelle (Antillas Francesas), Malojillo (Venezuela), Limonera (Guayana). (Soto 2001).



Figura 1.1 Zacate Té Limón (*Cymbopogon citratus* (DC.) stapf). Fotos de Internet.

La naturaleza aromática del género *Cymbopogon* ha atraído la atención del hombre para ser utilizados como perfumador de todo tipo de productos cosméticos, jabones, detergentes, además tiene propiedades como bactericidas y fungicidas por su alto contenido en Citral, de este modo es un excelente repelente para insectos; como parte de preparaciones farmacéuticas es eficiente como: antihipertensivo, antiespasmódico, antiasmático, antifúngico (contra los hongos), acción analgésica, antiinflamatoria, expectorante y otras. (Soto 2001).

Tratamiento poscosecha. Existe una diversa gama de tecnologías de tratamiento poscosecha aplicadas a la preservación de los alimentos perecederos. Sin embargo, siendo uno de los métodos más antiguos, el secado es uno de los más prácticos extendiendo la vida útil del producto y garantizando las propiedades físicas, químicas y nutricionales de los alimentos (Breto, S. et al.1998).

Entre los procesos de secado que se aplican en la actualidad se encuentran los métodos industriales de secado, el secado solar o la combinación de ambos como una manera de reducir el consumo de energía y mejorar la calidad del producto (López L. et al. 2000). Como los secadores industriales no están al

alcance de la mayoría de los pequeños agricultores, el empleo de energías alternativas renovables, de bajo costo y no contaminantes, incrementa la viabilidad económica del proceso al reducir sus costos de su aplicación (Medugu, D. W. 2010).

Para la comercialización de esta planta se somete previamente a un tratamiento de conservación consistente en su secado. **El secado** es una operación básica que consiste en reducir la humedad de un producto hasta obtener una humedad que permanezca en equilibrio con la humedad relativa del ambiente en el cual este se almacena (Aviara et al. 2002).

Con el secado se deben conservar las características físicas, químicas, organolépticas, y farmacológicas del producto. Un proceso de secado inadecuado da como resultado una materia prima de baja calidad, pérdidas del principio activo, aumento de la carga microbiana y una pésima presentación comercial. Las pérdidas de principios activos involucran:

- Degradación por procesos metabólicos.
- Hidrólisis de los compuestos.
- Descomposición por la luz y enzimática.
- Degradación de sustancias termolábiles por el calor.
- Volatilización de los aceites esenciales.
- Contaminación por hongos y bacterias.

Los productores en Cintalapa siguen un proceso poscosecha del Té Limón que consiste en: selección de las hojas sin deterioro, manchas o con señales de ataque de insectos y hongos, luego entran a la etapa más importante de la conservación poscosecha que es el secado.

Los productores secan al Té Limón en instalaciones rusticas hechas por ellos mismos donde existen muchos problemas de calidad y contaminación además de un tiempo de secado prolongado, cumpliendo solo que no le incida directamente la luz solar al producto según se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2. Proceso de secado del Té Limón en Cintalapa. Foto de Internet.

El secado interrumpe los procesos de degradación causados por enzimas y fermentos, impide el desarrollo de microorganismos y reacciones de oxidación y de hidrólisis, sin embargo como este proceso involucra calor, pueden presentarse pérdidas de aceites esenciales y de sustancias volátiles, así como el riesgo de degradación de sustancias termolábiles. La mayoría de las plantas medicinales pueden ser secadas a temperaturas que varían entre los 30 y 60 grados centígrados.

El proceso de secado de esta planta debe ser realizado a la sombra, extendiendo las plantas sobre una superficie limpia en capas finas, para evitar la fermentación. Este proceso no permite el control de la temperatura, los mejores resultados se obtienen utilizando secadores solares. (Soto 2001).

1.2. Antecedentes.

Los secadores solares son una alternativa para el secado en los países en desarrollo, aunque el secado al aire libre es el método de conservación más utilizado por los pequeños agricultores (Bérriz L. 1993). Teniendo en cuenta que un alto porcentaje de estos agricultores no tienen acceso a la red eléctrica, y el uso de energías de origen fósil no ha sido factible debido a sus altos costos, entonces una alternativa eficaz de secado de sus productos es el uso de energías renovables.

Para los productores agrícolas de pequeña escala solamente son significativas las actividades e inversiones que aumentan considerablemente sus ingresos, bien sea reduciendo directamente los costos o aumentando la productividad. Por lo tanto, a menos que los sistemas de secado solar ofrezcan beneficios excepcionalmente atractivos en comparación con el secado al aire libre u otros sistemas de secado, no será posible en la práctica mejorar su aceptación. Partiendo de esta situación, es necesario realizar un gran esfuerzo por conocer y mejorar el proceso actual de secado solar de productos agrícolas, y así, reducir las pérdidas poscosecha, aumentar la calidad de los productos, incrementar la eficiencia del proceso y lograr una mayor aceptación por parte de los agricultores (Mujumdar A. S 2000).

Existen reportes de secadores para plantas medicinales y aromáticas (Romero, Mejorana y Moghat) en la India (Hassanain A. 2010), secador para Te Mexicano (Ethmane C. S. 2008) vegetales como la cebolla (Sarsavadia P 2007), secador para tomate en Costa Rica (Nandwani S. 2005), secador para hierbas y especias (Janjai S. y Tung P. 2005). Todos los trabajos anteriormente mencionados tienen una característica común; son secadores de circulación

natural o por métodos tradicionales de secado natural además de sus pequeñas dimensiones ya que son para producciones de pequeños volúmenes.

México se ha desarrollado tecnologías para el aprovechamiento de las energías renovables en el secado con grandes avances. La Universidad Autónoma de México (UNAM) ha desarrollado tecnologías para el secado de productos agrícolas y dentro de ellas se destacan: Secador Solar para Arroz de Morelos (Pilatowsky 2002), Secador de Madera (Kneule F, 1982), Secador Solar para Granos.(Gana, 2008). En la Universidad Autónoma de Guanajuato y la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) en el sureste de México se ha trabajado intensamente en el desarrollo de tecnologías e investigaciones en el uso de las energías renovables. En esta última el Cuerpo Académico Consolidado de Energía y Sustentabilidad ha desarrollado proyectos de secadores solares tales como: Secador Multipropósito para Granos, Secador con Acumulación Térmica y Circulación Natural para Queso, Secador Mixto con Circulación Termosifónica y Forzada para productos agrícolas, Secador de Tiro Forzado para Frutas, Secador de Tiro Natural para Frutas entre otros. Como vemos se han obtenido grandes avances en el campo del secado solar, pero no específicamente en el secado de plantas aromáticas y medicinales.

La producción del Té Limón como planta aromática y medicinal siempre ha sido una siembra de traspatio para aplicaciones familiares en extensiones limitadas; en el Municipio de Cintalapa en el estado de Chiapas, México, se ha convertido en un producto de alta importancia económica ya que es cultivado de forma extensiva para su exportación. La empresa Alemana Bauer lo está

comprando en pacas secas que se exportan a través del puerto de Veracruz, para darle un tratamiento industrial y extraerle sus aceites esenciales y proporcionar las aplicaciones ya mencionadas.

Por no existir la necesidad anterior de secar grandes cantidades de Té Limón no se había desarrollado una tecnología que además de hacerlo con calidad, procesará gran cantidad de producto y en poco tiempo.

1.3. Planteamiento del problema.

El proceso de secado puede llevarse a cabo por evaporación o vaporización con ayuda de calor (secado mediante aire calentado), mediante procesos físico-químicos (liofilización, osmosis, absorción, congelación) y a través de medios mecánicos (presión, vibración, filtrado y centrifugado, (Togrul y Pehlivan 2004).

El secado por evaporación térmica es la manera más usada para la deshidratación, en ella existe una mezcla de procesos de transferencia de calor y masa: la transferencia de calor puede llevarse a cabo por conducción, convección y radiación y el proceso de transferencia de masa o humedad de la superficie del producto al agente desecante se realiza por evaporación. Cuando la humedad está en la superficie solo se necesita calor para eliminar esa humedad superficial pero cuando está en el interior hay que lidiar con los fenómenos de capilaridad, difusión de vapor y flujo de moléculas. (Navarrete y Torres. 2009).

En Cintalapa no existe un proceso para el deshidratado de grandes volúmenes de Té Limón como se demanda; en estos momentos lo hacen de forma natural y muy rustica, bajo pequeños techos al aire libre, como se pudo

observar en la figura 1.2, secándose como promedio en 5 días y además con los peligros latentes de contaminación con polvo, ratas e insectos y bajo la influencia negativa de los cambios climáticos como excesivo sol o frío y con el riesgo de rehidratarse cuando llueve. Además se está entregando al cliente un producto “seco” a la vista y al tacto presentándose problemas de calidad ya manifestados por el comprador como la pérdida del color verdoso que debe mantener la planta después de seco como se muestra en la figura 1.3. Conjuntamente muchos productores quieren comenzar su cultivo y están limitados por la capacidad de secaderos. Por tanto la Unión de Productores de Zonas Marginadas del Estado de Chiapas en Cintalapa, que agrupa y organiza a los productores de Té Limón ha proyectado una nave de secado que es una extensión del método tradicional persistiendo los problemas de calidad y productividad conocidos.



Figura 1.3 Comparación del Té Limón con características exportables (Izquierda) y él producido en Cintalapa (derecha). Foto del autor.

En lo referente al secado del Té Limón no se ha encontrado en la bibliografía una instalación para su deshidratación, si existen secadores solares para otras hiervas aromáticas y medicinales tales como: Romero, Albahaca, Tomillo, con buenos resultados pero son secadores de tiro natural y para pequeñas

cantidades de productos con las siguientes desventajas respecto al secado solar artificial en una secadora solar de tiro forzado:

- Secado lento y por tanto bajas productividades.
- La necesidad de tener una entrada y salida del aire ambiente al secador constantemente no aprovechándose así todo el potencial de absorción de humedad que tiene el aire y la posibilidad que con el aire entren agentes contaminantes antes mencionados.
- Un flujo de aire no homogéneo a través de la masa de producto a secar
- Influencia de agentes climáticos externos como la lluvia y el viento que pueden acelerar los procesos de putrefacción y deterioro propios de los productos biológicos.
- No se controlan los parámetros propios del proceso de secado, tales como humedad relativa del aire dentro del secador, temperatura de secado, velocidad del aire dentro del secador, entre los más importantes.
- La alta temperatura en los secadores solares artificiales constituyen una barrera importante para el ataque de plagas y desarrollo de hongos.

Motivados por la importancia económica que representa el cultivo y exportación del Té Limón para los campesinos del Ejido “Los Joaquines”, además por ser una alternativa de hacer producir tierras que ya no le eran útiles para otras producciones, por los problemas que se presentan en el proceso de deshidratación del Té Limón, asimismo teniendo en cuenta las excelentes condiciones ambientales para las aplicaciones solares que existen en Cintalapa y sabiendo que los secadores solares son una tecnología limpia y que no afectan el medio ambiente, baratas, duraderas y con poco gasto de

mantenimiento; por tanto se propone en esta tesis dar una solución a los problemas que se presentan actualmente en el secado del Té Limón, simultáneamente esta tecnología ofrecerá ventajas en cuanto a la calidad final y la productividad siendo amigable con el medio ambiente y contribuyendo así a la sustentabilidad de nuestro planeta.

1.4 Objetivos e Hipótesis.

1.4.1. Objetivos.

Una vez conocido el problema a resolver se plantea como objetivo general de esta investigación el siguiente.

Diseñar, construir, evaluar y validar un secador solar para la deshidratación del Té Limón, que lo proteja de las fuentes de contaminación tales como polvo, roedores, insectos y de las condiciones ambientales; con un sistema de control de parámetros y un sistema de acumulación térmica que finalmente permita obtener un producto con las propiedades óptimas para su comercialización.

Para poder llevar a buen fin la investigación se ha estructurado el proceso investigativo en varios objetivos específicos que a continuación se exponen.

1.- Diseñar y construir el prototipo de secador solar.

Con el cumplimiento de este objetivo obtuvimos el diseño y finalmente la construcción del prototipo experimental del secador solar para lo cual tuvimos en cuenta los parámetros físicos y meteorológicos que intervienen en el proceso, tales como flujo de aire dentro del secador, temperatura de secado,

humedad inicial y final del producto, características físico – químicas del producto, su humedad de equilibrio, temperatura, velocidad y humedad del aire ambiente, entre otros.

Para el diseño y construcción final del prototipo de secador solar usado para la experimentación organizamos un grupo de tareas que se detallan a continuación:

- 1- Determinación del recurso energético. Pudimos simular y medir la radiación solar que incide en promedio anual y diario en el Municipio de Cintalapa, radiación necesaria para el secado del Te Limón.
- 2- Selección del tipo de secador y su diseño. Analizamos las características del Te Limón para seleccionar un sistema de secado adecuado, de este análisis emanarán las principales características de nuestra instalación experimental.
- 3- Cálculo de la demanda energética. Aquí se buscó la cantidad de humedad que hay que extraerle al Te Limón y la cantidad de energía necesaria para incorporar esta humedad al aire seco circundante para llevarlo hasta su humedad de equilibrio.
- 4- Desarrollo de un sistema de control de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. Se obtuvo un circuito de control automático de control de temperatura y humedad relativa en el interior de la cámara de secado con el fin de lograr la calidad final deseada del producto seco.
- 5- Desarrollo de un sistema de acumulación térmica. En post de reducir el tiempo secado y por ende aumentar la productividad de Té Limón seco, este sistema de acumulación térmica activo acumula energía térmica en

horas de alta incidencia solar y luego este aporte a la cámara de secado el calor acumulado en horas de baja incidencia solar.

6- Dimensionado de la superficie de captación y de la cámara de secado.

Con los datos precedentes se dimensionó el prototipo experimental. En lo fundamental conocer el área de captación, volumen de la cámara de secado y flujo de aire dentro de esta.

7- Construcción del prototipo de secador solar indirecto y de circulación forzada con los sistemas de control de parámetros y del sistema de acumulación térmica.

Una vez diseñado y construido el prototipo de secador solar estamos en condiciones de hacer su evaluación termodinámica y con carga.

2.- Evaluar el prototipo de secador solar.

1- Evaluación en vacío. Se alcanzaron los parámetros térmicos de desenvolvimiento del secador, registrando las temperaturas en diferentes puntos de interés, fundamentalmente en la placa y del aire en el interior de la cámara, así como la humedad relativa de este. Se pudo valorar el comportamiento del sistema de control y de almacenamiento sin producto.

2- Evaluación con carga. Se logró la curva de secado del producto, el tiempo de secado, el comportamiento del sistema de control y de almacenamiento de energía con producto.

3- Procesamiento y análisis de los datos experimentales.

4- Determinación de la eficiencia del sistema.

5- Evaluación de la calidad del producto. Se alcanzaron las principales características físicas – químicas del producto seco y se hará una comparación con los parámetros estandarizados en la Normas Mexicanas (NOM).

3.- Modelar matemáticamente el secador solar propuesto.

El modelo consta dos partes bien diferenciadas, correspondientes a los elementos fundamentales de dicho dispositivo, el captador solar como unidad de precalentamiento del aire y la cámara de secado como la parte en la que se produce propiamente la desecación de los subproductos.

Se tomaron en cuenta variables climatológicas del lugar de emplazamiento del secador, variables relacionadas con los materiales de construcción del colector solar, variables de diseño del colector, parámetros de entrada del aire a la cámara proveniente del colector solar, variables características del producto a secar y otras. Elaboramos dos modelos uno para el colector solar y otro para la cámara que permitió simular los procesos que dentro de ellos ocurren y sirvió para sustentar la propuesta del secador a escala semindustrial.

4.- Validar el modelo propuesto y hacer una propuesta a escala semindustrial.

Con los resultados de las corridas experimentales y los resultados de la modelación matemática se comparó el nivel de coincidencia entre ellos y se validó; y finalmente se propuso un secador solar de Té Limón a escala semindustrial.

El modelo matemático se basó en las ecuaciones que describen el comportamiento del colector y la cámara de secado Su implementación se realizó mediante programación en Visual Basic y la utilización del método numérico iterativo de Rugen-Kutta de orden cuatro. (Arranz 2005).

Ya expuesto nuestros objetivos y la manera en que los desarrollamos,

planteamos ahora las hipótesis que se demostraron en el transcurso de la investigación.

1.4.2. Hipótesis.

- El uso de secadores solares con un ambiente controlado y sistema de acumulación térmica permitiría mejorar la calidad del producto seco, evitar las mermas por deterioro y disminuir el tiempo de secado.
- El desarrollo de un sistema de acumulación de calor permitiría la continuidad del proceso de secado en horas de baja incidencia solar o nocturnas logrando así disminuir el tiempo de secado.
- La implementación de un sistema de control de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire en la cámara de secado permitiría mantener dichos parámetros en un rango de valores deseados.

1.5. Límites del estudio.

Este trabajo resuelve un problema productivo y de calidad que presenta el Té Limón seco final. Se han encontrado investigaciones para el deshidratado solar de productos similares pero con una característica en común que eran para pequeñas producciones y por tanto de circulación natural o convectiva debido a las bondades en el secado de este tipo de producto.

Se utilizó una metodología de diseño conocida pero con las particularidades de este tipo de producto, se implementó un sistema de control automático que garantiza la calidad del Té Limón seco, pudiéndose controlar los parámetros del proceso de secado con precisión, además se implementó un sistema de

acumulación de calor que acortó el periodo de secado para así aumentar su productividad.

Se realizó una caracterización exhaustiva de la calidad del Té Limón. Se tomaron muestras del Té Limón secado en la instalación experimental y en las instalaciones reales en el municipio de Cintalapa. Se pudo concluir que la calidad del producto seco en el prototipo experimental es superior y que se deshidrata en la mitad del tiempo en que lo logran los productores. En este aspecto lo más importante es que el porcentaje de aceites esenciales solo varía del húmedo a seco en un 3 %, lo que nos indica que el proceso de secado propuesto es muy eficiente y entrega un producto de alta calidad, además de que las características organolépticas se conservan muy bien en la planta seca.

Se plantea el modelado matemático de la instalación experimental que nos permite simular teóricamente el comportamiento de las principales variables dentro del secador, como son: temperatura del aire a la entrada y salida del colector, temperatura del producto dentro de la cámara de secado, eficiencia instantánea del colector solar, temperatura de la placa absorbidora. Además facilitó hacer la propuesta de una instalación a escala semindustrial, instalación que dará respuesta a la problemática plantada en esta tesis.

1.6. Justificación.

La tecnología de secado del Té Limón después de su cosecha empleada por los productores en el Municipio Cintalapa, han permanecido prácticamente sin evolucionar, el secado natural es económico pero propicia la pérdida de calidad del producto y la poca posibilidad de protegerla de ataques biológicos o

de los efectos climáticos como la lluvia y el sol, que aceleran los procesos de putrefacción y deterioro propios de los productos orgánicos.

Se propone un sistema de secado de Té Limón, que ayude a resolver los problemas que se presentan en la calidad final del producto seco y que aumente la productividad disminuyendo el tiempo de secado.

La propuesta de un deshidratador solar además ser una tecnología limpia y de no afectar el medio ambiente, son tecnologías baratas y duraderas con poco gasto de mantenimiento. Además existe la necesidad de una tecnología para secar Té Limón después de su cosecha con el consiguiente ahorro energético ya que usa una fuente barata de energía y con las ventajas ambientales que esta ofrece por ser amigable con el medio y contribuyendo a la sustentabilidad de nuestro planeta.

Esta tecnología puede ser autónoma, por lo que es muy flexible su uso en comunidades donde no tiene acceso a la energía eléctrica, sólo con la instalación de un pequeño módulo fotovoltaico que alimente al ventilador y la bomba que son equipos de muy bajo consumo.

Esta tecnología no sólo podría ser usada para la deshidratación de plantas aromáticas y medicinales, sino es muy versátil, con pocas adaptaciones en el interior de la cámara podría utilizarse para otras producciones agrícolas.

1.7. Estructura de la Tesis.

El trabajo desarrollado en la tesis, parte en primer lugar de la detección de un problema productivo y de calidad que se ha estado presentando en el Té Limón deshidratado por los productores en Cintalapa, este producto no presenta una

buena calidad después de su deshidratado y además se secaba como promedio en 5 días.

Esta tesis esta dividida en lo fundamental en 5 capítulos cuyos principales contenidos se detalla a continuación.

Capítulo 1. Generalidades. Se da una información general y los principales antecedentes de deshidratado del Té Limón, producto objeto de estudio, se definen los problemas de calidad y productividad que presenta en su secado, una vez conocido el problema se expone el objetivo general y los particulares así como las hipótesis. Se plantean las razones porque se hace esta investigación y damos conclusiones

Capítulo 2. Fundamentación teórica. En exponer ampliamente la teoría relacionada con el secado de productos agrícolas, también se abordan las características termodinámicas del aire húmedo como agente de trabajo. Se hace un estudio del sol como fuente de energía y de la cinemática solar necesaria para el proceso de modelado. Se muestra las características de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra.

Capítulo 3. Métodos. Se exponen de forma amplia el diseño investigativo, se explican todos los procedimientos de cómo se van a ir cumpliendo los objetivos y tareas que se plantearon en esta tesis. Primero el diseño y construcción del prototipo de secador, luego como se va a realizar la evaluación en vacío y con carga del prototipo. Se muestra como se realiza el modelado matemático de la cámara de secado y del colector solar para finalmente validar dicho modelo con la evaluación real del sistema de secado.

Capítulo 4. Análisis de resultados. Se van presentado y analizando al mismo tiempo cada uno de los resultados obtenidos en el proceso de diseño,

construcción, evaluación, modelación y validación del prototipo del secador. Además se hace una propuesta de una instalación de secado semindustrial.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajo futuro. Se presentan las principales conclusiones de la tesis entre ellas están. El sistema de secado propuesto trae ventajas tanto en calidad final del producto seco como en la productividad. El Té Limón seco en la instalación experimental tiene una calidad óptima para su comercialización. El modelo matemático descrito nos da la posibilidad de expandir a escala una instalación de secado similar para otros productos agrícolas.

1.8 Conclusiones.

En este capítulo se expone el problema de calidad y productividad que se presenta en la obtención del Té Limón seco en el municipio de Cintalapa. Basado en este problema se planteó como objetivo general el diseño, construcción, evaluación y validación de un secador solar para el deshidratado solar del Té Limón con las ventajas que esto implica, con un sistema de control automático de parámetros para mejorar calidad y un sistema de acumulación térmica para aumentar la productividad. Para el cumplimiento del objetivo general se plantearon los particulares siguientes: 1.- Diseñar y construir el prototipo de secador solar. 2.- Evaluar el prototipo de secador solar. 3.- Modelar matemáticamente el secador solar propuesto. 4.- Validar el modelo propuesto y hacer una propuesta a escala semindustrial.

Se justifica la propuesta porque es una tecnología que protege al producto de la acción dañina de agentes biológicos y climatológicos; además de ser limpia,

barata, flexible, duradera, puede ser autónoma, con escasos gastos de mantenimiento, de bajo gasto energético y amigable con el medio ambiente.

Se expone la estructura de la tesis con las principales acciones cronológicas a seguir y las conclusiones más importantes.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

2.1 Introducción.

Este capítulo centra su contenido en toda la teoría que permite afrontar el reto de dar cumplimiento del objetivo principal. Se hace un análisis de los principales antecedentes en el desarrollo de secadores solares fundamentalmente aquellos usados para el secado de plantas medicinales y aromáticas, haciendo énfasis en el análisis de trabajos hechos en México y en nuestro estado de Chiapas.

Se analizan los conceptos relacionados con el secado de productos entre ellos el contenido de humedad del producto, las curvas de secado y de humedad, la actividad del agua, análisis de la teoría de la difusión del agua dentro de un producto, estudio de las propiedades del aire húmedo que será nuestro fluido de trabajo. Una vez conocida la teoría de secado, se estudian los tipos de secadores para conocer sus características, su clasificación y ver la relación de sus diseños con el trabajo de desecación que realizan y así justificar la selección que se hizo.

Se hace un análisis de todas las propiedades termodinámicas del aire húmedo como agente de trabajo y su evolución dentro de un secador.

No se puede dejar de analizar la fuente de calor, el Sol, para poder comprender las características fundamentales que tiene la energía solar, su dispersión y su intermitencia; y conocer el desarrollo posterior de los modelos matemáticos sobre la radiación incidente en la Tierra. Y finalmente se dedica un espacio a la medición de esa energía que proviene del sol.

2.2 – Marco teórico.

2.2.1- Teoría del secado solar.

El **secado** es una operación básica que consiste en reducir la humedad de un producto a niveles que mantenga una humedad en equilibrio con la humedad relativa del ambiente (Aviara et al. 2002).

En general, los principales objetivos que se suelen perseguir en las operaciones de secado pueden agruparse en los siguientes.

- Facilitar un proceso industrial posterior para la utilización satisfactoria, final o intermedia, de un determinado producto.
- Posibilitar la conservación, almacenamiento y transporte del material.
- Reducir costos (almacenamiento, transporte, conservación, disminución consumo combustible, etc.).
- Mejorar el rendimiento de una instalación o equipo.
- Permitir el posterior aprovechamiento de subproductos.

Los mecanismos de transferencia de agua en los productos que se están secando se pueden resumir en los siguientes (Fito et al. 2001):

- Movimiento del agua bajo fuerzas capilares.
- Difusión del líquido por gradientes de concentración.
- Difusión superficial.
- Difusión de vapor de agua en los poros llenos de aire.

- Flujo debido a gradientes de presión.
- Flujo debido a la vaporización – condensación de vapor de agua.

El secado por evaporación térmica que es del que se ocupa este trabajo es una de las formas más usadas para la deshidratación, en ella existe una mezcla de procesos de transferencia de calor y masa como se ilustra en la figura 2.1 la transferencia de calor puede llevarse a cabo por conducción, convección y radiación y el proceso de transferencia de masa o humedad de la superficie del producto al agente desecante se realiza por evaporación. Básicamente ocurren fenómenos tales como: Transferencia de Calor del agente secante al producto y transferencia de masa desde el interior del producto hacia la superficie y de esta al medio que lo rodea. (Van Arsdel N. B. y Copley M. J. 1963).

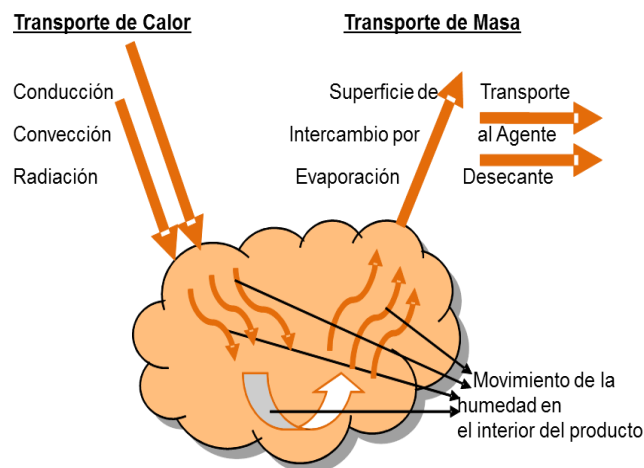


Figura 2.1 Procesos de transferencia de calor y masa durante el secado. Cortesía del autor.

Los consumos energéticos en los procesos de secado son elevados, dicho problema se puede enfrentar de la siguiente forma: Modificación de las técnicas y de los procesos de deshidratación actuales buscando un mayor rendimiento y

aumento de su eficiencia y la utilización de Energías Alternas, tales como el uso de la biomasa y de la energía solar que son las que más ventajas nos ofrecen. (Fito et al. 2000).

La conservación por secado provoca los siguientes cambios en los productos:

- Para productos orgánicos con bajo contenido de azúcares (hojas, verduras, algas), la disminución de humedad por debajo de niveles críticos demora la proliferación de hongos, pudrición y otros fenómenos que deterioran los alimentos.
- En el caso de productos con azúcares (por ejemplo frutas), el secado, además de retardar el deterioro por la menor humedad, aumenta la concentración de azúcares. Por lo tanto el producto seco y con elevada tenencia de azúcares tiene una fuerte resistencia al deterioro.
- En el caso de productos especialmente sensibles (por ejemplo carnes o pescados), el secado se puede combinar con un salado. Aquí, el producto seco con una alta tenencia en sal es resistente al deterioro.

2.2.2- Contenido de humedad.

El factor de mayor influencia en la cinética de secado de un producto es su contenido de humedad. El agua no se encuentra ligada a los productos de la misma forma, unos la tienen muy liberada y otros la presentan como parte de su estructura. Según esta naturaleza la forma en que el agua está ligada al producto puede ser: (Kneule. 1982).

Líquido adherente. Forma una película encima de la superficie exterior de la materia seca.

Líquido capilar. Queda atrapada en los intersticios de la materia porosa (superficie interna del producto).

Líquido inchado. Forma parte integral de la fase del producto (union coloidal).

La humedad es la masa de agua que contiene una masa unitaria de sólidos. Así, si se tiene 1 kg de producto fresco, se dice que tiene un 80% de humedad si del kilogramo, 800 gramos son agua y 200 gramos son sólidos. Este se determina de la siguiente manera: se toma una masa unitaria de material a ensayar. Luego se introduce en una estufa a 105°C y se va registrando las pérdidas de peso hasta que se mantenga contante. Allí se determina la masa seca. Como se conoce la masa inicial, se puede calcular el contenido de humedad. Típicamente se define el contenido de humedad de dos formas diferentes: la humedad base húmeda y la humedad base seca: (Nijmenh M.et al. 1998).

La humedad base húmeda (M_{wb})

$$M_{wb} = \frac{W_w}{W_0} = \frac{W_0 - W_d}{W_0} \quad (2.1)$$

La humedad base seca (M_{db})

$$M_{db} = \frac{W_w}{W_d} = \frac{W_0 - W_d}{W_d} \quad (2.2)$$

Donde M_{wb} es el contenido de humedad en base húmeda (*Kg de agua / Kg de producto húmedo*); M_{db} es el contenido de humedad base seca (*Kg de agua / Kg de producto seco*); W_0 es el peso inicial del producto húmedo (*Kg*); W_w es la cantidad de agua en el producto húmedo (*Kg*) y W_d es el peso de la materia seca en el producto (*Kg*).

La relación que hay entre estas dos humedades es la siguiente:

$$M_{wb} = 1 - \left[\frac{1}{M_{db}+1} \right] \quad (2.3)$$

$$M_{db} = 1 - \left[\frac{1}{1-W_{wb}} \right] - 1 \quad (2.4)$$

Habitualmente en ingeniería y más concretamente en ensayos de secado, donde el producto se va pesando de forma regular generando un registro de pérdida de peso, el contenido en humedad instantáneo para cualquier tiempo t , en base húmeda o seca, se obtiene respectivamente mediante las expresiones:

$$M_{twb} = 1 - \left[\frac{1-M_{owb}*W_b}{W_t} \right] \quad (2.5)$$

$$W_{tdb} = \left[\frac{(M_{odb}+1)*W_o}{W_t} \right] \quad (2.6)$$

Donde M_{owb} y M_{odb} son los contenidos de humedad inicial en base húmeda y seca (decimales); W_t es el peso del material (Kg) y W_b y W_o son las humedades iniciales en base húmeda y seca (decimales) respectivamente.

2.2.3 - Curva de secado.

Como se expresó en el proceso de secado de un producto cuando se mide su peso en intervalos fijos de tiempo se puede trazar una curva de contenido de humedad contra tiempo (figura 2.2), curva muy importante en la cinética de secado. La curva de secado se puede determinar con la siguiente expresión: (Navarrete y Torres 2004; Kneule F. 1982).

$$DR = \left(\frac{dM}{dt} \right) \quad (2.7)$$

$$DR = (M_{t+dt} - M_t) / dt \quad (2.8)$$

DR es la curva de secado (Kg_{agua} / Kg_{seco}); M es la masa del producto (Kg) y dt es la variación del tiempo.

Los productos agrícolas difieren de otros porque estos son higroscópicos y el agua está ligada a su estructura de forma que no se pueden secar hasta humedades cercanas a cero, sin embargo en los productos agrícolas la humedad está generalmente atrapada en capilares donde podemos llegar a ellos y bajar la humedad hasta valores bien bajos pero siempre quedara un contenido de humedad residual.

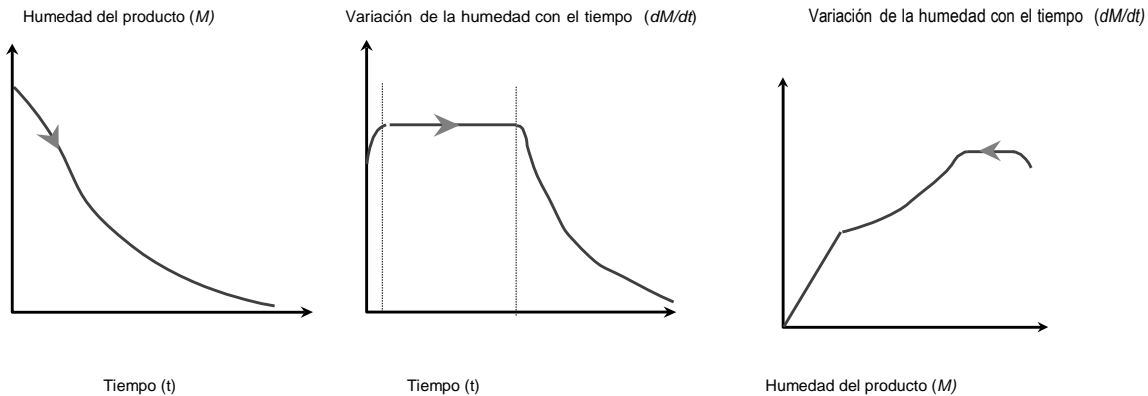


Figura 2.2 Curvas de secado.

2.2.4 - Curvas de humedad

Estas curvas de humedad ofrecen una información valiosa y está referida al comportamiento en el proceso de secado del contenido de humedad del producto. Las curvas de humedad se calculan por la expresión. (Navarrete y Torres. 2004).

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (2.9)$$

Donde MR es la curva de humedad (%); M_t es el contenido de humedad en cada instante (Kg); M_e es el contenido de humedad de equilibrio (Kg) y M_o es el contenido de humedad inicial (Kg).

Pero como la humedad relativa del ambiente fluctúa mucho es difícil determinar con exactitud el contenido de humedad de equilibrio por tanto se puede expresar este término para cálculos prácticos como sigue. (Navarrete y Torres. 2004).

$$MR = \frac{M_t}{M_o} \quad (2.10)$$

La pérdida de humedad de los productos obedece a cambios en la velocidad de secado perfectamente definida y que pueden ser clasificados en tres etapas o fases que veremos más adelante (figura 2.3). (Navarrete y Torres 2004).

Fase de Secado Constante. Período de aumento súbito de la velocidad de secado, durante el cual permite que la superficie del material a secar alcance la temperatura de bulbo húmedo de la corriente de aire de secado, regularmente este periodo es corto dependiendo del tipo de material que se trate por lo que puede no ser tan importante, aquí se produce básicamente el calentamiento del producto.

Fase de Transición. Período de velocidad de secado constante. Se lleva a cabo a temperatura constante, este se debe a que la superficie del material se mantiene en condiciones de saturación y por lo tanto, la presión de vapor del agua en el producto es igual a la presión de vapor del agua 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 material, el coeficiente de transferencia de masa y calor en la interface sólido - gas y a la transferencia interna de humedad y de las condiciones del medio de secado. Aquí se evapora la humedad superficial del producto. La velocidad de secado no depende en lo fundamental del tipo de material sino de la temperatura del aire circundante. En materiales no higroscópicos su secado ocurre en su totalidad en esta fase.

Fase Decreciente de Secado. Aquí la velocidad de secado es decreciente. La resistencia interna del material a ceder su humedad aumenta, ya no existen condiciones de saturación en la superficie y comienza la eliminación de la humedad interna del material, es aquí que entra a su rol más importante la forma en que está ligada el agua a la estructura del material, a su vez esta etapa está dividida en dos fases, la primera en que se evapora la superficie no saturada del material donde baja la velocidad de secado y luego comienza la extracción de las partes más lejanas a la superficie del material.

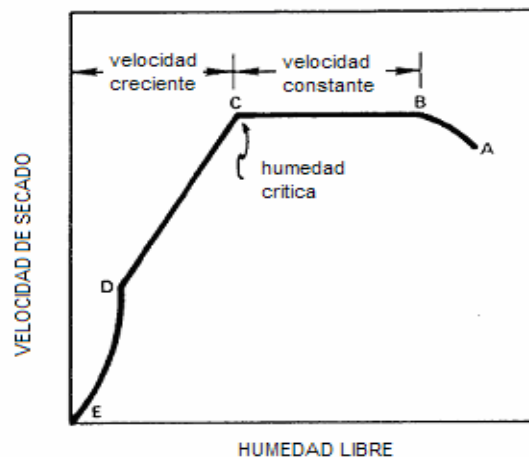


Figura 2.3 Diversas fases en el proceso de secado.

2.2.5 - Curvas de humedad de equilibrio. Actividad del agua.

El concepto de actividad del agua en un material permite expresar el grado de libertad que tiene el agua contenida en él. Así, un producto intercambia agua con el ambiente que lo rodea hasta que se establece una situación de equilibrio. En estas condiciones, el valor de la humedad relativa del aire (en tanto por uno) recibe el nombre de actividad de agua del producto (A_w). De esta forma, la humedad relativa de equilibrio del aire en contacto con el agua libre es del 100 % y, por tanto, su actividad es 1.

La actividad del agua o el contenido de humedad de equilibrio están determinados por el tipo de material a tratar, su temperatura y su humedad. Así, un producto tiene una presión de vapor característica para cada temperatura y humedad contenida. Esto determina si el material adsorberá o emitirá humedad en su exposición al aire.

Para un valor determinado de la temperatura se puede encontrar para cada producto, experimentalmente, una correspondencia entre la actividad de agua y el contenido de humedad de equilibrio de éste. A estas relaciones se las denomina isotermas de sorción del material. Los puntos de una curva de sorción indican para cada material, a una determinada temperatura, el contenido de humedad en el producto que se encuentra en equilibrio con aire a una humedad relativa dada.

Las isotermas de sorción aportan información sobre los contenidos de humedad que deben alcanzarse a fin de conseguir un proceso adecuado para la conservación y almacenamiento de los productos, y además, permiten

conocer cuál es el contenido de humedad mínimo que puede lograrse en un proceso donde el material se expone a una corriente de aire con una temperatura y humedad relativa determinada.

Como ejemplo, en la figura 2.4, se muestra el efecto que usualmente tiene la temperatura en las isothermas de sorción, de manera que conforme aumenta la temperatura a una determinada humedad relativa, disminuye el contenido de humedad de equilibrio.

La humedad de equilibrio de un material higroscópico es aquella que presentará el mismo después de estar expuesto a un ambiente con condiciones especiales o particulares un tiempo suficientemente largo (Kneule. 1982). Para un valor determinado de temperatura podemos encontrar para cada producto una relación entre la actividad del agua y la humedad de equilibrio de éste, a esta relación se le llama isothermas de sorción del material mostradas en la figura 2.3. (Mujumdar 2000).

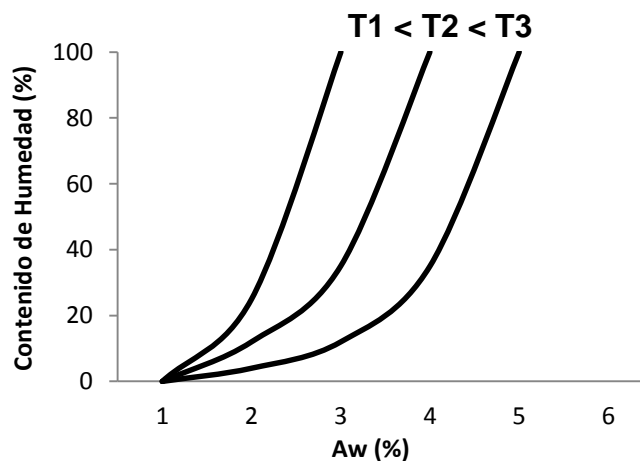


Figura 2.4 Isothermas de sorción a diferentes temperaturas.

Un problema diferente es saber cuál es la humedad de equilibrio, bajo determinadas condiciones ambientales. Esto significa establecer bajo qué condiciones de humedad ambiente el producto no gana ni pierde humedad.

La casi totalidad de los alimentos son higroscópicos, por ello tienden a retener humedad en su estructura celular interna. Es importante conocer las condiciones de humedad de equilibrio para así determinar las condiciones de almacenamiento. En efecto, si la humedad ambiente (presión de vapor) es mayor que la máxima humedad que garantiza su conservación, entonces el producto ganará humedad y tenderá a deteriorarse, en este caso el envasado debe ser hermético.

Las curvas de humedad de equilibrio son muy específicas para cada producto, además dependen de las condiciones de almacenamiento. En la figura 2.5 se ilustra un caso genérico del secado de un producto, como se puede apreciar la humedad del producto va disminuyendo hasta que en valores entre el 12 % y el 10 % tiende a mantenerse constante, entonces podemos decir que hemos llegado a su humedad de equilibrio.

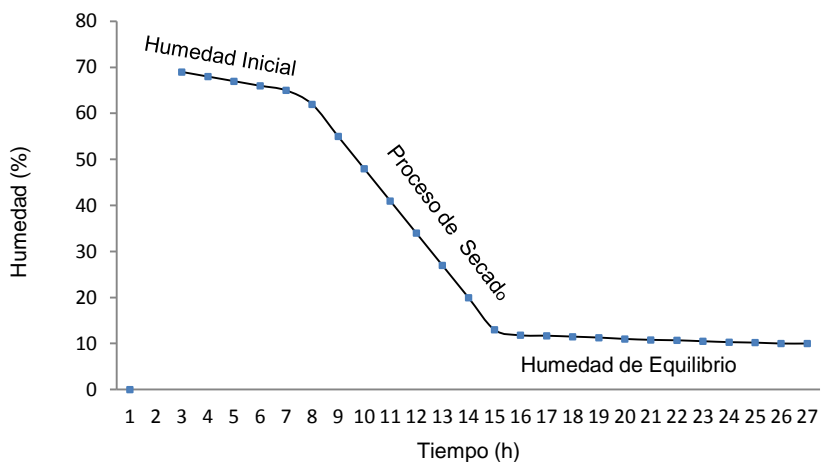


Figura 2.5 Curva típica de la variación de humedad de un producto hasta su humedad de equilibrio.

2.2.6 Teoría de la difusión del agua.

El principal mecanismo en el secado es la difusión del agua. (Van Brakel J. 1980). La difusión se da en sólidos de estructura fina y en los capilares, poros y pequeños huecos llenos de vapor; el vapor se difunde hacia afuera hasta alcanzar la superficie por donde pasa corriente de aire seco, desafortunadamente esta teoría no tiene en cuenta el encogimiento o casos de endurecimiento. (Van Arsdel N. B. y Copley M. J. 1963).

La ley de Fick aplicada a un sistema unidimensional según la figura 2.6 se puede expresar como:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (2.11)$$

Donde X es el contenido de humedad libre; t el tiempo, x es la dimensión espacial y D_{ef} es el coeficiente de difusión.

La solución de la Ley de Fick para diferentes geometrías es como sigue. Escogimos las configuraciones de lámina y cilindro que son las geometrías que más se adaptan a la del Té Limón (Tallo y Hoja).



Figura 2.6 Mecanismo de difusión superficial en el transporte de vapor de agua.

Lámina.

$$\Gamma = \frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{h_n^2} e^{\left(\frac{-h_n^2 \pi^2 D_{ef} L}{4t^2} \right)} \quad (2.12)$$

$$h_n = 2n - 1$$

Cilindro.

$$\Gamma = \frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{4}{r^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\beta_n^2} e^{(-\beta_n^2 D_{ef})} \quad (2.13)$$

Donde X_0 es el contenido de humedad inicial; X_s contenido de humedad en la superficie; L es el espesor de la lámina; r es el radio del cilindro; β_n son las raíces de la función Bessel de primera clase y de orden cero, D_{ef} es el coeficiente de difusión efectiva. (Okos M. R. et al. 1992).

Cuando el producto se está secando se pueden presentar dos situaciones: Movimiento del líquido o del vapor hacia la superficie debido al gradiente de concentración del agua en el producto.

El movimiento del agua en el producto se puede explicar por medio de la teoría de la difusión de Knudsen donde este flujo de agua va a depender del tamaño y cantidad de poros, tortuosidad y geometría del sólido como se presenta en la siguiente ecuación:

$$\frac{dX}{dt} = -\varepsilon\tau\beta\rho D_x \quad (2.14)$$

$$D_x = \frac{2d}{3} = \left(\frac{2RT}{\pi M}\right)^{0.5} \quad (2.15)$$

Donde ε es la porosidad; τ es la tortuosidad; β es un factor geométrico; ρ densidad.

D_x es la difusividad de Knudsen; R es la constante universal de los gases, T temperatura; M masa molecular del agua y d diámetro del poro.

Considerando, que el coeficiente de difusión es constante, que la distribución de humedad inicial es uniforme, que el material no se encoge y para las siguientes condiciones de frontera:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = 0 \quad X = 0 \quad \text{en el centro de la placa}$$

$$X = X_s \quad \text{en la superficie}$$

Para una placa infinita, la solución de la ecuación de Fick en términos de la humedad es:

$$\Gamma = \frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{\pi^2} \left\{ e^{-D_{ef} t \left(\frac{\pi}{2x_1}\right)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_{ef} t \left(\frac{\pi}{2x_1}\right)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_{ef} t \left(\frac{\pi}{2x_1}\right)^2} + \dots \right\} \quad (2.16)$$

Donde X es el contenido de humedad en base de sólido seco en cualquier tiempo t ; X_s es el contenido de humedad equilibrio con las condiciones externas o humedad superficial; X_0 es el contenido de humedad inicial; D_{ef} es el coeficiente de difusividad efectivo del líquido, x_1 mitad del espesor de la placa (hija de Te Limón). La ecuación 2.16 presupone que la evaporación se está efectuando desde dos caras opuestas del sólido. Cuando sólo se efectúa la evaporación desde una sola cara, x_1 es el espesor total de la capa sólida. Cuando es un tiempo muy largo, se obtiene el límite de la ecuación dado por:

$$\Gamma = \frac{X - X_s}{X_0 - X_s} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-D_{ef} t \left(\frac{\pi}{2x_1}\right)^2} \right] \quad (2.17)$$

De donde puede derivarse una expresión para la velocidad de secado por la ecuación siguiente:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\pi^2 D}{4x_1^2} (X - X_s) \quad (2.18)$$

Esta ecuación establece que cuando en el proceso de secado predomina la difusión:

- La velocidad de secado es proporcional a la Difusividad y la humedad libre.
- El tiempo de secado es proporcional al cuadro del espesor del material.

También es posible definir una constante de la ecuación 1.16 según:

$$K = \frac{\pi^2 D}{4x_i^2} \quad (2.19)$$

Que al sustituirla en la ecuación 1.18 resulta.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -K(X - X_s) \quad (2.20)$$

La velocidad de secado tiende a cero al tiempo por eso el signo negativo en la ecuación 2.20; en que el contenido de humedad presente en el sólido alcanza la presión de vapor en el equilibrio con las condiciones del aire que rodea al material.

Energía de activación.

La energía de activación es la energía que necesita un sistema antes de poder iniciar un determinado proceso. La energía de activación suele utilizarse para denominar la energía mínima necesaria para que se produzca una reacción química dada. Para que ocurra una reacción entre dos moléculas, éstas deben colisionar en la orientación correcta y poseer una cantidad de energía mínima. Esto requiere energía (energía de activación) y proviene del calor del sistema, es decir de la energía traslacional, vibracional, etcétera de cada molécula. Si la energía es suficiente, se vence la repulsión y las moléculas se aproximan lo

suficiente para que se produzca una reordenación de los enlaces de las moléculas. La ecuación de Arrhenius proporciona la base cuantitativa de la relación entre la energía de activación y la velocidad a la que se produce la reacción. El estudio de las velocidades de reacción se denomina cinética química.

Una pequeña cantidad de calor aportada puede bastar para que el proceso de secado de un producto se desencadene. La energía de activación se expresa por medio del modelo de Arrhenius, que relaciona la difusividad con la temperatura.

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_o) - \frac{E_a}{RT} \quad (2.21)$$

Donde D_{ef} es el coeficiente de difusividad efectiva (m^2/s); D_o es el factor o contante de Arrhenius (m^2/s); E_a es la energía de activación (J/mol); R es la constante universal de los gases ($8,3143 J/mol K$) y T la temperatura (K).

2.3 Propiedades psicrométricas del aire húmedo.

En el proceso de secado influye de forma definitiva las características del agente desecante en este caso aire húmedo (mezcla de aire seco y vapor de agua), cuya información esta recogida en la carta psicrométrica (figura 2.7). (Cengel, y Boles, 1996).

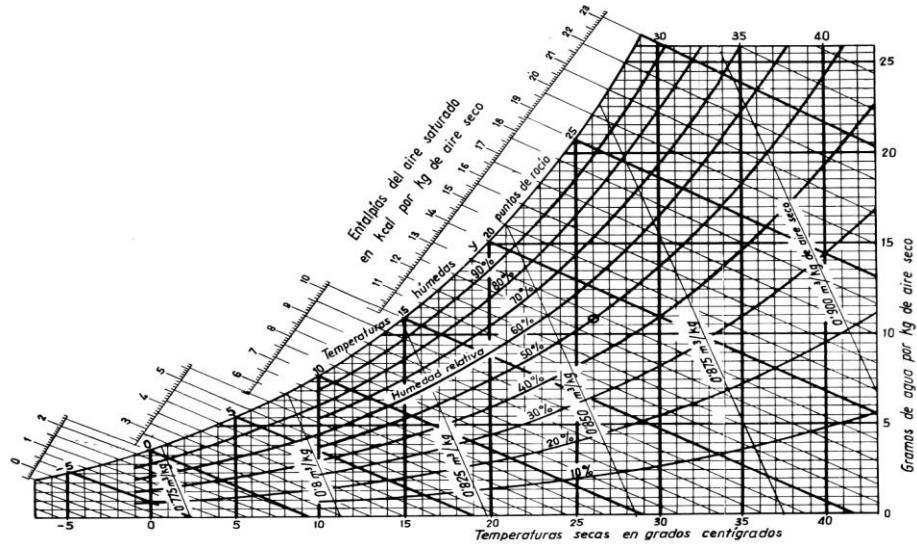


Figura 2.7 Carta Psicrométrica del aire húmedo. Diagrama Mollier.

La necesidad térmica para secar un producto se llama calor latente de vaporización (Lt), representa la cantidad de energía que debe absorber el producto para evaporar su humedad, o sea la energía necesaria para el cambio de fase, para el agua libre es de alrededor de 2450 KJ/Kg a 20°C , su valor en función de la temperatura puede determinarse por: (Giner y Gely. 2005).

$$Lt = R/M_w[(P_{s1} - P_{s2}T)] \quad (2.22)$$

Donde Lt es el calor latente de vaporización del agua (J/Kg), R es la constante universal de los gases (8314 J/(Kmol K)); M_w es el peso molecular del agua (18.01 Kg/Kmol); $P_{s1} - P_{s2}$ son las constantes de la ecuación con valores 6547.01 y 4.23 respectivamente y T la temperatura absoluta (K).

Pero en los productos el agua no esta libre por tanto es mas difícil extraerla por lo que el calor latente de vaporización es mayor y dependera del tipo de producto, su humedad y temperatura.

Por otro lado si la humedad relativa del ambiente es mayor que la actividad del agua que le corresponde a su contenido de humedad este absorbe humedad, por tanto no basta suministrar calor al material sino que necesitamos tener una humedad relativa del ambiente lo mas baja posible, por eso es necesario precalentar el aire para secar.

Según los principios de la Termodinámica el aire puede considerarse un Gas Ideal que tiene las siguientes propiedades: (Cengel y Boles 1996).

Presión Total (de aire seco y vapor de agua). Es la suma de las presiones parciales de sus componentes (aire y vapor de agua), en condiciones normales la presión absoluta es de 101.325 KPa (1 atm), las presiones parciales de sus componentes se determinan por la ecuación de estado para gases ideales.

$$P_t = P_{as} + P_v \quad (2.23)$$

$PV = MRT$ Ecuación de los Gases Ideales.

$P_{as}V = \left(\frac{m_{as}/M_{as}}{RT}\right)$ Es la presión parcial del aire seco.

$P_vV = \left(\frac{m_v/M_v}{RT}\right)$ Es la presión parcial del vapor de agua.

m_{as} y m_v son las masas de aire seco y de vapor de agua (Kg).

M_{as} y M_v el peso molar o masa molar del aire seco y del vapor de agua (g/mol).

Presión de Saturación: la presión en la línea de saturación del aire.

$$P_{vs} = 610.78 * e^{\frac{17.269 * T_s}{273.3 + T_s}} \quad (2.24)$$

Humedad Absoluta: Es la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco.

$$w = \frac{m_v}{m_{as}} \quad \text{y en función de la presión} \quad w = 0.69128 \left[\frac{P_v}{(P_t - P_v)} \right] \quad (2.25)$$

Humedad Relativa. Es la relación entre la presión parcial de agua en la mezcla a una temperatura dada (P_v) y la presión de saturación a la misma temperatura (P_{vs}).

$$H = \left(\frac{P_v}{P_{vs}} \right) * 100 \% \quad (2.26)$$

Temperatura de rocío. Si se mantiene constante la presión parcial de vapor de agua llega a una temperatura en que se produce la saturación del vapor de agua y ese vapor de agua se puede condensar y esa es la temperatura de rocío.

Definiendo el parametro B es posible obtener la temperatura de rocío (T_{pr}).

$$B = \ln \left(\frac{P_v}{1000} \right)$$

$$T_{pr} = 6.54 + 14.526 * B + 0.7389 * B^2 * B^3 + 0.4569 * P_v^{0.1984} \quad (2.27)$$

Para $0 - 93^\circ \text{C}$

Temperatura de Bulbo Húmedo. Como su nombre lo indica con un termómetro de Hg se coloca una felpa humedecida en su bulbo y se registra la temperatura del ambiente donde se coloca.

Entalpía. Propiedad relacionada con la segunda ley de la termodinámica y relaciona la energía interna (u) y el producto pv :

$$h = u + pv \quad (\text{Kj/Kg}_{as}) \quad (2.28)$$

Para el aire seco es: $h_{as} = C_{pas} * T_s = 1.006 * T_s$

C_{pas} : es el calor específico a presión constante del aire seco.

Para el vapor de agua es : $h_v = C_f + C_{pv} * T_s = 2501 + 1.77 * T_s$ (2.29)

De esta forma la entalpía del aire humedo puede calcularce por la expresión.

$$h = 1.006 * T_s + w(2501 + 1.77 * T_s) \quad (2.30)$$

Volumen Específico. Es el volumen ocupado por el aire humedo en un volumen de aire seco (m^3/Kg_{as}).

$$v = \frac{V}{m_{as}} = \frac{RT_s}{M_{as} * P_{as}} = 287.05 \left(\frac{T_s}{P_t - P_v} \right) \quad (2.31)$$

2.4 Evolución de aire en el proceso de secado.

Como es sabido el aire es el agente secante en casi todos los procesos de secado, el flujo de aire que pasa por el producto además de subirle la temperatura existen procesos de transferencia de masa y energía como se ha explicado, en este proceso crece la humedad relativa del aire bajando la temperatura de bulbo seco y manteniendose constante la de bulbo húmedo.

Precalear el aire constituye una optimización del proceso de secado (Ekechukwu. 1999). Si se analiza una carta psicrométrica se demuestra que es conveniente precalear el aire (figura 2.8), aquí se muestran las transformaciones que sufre el aire al ser precaledado. Si se considera el aire ambiente no saturado (punto 1) tiene una humedad relativa H_1 , temperatura T_1 y temperatura de bulbo humedo T_{bh1} , entonces tendrá una humedad absoluta w_1 ; si el aire no es precaledado seguira la linea de enfriamiento adiabatica T_{h1} (linea 1 -

4) y si idealmente el proceso continúa hasta su saturación le corresponderá la humedad absoluta w_4 , lo que implica que ese aire podrá extraer como máximo una humedad $w_4 - w_1$. Sin embargo si antes de usarse en el secado el aire es precalentado hasta una temperatura seca T_2 tendrá una humedad relativa H_2 (línea 1 - 2), el proceso de secado se correspondería con una nueva línea de enfriamiento adiabática T_{h2} (línea 2 - 3) en donde las condiciones de saturación corresponden a una humedad absoluta w_3 , en este caso la posibilidad máxima de extraer humedad será igual a $w_3 - w_2$. Se puede apreciar como se incrementa sustancialmente la posibilidad de arrastrar humedad del aire cuando este es precalentado. (Ekechukwu 1999).

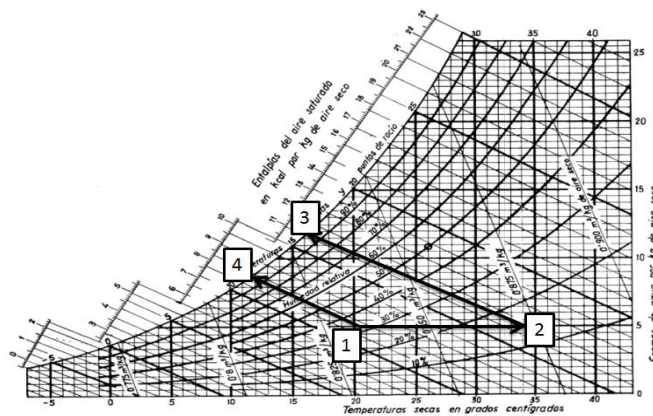


Figura 2.8 Comportamiento del aire al calentarse. Cortesía del autor.

Como se aprecia la capacidad de secar del aire depende mucho de su humedad relativa y esta es función de su temperatura. Entonces existen tres posibles evoluciones del aire:

- Evolución adiabática. El aire baja su temperatura a medida que el material se calienta hasta un equilibrio de saturación adiabática, cuando la humedad relativa del aire es del 100 % para el proceso de transferencia.

- Evolución del aire dentro del proceso sin aporte de calor desde exterior. Cuando se hace pasar forzosamente aire no saturado a temperatura ambiente por el producto este se satura.
- Proceso de secado con aporte energético directo, aquí al calentar el aire este aumenta su afez por el agua y es muy eficiente. Este sistema combinado con el anterior es el más usado en las aplicaciones de secado solar (secado con convección forzada y aporte calirífico exterior).

2.5 Eficiencia del proceso secado.

Según criterios termodinámicos la eficiencia puede medirse con el Consumo Energético Unitario (CEU) (Navarrete y Torres. 2004).

$$CEU = \frac{\text{Energía Consumida}}{\text{Agua Evaporada}} \quad (2.32)$$

Otro criterio es:

$$Efic = \frac{\text{Energía Utilizada}}{(\text{Energía Utilizada} + \text{Energía Perdida en el aire de salida})} \quad (2.33)$$

En el caso que el deshidratador no tenga recirculación podemos plantear en función de las temperaturas.

$$Efic = \frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 - T_a)} 100\% \quad (2.33)$$

Donde T_1 es la temperatura del aire a la entrada ; T_2 es la temperatura a la salida y T_a la temperatura del aire ambiente.

En función de las humedades absolutas.

$$Efic = \frac{(w_2 - w_1)}{(w_{2a} - w_1)} 100\% \quad (2.34)$$

Donde w_2 y w_1 son las humedades absolutas a la entrada y salida del secador ($\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}}$) y W_{2a} es la humedad absoluta del aire en condiciones de saturación adiabática ($\text{Kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{aire}}$).

Una vez analizada nuestra sustancia de trabajo (aire húmedo) se estudian ahora los diferentes tipos de secadores solares para de acuerdo a las características de nuestro producto a secar poder hacer la mejor selección.

2.6 Tipos de Secadores Solares.

Existen varias formas de secado con energía solar: (Ktinoja y Kader 1996; Torres y Navarrete 2004).

- **Secado natural.** Simplemente extendiendo el producto a secar directamente al sol. Es la forma más sencilla y económica de hacerlo, pero la que tiene menos control. Por lo tanto la calidad del producto es inferior.
- **Secado natural mejorado.** Aquí se mejora en algo la técnica, utilizando esteras sobre el nivel del suelo para mejorar la transferencia de calor entre aire y producto, bandejas y otros medios simples. Pero esencialmente el producto se seca por efecto de la radiación solar y el aire ambiente.
- **Secado solar tecnificado o artificial.** Aquí se utiliza un secador solar, que es una instalación en la cual se realiza el secado.

Desde el punto de vista general se puede distinguir secadores solares directos, indirectos de tiro natural o forzado y mixto. Esta nomenclatura distingue la forma en que se transfiere la energía entre el producto y el entorno que lo rodea.

- **Secadores directos:** (figura 2.9) el producto está en una cámara y recibe directamente la radiación solar. Al absorber la misma, su temperatura sube, aumentando la presión de vapor del agua del producto y el aire remueve la humedad. Al haber poca circulación de aire, las temperaturas tienden a subir mucho y es probable que se produzca el deterioro del producto.



Figura 2.9 Secador solar directo. Foto de internet.

- **Secadores indirectos de tiro natural:** (figura 2.10) el producto está en una cámara de secado opaca y no recibe directamente la radiación solar. El aire se precalienta en colectores solares y pasa a la cámara de secado por el efecto termosifónico, este le transfiere calor al producto secándolo. Tienen la ventaja de que el producto está protegido de la radiación y se puede controlar la temperatura y la calidad del producto final.



Figura 2.10 Secador indirecto con circulación natural. Foto del autor.

- **Secadores indirectos de tiro forzado.** (figura 2.11) el principio de funcionamiento es parecido al de tiro natural lo único que en este el movimiento del aire dentro del secador es gobernado por ventiladores y no por efecto termosifónico.



Figura 2.11 Secador indirecto con circulación forzada. Foto del autor.

- **Secadores mixtos:** (figura 2.12) aquí se combinan los dos anteriores. Aquí el producto absorbe radiación, pero también hay una convección mucho más activa. Así que las temperaturas son bajas y la remoción de humedad muy efectiva.



Figura 2.12 Secador Solar Mixto. Foto del internet.

Si se quisiera fabricar un secador para hierbas aromáticas como es el caso del Té Limón, el ideal sería un sistema indirecto con control estricto de temperatura y humedad de aire. La temperatura no debe superar los 60°C como ya se analizó y se debería usar recirculación de aire con esta misma finalidad.

Pero debe quedar claro que no existe una tecnología óptima, la solución tecnológica que uno adopte dependerá del tipo de producto a secar, condiciones ambientales y los volúmenes a procesar en la temporada de utilización.

2.7 Nuestra fuente de energía. El Sol.

2.7.1 Naturaleza de la energía solar. Estructura del sol.

El Sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, con un diámetro de 1.39×10^9 m, situado a la distancia media de 1.5×10^{11} m de la Tierra (Unidad Astronómica UA). Se estima que la temperatura en el interior del Sol es de 10^7 K, pero en la fotosfera, es decir, en la superficie externa del Sol es de 5762 K. El Sol genera su energía mediante reacciones nucleares de fusión. Esta energía proviene de la pérdida de masa del Sol, de acuerdo a la ecuación de Einstein,

$E = m c^2$. El núcleo solar abarca el 23 % de su radio, que corresponde a tan sólo el 15 % del volumen, pero en cambio contiene el 40 % de la masa y ahí se genera el 90 % de la energía, su densidad es de 105 kg/m^3 .

La capa externa del sol (fotosfera) es una región opaca en donde se emite la mayoría de la radiación al espacio; por ser opaca impide observar su interior. El Sol, desde el núcleo hasta su superficie se encuentra en forma gaseosa, no hay una superficie física claramente definida. La fotosfera es gaseosa y transparente, que se conocen como la corona solar o atmosfera solar.

2.7.2 La constante solar.

La combinación de la distancia Tierra-Sol, el diámetro solar y la temperatura del Sol, determinan un flujo luminoso, de energía que incide sobre la superficie de la Tierra. Mucho se ha discutido acerca de si el Sol emite un flujo de energía constante, o se trata de una estrella variable. Sin embargo la emisión de energía del Sol puede considerarse constante. Esto ha dado lugar a la definición de la llamada constante solar. La constante solar, (G_{sc}), es el flujo de energía proveniente del Sol, que incide sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar, ubicada a la distancia media de la Tierra al Sol, fuera de toda atmósfera. Tierra. (Duffie J. A. and Beckman W.A. 1980).

El valor comúnmente aceptado para G_{sc} ha variado en los últimos años, según las técnicas de medición que se han empleado, lo cual no indica que haya variado en sí la magnitud de la energía que se recibe del Sol. $G_{sc} = 1367 \text{ w/m}^2$ en el SI, en otras unidades equivale a: $G_{sc} = 1.940 \text{ cal/cm}^2\text{min} = 428 \text{ Btu/ft}^2\text{hr} = 4871 \text{ MJ/m}^2\text{hr}$

2.7.3 La radiación normal extraterrestre.

La radiación solar que incide sobre la Tierra está sujeta a las variaciones geométricas y a las condiciones físicas del propio Sol. Por otro lado, la órbita que describe la Tierra alrededor del Sol no es circular, sino cuasielíptica. La pequeña excentricidad de la órbita hace que, alrededor del 4 de enero, cuando la Tierra se encuentra en el perihelio (mínima distancia al Sol) la radiación solar extraterrestre sea máxima, por otro lado, alrededor del 1 de julio seis meses después la Tierra se encuentra en el afelio (máxima distancia al Sol) y entonces la radiación solar extraterrestre es mínima.

La ecuación que describe el flujo de energía sobre un plano normal a la radiación solar extraterrestre, a lo largo del año es:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 n}{365} \right) \quad (2.35)$$

Donde G_{on} es el flujo de radiación extraterrestre, medida en un plano normal a la radiación, n es el número de día del año y G_{sc} es la radiación extraterrestre observada en un plano normal a la radiación.

2.7.4 Distribución espectral de la radiación solar.

El Sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma, hasta las ondas de radio. Sin embargo, para los fines del aprovechamiento de su energía, sólo es importante la llamada radiación térmica que incluye sólo el ultravioleta (UV), la radiación visible (VIS) y la infrarroja (IR). Su distribución espectral en función de la longitud de onda se ve en la Figura 2.13.

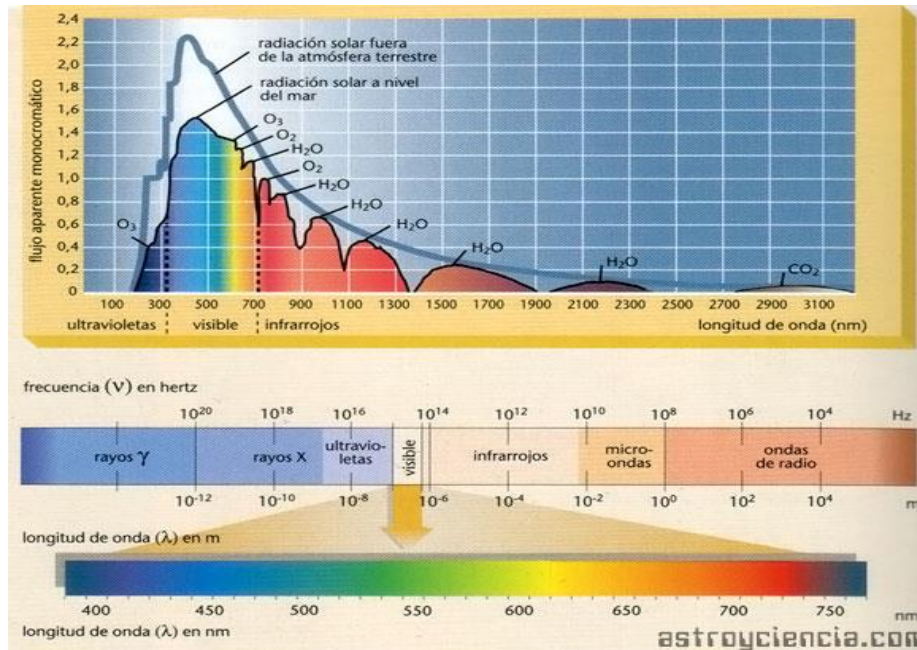


Figura 2.13 Espectro de la radiación del sol. (Internet)

2.7.5 Geometría sol-tierra. Posición solar.

2.7.5.1 Los movimientos de la Tierra.

La Tierra, al igual que el resto de los planetas gira en torno al Sol describiendo una órbita elíptica con dicho astro situado en uno de sus focos. El eje mayor de esta elipse se denomina línea de los ápsides, siendo sus extremos el perihelio, punto de la órbita terrestre más próximo al Sol, y el afelio, punto más alejado (figura 2.14).

La excentricidad de la elipse es aproximadamente a 0.017. Al ser esta excentricidad tan pequeña, la órbita terrestre podría asimilarse a una circunferencia de radio $ro = 1UA = 1.495979 \times 10^8$ Km (Estrada R. 1987).

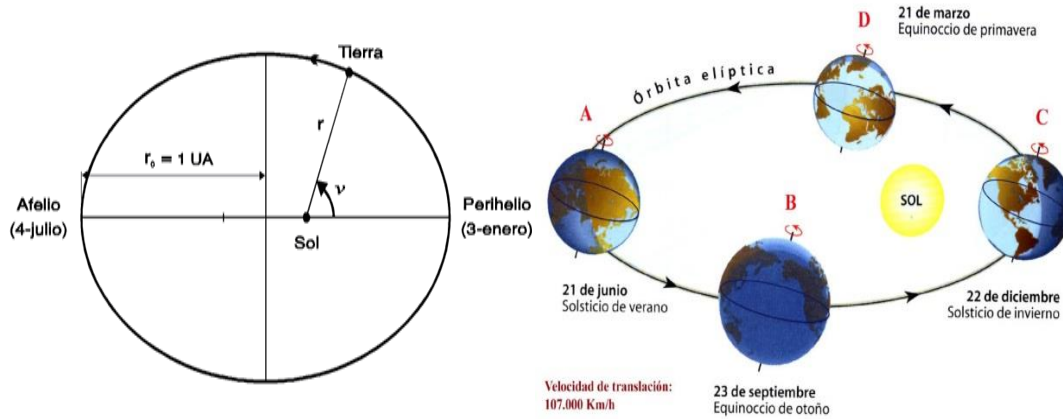


Figura 2.14 Movimiento elíptico de rotación de la Tierra alrededor del Sol

2.7.5.2 Movimiento de translación.

En la figura 2.14 se vio el movimiento de rotación de la Tierra alrededor del Sol, esta rotación se realiza un año sidéreo, cuya duración es de 365 días, 6 horas y 9.1626 minutos. Este movimiento viene determinado por la segunda ley de Kepler o ley de las áreas, según la cual el radio vector que une el Sol con un planeta, barre áreas iguales en tiempos iguales entonces es la velocidad areolar es constante (figura 2.15).

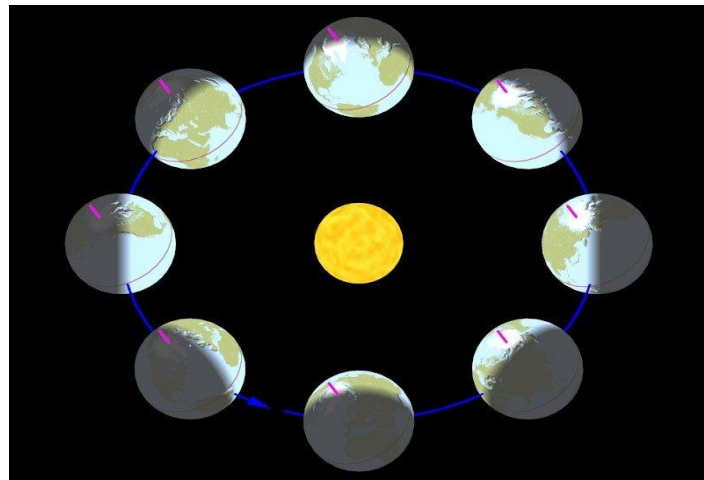


Figura 2.15 Movimiento de translación de la tierra.

2.7.5.3 Movimiento de rotación.

Simultáneamente al movimiento de traslación descrito, la Tierra gira sobre un eje imaginario que pasa por los polos, en un movimiento de rotación que puede suponerse perfectamente uniforme (figura 2.16). El plano normal al eje de rotación que pasaría por el centro de gravedad de la Tierra se denomina plano ecuatorial o plano del ecuador.

La rotación de la Tierra da origen a las estaciones del año que son: invierno, primavera, verano y otoño y a la desigual duración de los días y de las noches. Este ángulo se denomina oblicuidad (ϵ) de la eclíptica y su valor es de $23^\circ 27'$. La intersección de este plano, paralelo al del ecuador, con el plano de la eclíptica recibe el nombre de línea de los equinoccios y determina sobre la órbita terrestre dos puntos conocidos como equinoccio de primavera y equinoccio de otoño.

Análogamente, la perpendicular trazada en el plano de la eclíptica por el centro del Sol a la línea de los equinoccios se llama línea de los solsticios cuya intersección con la órbita terrestre da lugar a otros dos puntos denominados solsticio de invierno y solsticio de verano.

Cuando la Tierra está situada sobre los equinoccios (véase la figura 2.14), lo que ocurre aproximadamente los días 21 de marzo y 22 de septiembre, el Sol se encuentra sobre el plano del ecuador y, por consiguiente la duración del día natural de luz es igual a la de la noche en todos los lugares de la Tierra.

Hacia el día 21 de junio, fecha del solsticio de verano, el Sol ilumina más directamente el hemisferio norte de la Tierra, donde el Sol alcanza su máxima inclinación respecto al plano del ecuador. Seis meses más tarde, hacia el 22 de

diciembre, fecha del solsticio de invierno, la situación anterior se ha invertido, siendo el hemisferio Sur, el más iluminado. (Duffie J. A. and Beckman W.A., 1980).

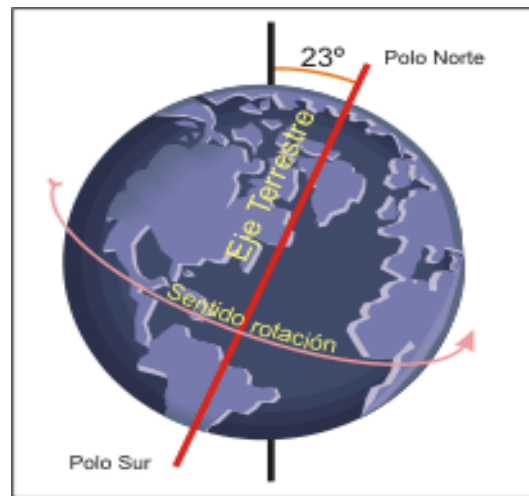


Figura 2.16 Movimiento de rotación de la tierra

2.7.5.4 Posición de un observador sobre la superficie terrestre

A efectos prácticos se puede tomar la Tierra como una esfera cuyo plano perpendicular al eje determina una circunferencia llamada ecuador terrestre. Los planos que pasan por los polos y que, por consiguiente, son normales al plano del ecuador, se denominan planos meridianos y determinan sobre la esfera terrestre unas circunferencias conocidas como meridianos terrestres. Finalmente, los planos paralelos al ecuador cortan a la esfera terrestre formando circunferencias denominadas paralelos. (Duffie J. A. and Beckman W.A., 1980).

Un punto cualquiera sobre la superficie terrestre queda determinado por sus coordenadas geográficas, que son: (figura 2.17)

- La longitud, λ , definida como el ángulo diedro entre el plano meridiano cero y el plano meridiano que pasa por dicho punto. Se cuenta de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Este y negativamente hacia el Oeste.

- La latitud, ϕ , que se define como el ángulo formado por la normal a la esfera terrestre por dicho punto con el plano del ecuador. Se cuenta de 0° a $\pm 90^\circ$, a partir del ecuador, positivamente hacia el Norte y negativamente hacia el Sur.

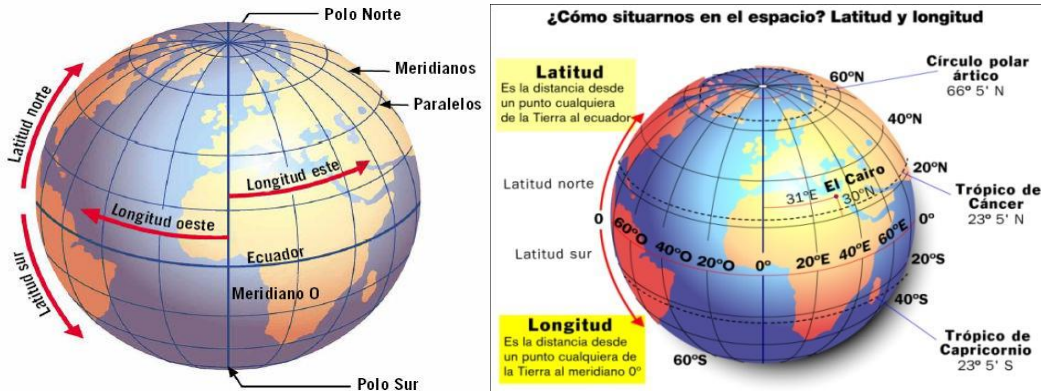


Figura 2.17 Coordenadas geográficas. Latitud y Longitud

En el solsticio de verano, durante el mediodía, los rayos solares caen verticalmente sobre los lugares situados en el trópico de Cáncer, mientras que en el círculo polar antártico el Sol está en el horizonte. Otro tanto sucede, en el solsticio de invierno, con el trópico de Capricornio y el círculo polar ártico. (Duffie J. A. and Beckman W.A., 1980).

2.7.5.5 La esfera celeste. Sistemas de referencia.

En astronomía, la posición de un astro se determina mediante coordenadas esféricas. Sin embargo, la distancia a los astros es generalmente desconocida en principio, por lo que se considera su posición proyectada sobre una esfera de

radio unidad (o si se prefiere de radio infinitamente grande) y centro arbitrario (casi siempre se piensa en el centro de la Tierra), denominada esfera celeste.

Para determinar la posición de un astro sobre la esfera celeste, se usa una pareja de ángulos denominados coordenadas celestes. Este plano determina sobre la esfera celeste un círculo máximo denominado horizonte celeste y la recta normal al mismo (vertical del lugar o del observador), trazada por el centro de la esfera, corta a esta en dos puntos: el cenit, sobre el observador, y el nadir, oculto por la Tierra, bajo el observador.

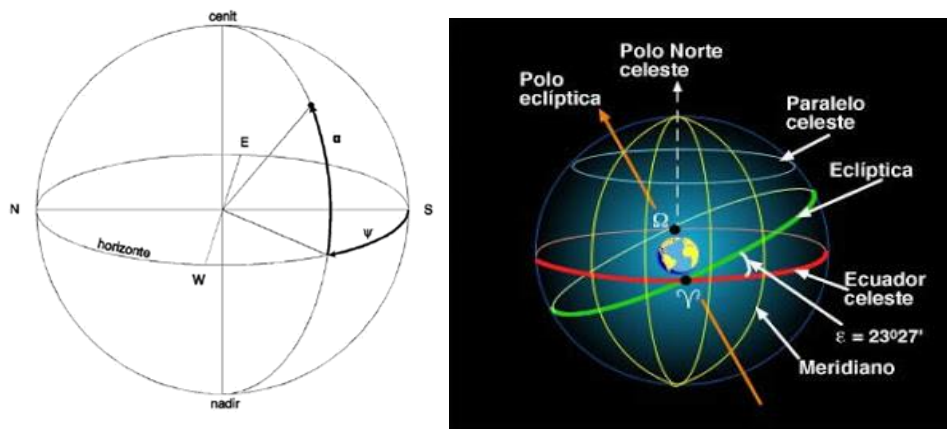


Figura 2.18 Coordenadas celestes horizontales

Las coordenadas celestes horizontales son:

- El acimut, ψ , arco de horizonte celeste comprendido entre el punto cardinal Sur y el punto donde el círculo vertical que pasa por el astro corta al horizonte. Se cuenta a partir del Sur, de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.
- La altura, α , arco de dicho círculo vertical comprendido entre el astro y el horizonte. Se mide a partir del horizonte de 0° a 90° , positivamente hacia el cenit y negativamente hacia el nadir.

En lugar de la altura α se emplea frecuentemente el ángulo cenital, θ_z , que es el arco de círculo vertical entre el cenit y el astro. Se cuenta a partir del cenit, de 0° a 180° , con lo que la relación entre la altura solar y el ángulo cenital viene dada por:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (2.36)$$

Como eje fundamental se adopta el eje de rotación de la tierra, que define sobre dicha esfera los polos celestes, Norte y Sur, y el ecuador celeste, normal al mismo, como círculo máximo fundamental. Las coordenadas celestes horarias de un astro son, como puede verse en la figura 2.19.

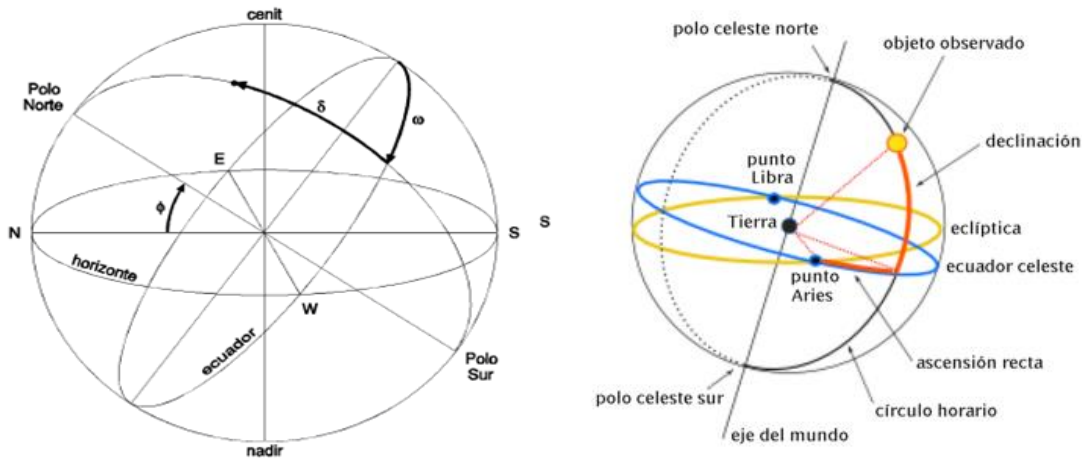


Figura 2.19 Coordenadas celestes horarias

- El ángulo horario, ω que es, por definición, el arco del ecuador celeste (o el ángulo diedro correspondiente comprendido entre el meridiano superior del lugar y el círculo horario que pasa por el astro. Se mide sobre el ecuador a partir del punto de intersección entre el meridiano superior del lugar y va de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.
- La declinación, δ , es, por definición, el arco del círculo horario que pasa por el astro, comprendido entre el ecuador y éste. Se cuenta a partir del

ecuador de 0° a $\pm 90^\circ$, positivamente hacia el polo Norte y negativamente hacia el polo Sur.

Las coordenadas celestes horizontales de un astro vienen dadas, en función de sus coordenadas celestes horarias y de la latitud del observador, ϕ por las siguientes relaciones trigonométricas, obtenidas de las relaciones de Bessel del triángulo esférico formado por el polo (Norte en el hemisferio Norte y Sur en el hemisferio Sur), el Cenit y el astro (figura 2.20) (Duffie J. y Beckman W. 1980).

$$\text{sen } \gamma = \text{sen } \delta \text{sen } \phi + \cos \delta \text{sen } \phi \cos \omega = \cos \theta_Z \quad (2.37)$$

$$\cos \psi = \frac{-\text{sen } \delta \cos \phi + \cos \delta \text{sen } \phi \cos \omega}{\cos \gamma} \quad (2.38)$$

Otra expresión más simple usada frecuentemente para calcular el acimut es

$$\cos \psi = \frac{\text{sen } \gamma \text{sen } \phi - \text{sen } \delta}{\cos \gamma \cos \phi} \quad (2.39)$$

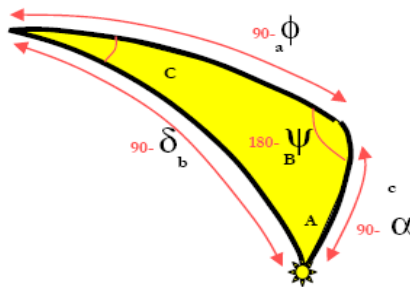


Figura 2.20 Triángulo esférico formado por el polo (Norte en el hemisferio Norte y Sur en el hemisferio Sur), el Cénit y el astro.

Finalmente, cabe citar una tercera expresión, aún más simple, que determina el acimut y su signo, pero que debe manejarse con cuidado ya que sólo es válida para ángulos comprendidos en el intervalo $-90^\circ < \psi < 90^\circ$. Esta expresión es:

$$\sin \psi = \frac{\sin \delta \sin \omega}{\cos \gamma} \quad (2.40)$$

En efecto, las coordenadas horizontales, acimut y altura de un mismo astro, en un determinado instante, son diferentes para dos observadores situados en distintos lugares de la Tierra (Duffie J. y Beckman W 1980).

2.7.5.6 Movimiento aparente del Sol sobre el horizonte.

Como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, los astros describen sobre la esfera celeste círculos paralelos al ecuador. Sin embargo el Sol se mueve sobre la eclíptica, que está inclinada un ángulo $\varepsilon = 23^{\circ}27'$ sobre el ecuador (figura 2.21). Por tanto, la declinación solar varía a lo largo del año, para el hemisferio Norte, entre un máximo de $\delta = +\varepsilon$, en el solsticio de verano y un mínimo de $\delta = -\varepsilon$, en el solsticio de invierno, y al revés para el Sur, siendo $\delta = 0$ durante los equinoccios en ambos casos. (Duffie J. A. and Beckman W.A., 1980).

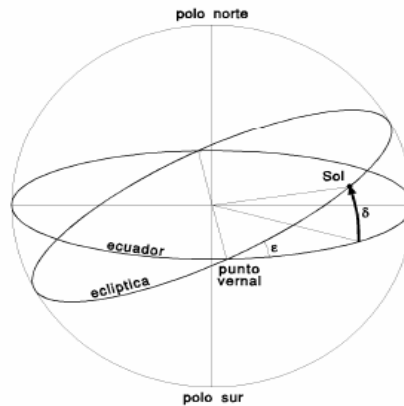


Figura 2.21 Planos del ecuador y la eclíptica.

2.7.6 Tiempo solar y tiempo oficial.

El tiempo solar verdadero (*TSV*), en un lugar dado es por definición, el ángulo horario del centro del Sol expresado en horas. Cada hora equivale a $360^{\circ}/24=15^{\circ}$:

$$TSV = \omega/15 \quad (2.41)$$

Por tanto, el día solar verdadero está dividido en 24 horas de tiempo solar verdadero, que empieza a contarse a partir del mediodía. El tiempo local aparente (*TLA*), es, por definición, el tiempo solar verdadero aumentado en 12 horas, por lo que empieza a contarse a partir de medianoche.

$$TLA = TSV + 12 \quad (2.42)$$

El tiempo solar medio *TSM*, en un lugar dado es, por definición, el tiempo solar verdadero corregido de todas sus irregularidades. Definiremos como ecuación del tiempo E_t , la suma algebraica de todas las correcciones. Se tiene pues, por definición:

$$TSV = TSM + E_t \quad (2.43)$$

La figura 2.22 representa gráficamente la ecuación del tiempo a lo largo del año. Alcanza un valor máximo de 16 min 24 s el día 4 de noviembre, un valor mínimo de -14 min 22 s el día 11 de febrero y se anula cuatro veces al año, los días 16 de abril, 15 de junio, 2 de septiembre y 25 de diciembre. Estas fechas y valores son tan sólo aproximadas y oscilan ligeramente de un año a otro.

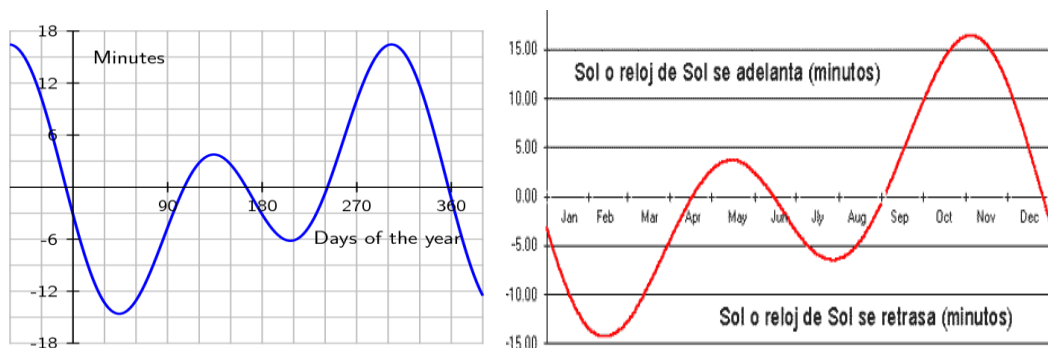


Figura 2.22 Representación gráfica de la ecuación del tiempo.

El tiempo civil TC , también denominado tiempo local medio, es, por definición, el tiempo solar medio aumentado en 12 horas. Se empieza a contar, por consiguiente, a medianoche, instante en el que se cambia la fecha del día.

$$TC = TSM + 12 \quad (2.44)$$

Así pues, dos lugares de la Tierra situados en meridianos distintos tendrán un tiempo civil diferente, siendo esta diferencia proporcional a su diferencia en longitud geográfica. Para sincronizar estos dos lugares se utiliza el tiempo universal, TU , definido como el tiempo civil del meridiano 0 o de Greenwich. Por lo tanto, el tiempo civil en horas viene dado por:

$$TC = TU + \lambda/15 \quad (2.45)$$

Para obviar este inconveniente y extender a todo el mundo el tiempo universal, se ha dividido la superficie terrestre en 24 husos horarios, con una amplitud de 15° (1 hora), numerados de 0 a 23 hacia el Este, a partir del huso horario 0, que se toma como referencia. Por convención arbitraria dentro de cada huso rige el tiempo local estándar, TLE , definido como el TU aumentado en un número entero de horas igual al número del huso. Entonces, el tiempo local estándar es el tiempo civil del meridiano central de dicho huso. Para una determinada localidad, de longitud geográfica λ , la diferencia entre el tiempo civil y el tiempo local estándar, conocida como corrección de longitud, viene dada por:

$$TC - TLE = (\lambda - \lambda_z)/15 \quad (2.46)$$

Donde λ_z es la longitud del meridiano central del huso correspondiente.

El tiempo oficial, TO , que es el que marcan los relojes que usamos en la vida ordinaria, depende de la normativa legal de cada país, pero, normalmente, difiere un número entero de horas del correspondiente al huso horario. En este caso

$$TO = TLE + AO \quad (2.47)$$

Siendo AO el adelanto oficial sobre el huso horario, que puede variar a lo largo del año. Por consiguiente, de las definiciones dadas se tiene que tiempo solar verdadero y tiempo oficial están relacionados por:

$$TSV = TO - AO + (\lambda - \lambda_z) / 15 + E_t - 12 \quad (2.48)$$

Donde, al igual que en las relaciones anteriores, el tiempo está expresado en horas, lo mismo que E_t , y λ en grados (positiva hacia el Este). (Duffie J. y Beckman W 1980).

2.7.7 Posición solar.

Cada día de este año se identifica mediante un número denominado día del año, n , que varía entre 1 para el día 1 de enero y 365 para el día 31 de diciembre.

La posición solar en un instante determinado vendrá dada, en coordenadas horarias, por el ángulo horario ω y la declinación δ del centro del Sol. El ángulo horario (expresado en grados sexagesimales) es: $\omega = 15 \cdot t$

Donde t está expresada en horas de tiempo solar verdadero. La declinación solar se calcula con un error máximo de $\pm 1.5^\circ$ mediante la expresión de Cooper:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (2.49)$$

Aun que para el cálculo mediante ordenador puede resultar más apropiada y precisa la siguiente aproximación trigonométrica, (se puede seguir utilizando sin variación apreciable del error) ofrece un error máximo de ± 12 .

$$\delta = 0.3723 + 23.2567 \text{sen} \omega t - .7580 \cos \omega t + 0.1149 \text{sen} \omega t + 0.3656 \cos \omega t - 0.1712 \text{sen} \omega t + 0.0201 \cos \omega t \quad (2.50)$$

Donde está expresado en grados así como ωt que puede calcularse mediante.

$$\omega t = 360/365(n - 79.436) \quad (2.51)$$

La ecuación del tiempo, expresada en minutos, puede calcularse por medio de la siguiente expresión, debida a Spencer, con un error máximo de 35 segundos.

$$E_t = \frac{229.2}{60} \cdot [0.000075 + 0.001868 \cdot \cos(\Gamma) - 0.032077 \cdot \text{sen}(\Gamma) - 0.014615 \cdot \cos(2\Gamma) - 0.04089 \text{sen}(2\Gamma)] \quad (2.52)$$

El ángulo horario del ocaso solar, ω_s se obtiene haciendo la altura solar igual a cero en la ecuación:

$$\text{sen} \gamma = 0 = \text{sen} \phi \text{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2.53)$$

Es decir,

$$\omega_s = \arccos(-\tan \delta \tan \phi) \quad (2.54)$$

Que siempre es positivo, de acuerdo con el convenio de signos adoptado.

Suponiendo que la declinación solar no varía a lo largo del día, el ángulo horario del orto solar es igual a $-\omega_s$, y por consiguiente, la duración del día natural de luz,

en horas puede calcularse como: $S_{od} = 2\omega_s/15$

Nótese que el cálculo de ω_s mediante la expresión puede conducir a valores matemáticamente incorrectos de $\cos \omega_s > +1$, lo que significaría que el Sol está todo el día sobre el horizonte (como ocurre, por ejemplo, en el casquete polar ártico durante el verano) o también a $\cos \omega_s < -1$, cuando el Sol está todo el día bajo el horizonte. El introducir el parámetro ω_s permite calcular la altura solar de otra forma distinta.

$$\operatorname{sen} \gamma = \cos \phi \cos \delta (\cos \omega - \cos \omega_s) \quad (2.55)$$

1.7.8 Posición del sol relativa a una superficie plana.

La posición relativa del Sol con respecto a una superficie se establece en función de la posición solar en la esfera celeste y de la posición de la superficie sobre el plano del horizonte, la cual viene caracterizada por dos ángulos:

- El ángulo acimutal, γ , también llamado orientación, que forma la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal con el plano meridiano del lugar. Se cuenta a partir del punto cardinal Sur, de 0° a $\pm 180^\circ$, positivamente hacia el Este y negativamente hacia el Oeste.
- La pendiente o inclinación, β , de la superficie, que es el ángulo formado por dicha superficie con el plano horizontal. Toma valor desde 0° a 180° . Si $\beta > 90^\circ$ la superficie estaría enfrentada al suelo.

La irradiación solar recibida por una superficie está influenciada por el ángulo de incidencia, θ , que forman los rayos del Sol con la normal a la superficie. Este ángulo, para una superficie arbitrariamente orientada e inclinada, viene dado en función de las coordenadas horizontales del Sol, por:

$$\cos \theta = \sin \beta \sin \gamma \cos \alpha \sin \psi + \sin \beta \cos \gamma \cos \alpha \cos \psi + \cos \beta \cos \alpha \quad (2.56)$$

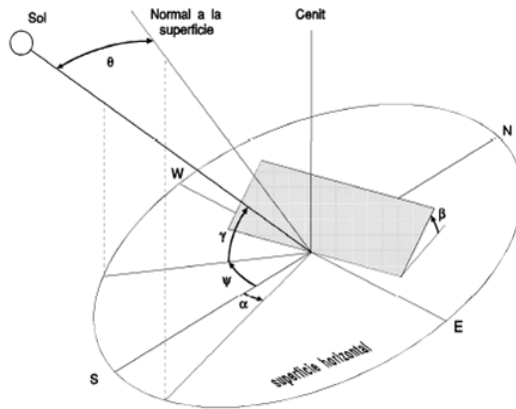


Figura 2.23 Ángulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie.

En particular, si la superficie está orientada hacia el Sur, ($\alpha = 0$) la expresión anterior queda:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega \quad (2.57)$$

Finalmente, si la superficie es horizontal ($\beta = 0$), el ángulo de incidencia sería el ángulo cenital, por lo se tiene:

$$\cos \theta = \sin \gamma = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2.58)$$

2.7.9 La radiación solar

Para la medida de la radiación solar existen básicamente dos tipos de instrumentos (Tiwari 2002, Duffie y Beckman 1991, Bernard et. al 1982) Piranómetro y pirheliómetros, ambos basados en la generación de un voltaje proporcional a la radiación solar incidente.

El **pirheliómetro** (figura 2.24) es un instrumento utilizado para medir la radiación solar directa, por lo que debe disponer de un sistema de seguimiento del Sol para que su superficie receptora sea normal a los rayos solares.



Figura 2.24 Pirheliómetro

El Piranómetro (figura 2.25) se emplea para la medida de la irradiancia global (directa más difusa) sobre una superficie plana, generalmente horizontal. Si el piranómetro ubicado de forma horizontal posee un dispositivo de bloqueo de la radiación directa del Sol, permite medir exclusivamente la radiación difusa. El piranómetro es el equipo más habitual utilizado para la medida de la radiación solar total.



Figura 2.25 El Piranómetro.

Variables básicas en la caracterización de la radiación solar.

Existen dos ángulos, que nos marcan los movimientos de traslación y rotación de la Tierra, la declinación solar, debida al movimiento de traslación, y el ángulo horario, debido al movimiento de rotación. Además de éstos, ángulos como la latitud, la altura solar, el ángulo de incidencia, son necesarios para la determinación de esta radiación incidente.

Al mismo tiempo, es necesario conocer la radiación incidente sobre la superficie receptora, habitualmente inclinada un ángulo transformando los valores de las componentes sobre superficie horizontal.

Se usa indistintamente el término radiación solar para referirse a la potencia o a la energía entregada por el Sol, ahora se precisan.

- **Irradiancia** (potencia de la radiación): es la energía incidente sobre una superficie por unidad de tiempo y de área. Se representa habitualmente por G_n y sus unidades en el S.I. son (W/m^2) .

$$G_n = G_{sc} \left[1 + 0.033 \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta \quad (2.59)$$

Combinando la expresión del coseno del ángulo de incidencia ($\cos \theta$) podemos obtener la irradiancia directa sobre un plano inclinado como sigue:

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0.033 \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \text{sen } \phi \text{ sen } \sigma \cos \phi \cos \sigma \cos \omega \quad (2.60)$$

Donde n es el número del día, ϕ es la latitud del lugar, σ es la declinación solar y ω es el ángulo horario, magnitudes estas ya descritas.

• **Irradiación** (energía de la radiación): es la energía incidente sobre una superficie por unidad de área, durante un determinado período de tiempo. Se identifica generalmente por I_0 y sus unidades en el S.I son (J/m^2)

$$I_0 = \frac{12 \cdot 3600 G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \frac{\cos 360 n}{365} \right] \left[\cos \phi \cos \sigma * (\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \text{sen } \phi \text{sen } \sigma \right] \quad (2.6)$$

Donde $I_0, (J/m^2)$ es la irradiación solar incidente en el plano inclinado desde un tiempo inicial (ω_1) hasta otro final (ω_2) , y los demás parámetros ya son conocidos.

Irradiación solar en la superficie terrestre.

La radiación global, G que incide sobre una superficie inclinada en la Tierra consta de tres componentes fundamentales que son:

- Radiación directa (G_{dir}): es la que proviene “directamente” del disco solar sin sufrir alteraciones, suponiendo ésta el 90 % de la radiación global en días muy soleados y prácticamente nulos en días cubiertos.
- Radiación difusa (G_{dif}): es la energía dispersada por los componentes atmosféricos.
- Radiación reflejada (G_r): también denominada albedo, es la que llega a una superficie inclinada procedente de la reflexión de la radiación solar en el suelo.

$$G = G_{dir} + G_{dif} + G_{albedo} \quad (2.62)$$

En la figura 2.26, se muestra una curva típica de la variación promedio de la radiación solar durante el año, los meses de mayor radiación en nuestro hemisferio norte son los de invierno porque en su camino elíptico de la tierra alrededor del sol son en esos meses donde estamos más cerca de él (perihelio) y

los meses de menos radiación incidente son los de verano ya que estamos más alejados del sol (afelio).

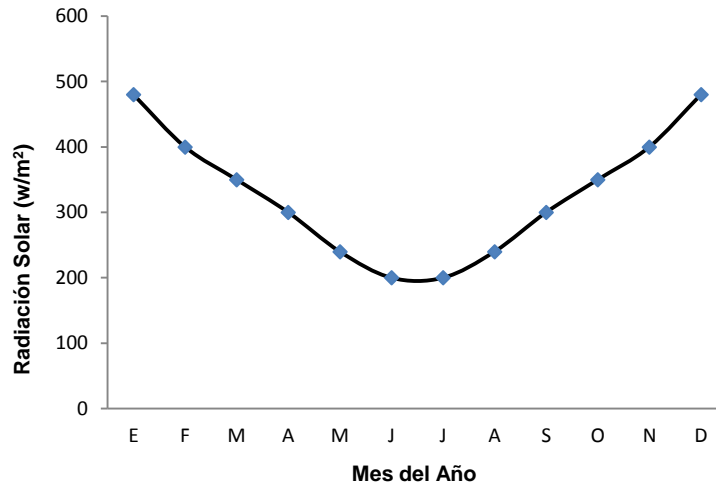


Figura 2.26 Curva de radiación promedio anual.

2.8 Conclusiones

Con la fundamentación teórica descrita en este capítulo se alcanza a comprender los capítulos posteriores, se podrá hacer un análisis de resultados con una fundamentación teórica y científica y así comprender el comportamiento de variables en el diseño, construcción y modelación del secador solar para el deshidratado del Té Limón.

Se hace un estudio extenso de la teoría del secado, se definen conceptos importantes como contenido de humedad, actividad del agua, difusividad, se estudian los tipos de secadores solares, sus características más importantes. Se le dedica un espacio importante a nuestra fuente de calor, la cinemática solar y como se mide y como se modela. Con esta información previa se puede pasar a la descripción de los métodos empleados para lograr los objetivos planteados.

CAPÍTULO 3. METODOS.

3.1 Introducción.

La metodología descrita en esta tesis, responde en orden cronológico al cumplimiento de los cuatro objetivos particulares que se propusieron y a cada una de las tareas que se desarrollaron, que al final condujeron al cumplimiento del objetivo general.

Se describe área de estudio, información útil para comprender las principales características de la zona donde se realiza la investigación.

Es importante conocer cómo se cumplen cada una de las tareas, la metodología seguida y que resultados se obtienen. Desde la concepción de la idea del secador solar, su diseño y construcción, su puesta en funcionamiento, su evaluación en diferentes condiciones y su modelado matemático como base teórica para finalmente hacer la propuesta de una instalación a escala semindustrial.

3.2 Área de estudio.

Municipio de Cintalapa de Figueroa en el Estado de Chiapas. México.

(Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. INEGI. 2010).

El nombre de Cintalapa es de origen náhuatl y quiere decir: "agua en el subsuelo". La primera cultura que se instaló en la región fue la Olmeca. Durante el Siglo XI y XII D.C se asentaron en la zona los toltecas; posteriormente fueron los zoques. Entre 1486 y 1488, llegan los aztecas durante una de las expediciones de conquista de Ahuízotl. Durante la época colonial, Cintalapa fue una aldea

ganadera; el 17 de julio de 1926, se le concede la categoría de Villa; el 3 de febrero de 1931, el de ciudad y el 6 de enero de 1942 se le agrega el apellido Figueroa, en homenaje a la memoria del poeta Rodolfo Figueroa, se ubica en la región I Centro.

Localización. Se encuentra en el extremo oeste del Estado (figuras 3.1), sus coordenadas geográficas son $16^{\circ} 39' N$ y $93^{\circ} 44' W$ su altitud es de 540 msnm. Limita al norte, con el municipio de Tecpatán, al oeste con el Estado de Oaxaca, al este con Jiquipilas y Ocozocoautla de Espinosa y al sur con Arriaga.

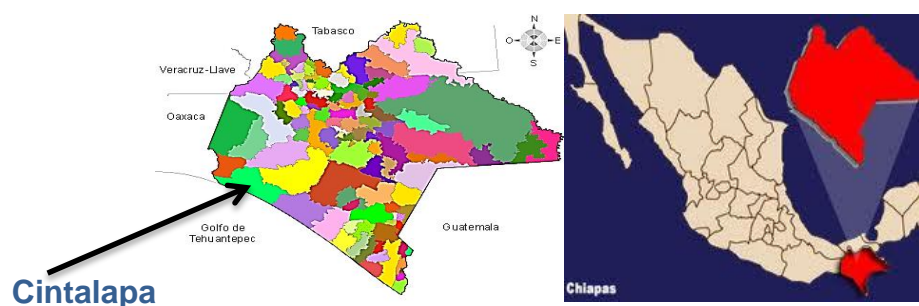


Figura 3.1 Mapa de México destacándose el Estado de Chiapas y el Mapa político de Chiapas. Municipio de Cintalapa. INEGI

Este Municipio cuenta con una extensión territorial de 2,404.6 km² representa el 19 % del territorio de la región Centro y el 3.18% de la superficie estatal, predomina un clima semicálido subhúmedo, con temperatura media anual es de 24.5°C y una precipitación pluvial de 800 milímetros anuales.

Los principales ecosistemas son; bosques de encino-pino, presenta una gran variedad de especies de animales. Su territorio abarca parte de las Reservas de la Biósfera La Sepultura y El Ocote, y del Corredor Biótico Chimalapas -

Uxpanapa - El Ocote. El principal uso del suelo es la agricultura y pecuario, el 65% son terrenos ejidales y el resto son de propiedad privada.

Perfil socio demográfico. En el municipio habitan un total de 3,809 personas que hablan alguna lengua indígena. La población total es de 64,013 habitantes, representa 6.87% de la región y 1.63% de la estatal; el 49.86% son hombres y 50.14% mujeres. Su estructura es predominantemente joven, 64% de sus habitantes son menores de 30 años y la edad promedio es de 20 años (figura 3.2). La densidad poblacional es de 27 habitantes por km².

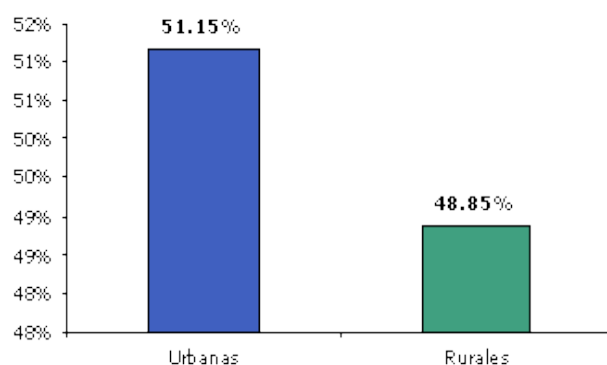


Figura 3.2 Distribución espacial de la población.

De acuerdo al Consejo Nacional de Población (CONAPO) el municipio presenta un grado de marginación alto.

Actividad económica. Se produce maíz, cacahuate, frijol, sorgo y café principalmente y frutas tales como aguacate, mango, tamarindo, limón, naranja, jocote y mandarina. Se cría ganado bovino para carne y leche, porcino, equino y

porcino. Se elaboran polvos, jabones, pomadas, los cuales son famosos por sus propiedades para curar heridas.

Es un Municipio es Tropical, con un clima agradable cálido-húmedo excepcional para la agricultura con un recurso energético muy importante como es el Sol.

3.3 Diseño Investigativo.

El estudio investigativo, se estructuró de forma tal que se dé cumplimiento a los cuatro objetivos específicos.

3.3.1 Diseño y construcción del prototipo del secador solar.

Este primer objetivo se desarrolló siguiendo las siguientes tareas.

3.3.1.1- Determinación del recurso energético.

3.3.1.2- Selección del tipo de secador.

3.3.1.3- Cálculo de la demanda energética.

3.3.1.4- Desarrollo de un sistema de control de parámetros

3.3.1.5- Desarrollo de un sistema de acumulación térmica.

3.3.1.6- Dimensionado de la superficie de captación y de la cámara de secado.

3.3.1.7- Construcción del prototipo de secador solar indirecto y de circulación forzada con los sistemas de control de parámetros y del sistema de acumulación térmica.

3.3.1.1 Determinación del recurso energético.

Existen dos formas de determinar la radiación solar:

- 1.- A través de mediciones puntuales con una estación meteorológica emplazada en el lugar de estudio. Esta es una medición directa.
2. Haciendo cálculos teóricos según modelo matemático de Hottel (1976) que se describe más adelante (Navarrete y Torres, 2009). Con este modelo matemático se puede predecir la radiación solar total que cae sobre cualquier lugar en la tierra y cualquier día.

La radiación total o global tiene dos componentes la radiación directa y la difusa, además existe una radiación que se refleja desde cualquier superficie de la tierra llamada de albedo pero generalmente es tan pequeña que se puede despreciar incluso si el suelo es altamente reflejante.

La radiación directa (G_{dir}) es la que recibe la superficie de forma directa en línea recta proveniente del sol, la radiación difusa (G_{dif}) se produce por el rebote de la radiación directa en las moléculas de aire, sólidos en suspensión y nubes. (Navarrete y Torres, 2009).

$$G = G_{dir} + G_{dif} \quad (3.1)$$

Radiación directa (G_{dir}). Esta se determina por:

$$G_{dir} = \mu e^{(-\tau/\mu_0)} G_{sc} \quad (3.2)$$

Dónde G_{sc} es la constante solar (W/m^2); μ es un valor que depende del ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la superficie.

$\mu = \cos \theta$ Donde θ es el ángulo de incidencia de la radiación solar.

$\mu_0 = \cos \theta_z$ Donde θ_z es el ángulo cenital.

τ es el factor de claridad de la atmósfera o trasmisividad que a su vez tiene dos componentes, la trasmisividad directa (τ_b) y difusa (τ_d), que se determinan por:

Trasmisividad directa (τ_b) en función del ángulo cenital (θ_z).

$$\tau_b = a_0 + a_1 e^{\left(\frac{-k}{\cos \theta_z}\right)} \quad (3.3)$$

Donde a_0 , a_1 y k son parámetros empíricos los cuales se calculan como sigue:

$$a_0 = r_0 [0.4237 - 0.00821(6 - A)^2] \quad (3.4)$$

$$a_1 = r_1 [0.5055 + 0.00595 (6.5 - A)^2] \quad (3.5)$$

$$k = r_k [0.2711 + 0.01858 (2.5 - A)^2] \quad (3.6)$$

El parámetro A es la altura sobre el nivel del mar de la localidad en Kilómetros.

Tabla 3.1 Valores de r_0 , r_1 y r_k en dependencia del tipo de clima.

Clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verano, Latitud media	0.97	0.99	1.02
Verano, Subartico	0.99	0.99	1.01
Invierno, Latitud media	1.03	1.01	1.00

Trasmisividad difusa (τ_d) en función de la trasmisividad directa

$$\tau_d = 0.271 - 0.2939\tau_b \quad (3.7)$$

Radiación Difusa

$$G_{dif} = [(1 + \cos \beta)/2] + \uparrow G_{dif} + [1 - \cos \beta]/2 \downarrow G_{dif} \quad (3.8)$$

$\uparrow G_{\text{dif}}$ y $\downarrow G_{\text{dif}}$ son valores de radiación reflejadas por la atmósfera y por el piso respectivamente que se determinan como por un modelo matemático (Navarrete y Torres 2009).

Radiación reflejada por la atmosfera

$$\uparrow G_{\text{dif}} = G_{sc} \mu_0 \left[\frac{1}{1+\zeta} (\zeta e^{\partial^+ \tau} + e^{\partial^- \tau}) - e^{-\frac{\tau}{\mu_0}} \right] \quad (3.9)$$

Donde μ_0 es un factor que depende del ángulo de inclinación ya visto; ζ es un factor que depende de la absorbancia y reactancia de los alrededores

$$\zeta = \left[\frac{\partial^- + A - B\phi}{\partial^+ + A - B\phi} \right] e^{(\partial^- - \partial^+)t} \quad (3.10)$$

$$\partial^\pm = \frac{1}{2}(C - A) \pm \frac{1}{2}[(C + A)^2 - 4BD]^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

$$A = \frac{2 - \omega_0}{2\mu_0} \quad (3.12)$$

$$B = \omega_0 \quad (3.13)$$

$$C = 2 - \omega_0 \quad (3.14)$$

$$D = \frac{\omega_0}{2\mu_0} \quad (3.15)$$

Donde ϕ es un coeficiente de reflexión del suelo; ω_0 es el factor de reflexión de la atmosfera, va desde $\omega_0 = 1$ para atmosferas completamente dispersantes y $\omega_0 = 0$ para atmosferas completamente absorbentes.

Radiación reflejada por el suelo

$$\downarrow G_{\text{dif}} = \phi G_c \mu_0 \left[\frac{1}{1+\zeta} (\zeta e^{\partial^+ \tau} + e^{\partial^- \tau}) \right] \quad (3.16)$$

Con este modelo descrito se puede hacer el cálculo teórico del recurso energético en la zona de estudio. Se elaboró un programa de este modelo en Excel que se expone en el anexo # 1.

3.2.1.2 Selección del tipo de secador.

Para la selección de uno u otro tipo de secador hay que hacer un análisis de las características del producto a secar y de los objetivos que se pretende alcanzar.

Hay que tener en cuenta que al Té Limón no le puede incidir directamente la radiación solar, (Soto 2001), que debe secarse a temperaturas por debajo de 60 °C y además se quiere controlar la temperatura y humedad relativa dentro de la cámara de secado. Entonces el secador que se propone constará de dos partes fundamentales, el colector solar y la cámara de secado; a este secador se le desarrolló un sistema que control de los parámetros preestablecidos y además un sistema de acumulación de calor para hacer la instalación más eficiente.

3.3.1.3 Cálculo de la demanda energética (W_a).

La cantidad de agua a eliminar en un tiempo t (h) durante el secado es.

$$W_a = W_0 \left[\frac{(M_{wb1} - M_{wb2})}{(1 - M_{wb2})} \right] t \quad (3.17)$$

Donde W_0 es el peso inicial del material a secar (Kg); M_{wb1} es la humedad base húmeda en el estado inicial y M_{wb2} es la humedad base húmeda en el estado final ambas en (Kg agua / Kg prod húmedo).

Esta ecuación también se puede poner en función de la humedad base seca.

$$W_a = W_d \left[\frac{(W_{db1} - W_{db2})}{(1 - W_{db2})} \right] t \quad (3.18)$$

Donde W_d es el peso de materia seca (Kg); W_{db1} y W_{db2} son las humedades base húmeda (Kg agua / Kg producto seco) en el estado inicial y final respectivamente.

El consumo de aire en (Kg/s)

$$m_a = \frac{W_a}{W_2 - W_1} \quad (3.19)$$

Donde W_2 , W_1 son las humedades absolutas del aire al pasar del estado 1 (entrada) al 2 (salida) en el proceso de secado.

La energía demandada

$$Q_a = m_a (h_2 - h_1) \quad (3.20)$$

Donde Q_a es la energía consumida en la evaporación de la humedad del producto; h_1 y h_2 son las entalpías del aire al pasar del estado 1 (entrada del aire a la cámara de secado) al 2 (salida del aire una vez atravesada la capa de producto) en (*Kj / Kg aire seco*).

3.3.1.4 Desarrollo de un sistema de control automático de parámetros.

Este sistema de control permite, controlar las variables preestablecidas son: temperatura y la humedad relativa dentro de la cámara de secado.

El sistema de control consta de un microcontrolador 18F4520 que será el cerebro del sistema, un sensor de humedad y temperatura SHT11, pantalla de cristal líquido LCD de 4 x16 para cambiar datos, teclado matricial de 4x4, un motor reductor para accionar la escotilla de ventilación, dos switch de final de carrera para detener el motor. En la figura 3.3 se muestra un esquema del sistema de control de parámetros del secador.

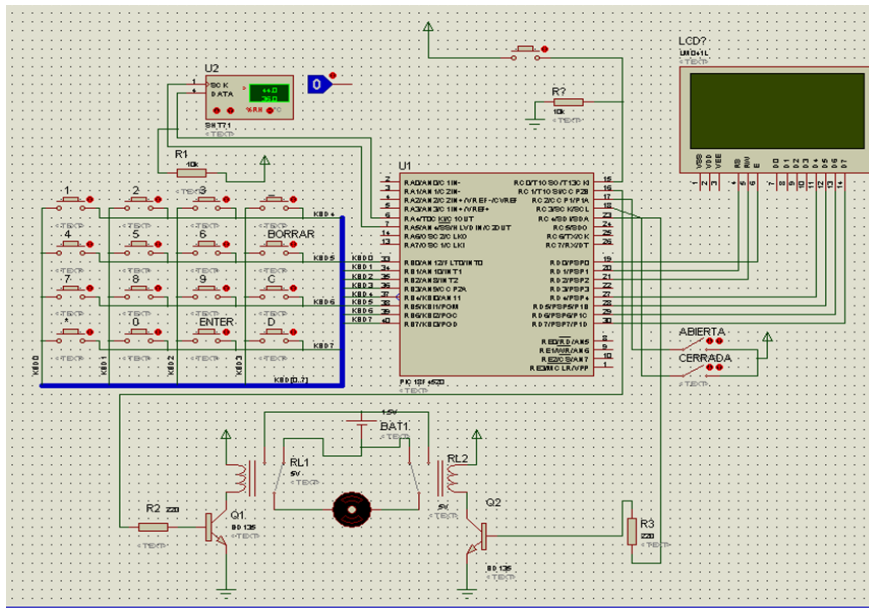


Figura 3.3 Proyecto electrónico del sistema de control para el prototipo de secador solar.

3.3.1.5 Desarrollo de un sistema de acumulación térmica.

El sistema de acumulación térmica contiene agua como sustancia acumuladora por su alta capacidad térmica. Es un sistema forzado de recirculación del agua entre el colector solar y el tanque de almacenamiento que está en la cámara.

La cantidad de calor capaz de almacenar el agua es $Q = m C_p (T_f - T_i)$, sabiendo que la energía que incide en Cintalapa (Q) y las temperaturas promedio de entrada (T_i) y salida (T_f) del agua al el tanque de acumulación, se puede saber la masa de agua (m) necesaria y así su volumen.

El colector de agua es de tubos de cobre adosado a la placa colectora, la circulación del agua dentro del sistema de acumulación es debido a una bomba fotovoltaica de 12 v corriente directa, estos elementos se observan en la figura 3.4.

Esta agua caliente entrega su energía en horas de la noche a la cámara de secado.

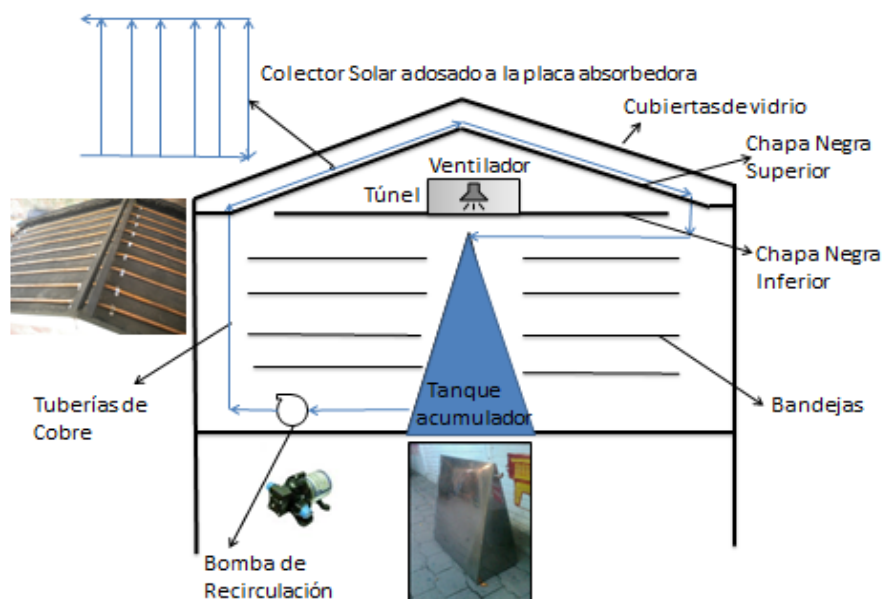


Figura 3.4 Esquema del sistema de acumulación térmica.

3.3.1.6 Dimensionado de la cámara de secado y superficie de captación

Las dimensiones de la cámara de secado están en dependencia de un parámetro muy importante que es el área de secado necesaria para llevar al producto a su humedad de equilibrio, la capacidad de producción específica de Té Limón, también se tendrá en cuenta el sistema de carga y descarga del mismo, el espesor de la capa de producto y el recurso energético. Por las características del Té Limón este se debe colocar en bandejas con fondo de tela metálica para que el aire caliente este en contacto con él por todos los lados incluso por el fondo.

EL colector solar está en la parte superior (techo) del secador el cual consta con dos lados (techo a doble caída) con una cubierta de vidrio. Entre la cubierta y a una distancia de 10 cm esta la chapa negra adsorbedora (superior); entre ambas partes se produce el efecto invernadero con el objetivo de captar la mayor cantidad de energía solar posible. Entre esta chapa negra superior y la chapa negra inferior se forma un túnel como se mostró en la figura 3.4, por dicho túnel recircula el aire calentándose y dirigiéndose impulsado por el ventilador hacia la cámara de secado. Para su diseño se tuvo en cuenta el ángulo de inclinación óptimo para la latitud terrestre donde será emplazado el secador (18°), la incorporación del calentador de agua del sistema de acumulación de energía entre otros aspectos.

3.3.1.6.1- Flujo de aire necesario para el secado

Según fórmula empírica (Macedo I.C, Altemani C.A.C. 1978) el aumento de la temperatura del aire respecto al ambiente es:

$$\Delta T = 2\beta(T_b - T_c) \left(\frac{I_t}{I_0} \right) \quad (3.21)$$

$\Delta T = T_o - T_a$ es la diferencia de temperatura entre el aire que sale del colector y el ambiente; β es un parámetro adimensional que esta entre 0.14 – 0.25: Óptimo $\beta = 0.20$. (Macedo I.C, Altemani C.A. 1978); $(T_b - T_c)$ es la diferencia de temperatura entre el punto de ebullición y de congelación del agua presión atmosférica (100°C); I_t es la intensidad de la radiación incidente promedio sobre el plano del colector (500 W/m^2); I_0 es la constante solar (1367 W/m^2).

La humedad que es necesaria extraer al producto para llevarlo a la humedad final deseada precisa del cálculo del flujo de la masa total de aire necesaria para el secado. La cantidad de humedad que se elimina (M_w) depende del cultivo y es.

$$M_w = \frac{W_w(M_{iwb} - M_{fwb})}{(1 - M_{fwb})} \quad (3.22)$$

Donde W_w es la masa inicial (Kg); M_{iwb} humedad inicial base húmeda (%) y M_{fwb} es la humedad final (%).

El volumen total de aire necesario (V_a) para la eliminación de la humedad se evalúa a partir de la ecuación. (Forson et al. 2007).

$$V_a = \frac{M_w L_t R_a T_a}{C_{pa} P_a (T_o - T_f)} \quad (3.23)$$

Donde R_a es la constante de los gases ideales ($R_a = 283 \text{ Kj/Kg K}$); P_a es la presión parcial del aire seco en la atmósfera; C_{pa} es el calor específico del aire a presión constante ($C_{pa} = 1005 \text{ J/Kg K}$) y T_f es la temperatura promedio del aire que sale de la cámara de secado (K).

$$T_f = T_a + 0.25 (\Delta T) \quad (3.24)$$

T_a es la temperatura promedio del aire ambiente (K).

$T_o - T_f$ diferencia entre la temperatura de aire que sale del lecho de secado y la temperatura del aire que sale del calentador solar y entra a la cámara (K).

El valor del calor latente de evaporación en la ecuación 3.23, se puede estimar mediante la siguiente expresión (Liley P.E y Gambill W.R 1973).

$$Lt = Rg Tc Tb \ln \left(\frac{Pc}{10^5} \right) \left[\frac{(Tc - Tpt)^{0.38}}{(Tc - Tb)^{1.38}} \right] \quad (3.25)$$

Donde Rg es la constante de los gases para el vapor de agua ($Rg = 461 \text{ J/Kg K}$); Tb el punto de ebullición del agua (K); Pc es la presión crítica del agua (Mpa); Tpt es la temperatura promedio del producto (K) y Tc es la temperatura crítica del agua (K).

Al valor calculado por la ecuación 3.25, se le debe incrementar entre un 10 y un 20 % recomendado en la literatura (Johnson H.K, Dale A.C 1974). Sugerido (15 %)

La temperatura promedio del producto durante el secado se puede estimar como la media ponderada de las temperaturas To y Ta .

$$Tpt = 0.25 (3To + Ta) \quad (3.26)$$

El caudal de aire se calcula a partir de la relación.

$$m_a = V_a / t \quad (3.27)$$

Donde t es el tiempo total necesario para el secado de una muestra dada de material húmedo hasta su humedad de equilibrio.

3.3.1.6.2- Área de secado en el interior de la cámara.

El área efectiva para el secado (A) se obtiene por. (Forson F.K. et al. 2007).

$$A = \frac{Ww}{\rho hl \xi (1 - \varepsilon v)} \quad (3.28)$$

Donde ρ es la densidad del producto en condiciones húmedas. El Té Limón tiene una densidad de 10.5 Kg/m^3 (Costa A y Ferreira R. 2006, hl es el espesor óptimo

de la capa de producto en la bandeja (m); ξ es la porosidad del producto ($\xi = 0.05$) (Domínguez J. A. 2005). εv es la fracción de la bandeja que queda vacía.

Por los arreglos en que situamos el Té Limón en las Bandejas ($\varepsilon v = 0$).

La densidad de carga de las bandejas será en ($Kg \text{ prod}/m^2 \text{ area de secado}$)

$$L = \frac{Ww}{A} \quad (3.29)$$

3.3.1.6.3- Área de captación de la energía solar.

El área de captación de un colector solar está relacionada con su eficiencia térmica (η) que viene dada por la ecuación. (Forson F.K. et al. 2007).

$$\eta = \frac{Mw * Lt}{It * Ac * t} \quad (3.30)$$

Donde Ac es el área total de captación. La cual se obtiene de la expresión 3.30 e

I_t es la energía incidente sobre el secador (W/m^2).

3.3.1.6.4- Caída de presión a través del lecho de secado.

La resistencia al flujo de aire a través de un lecho de productos agrícolas es importante para la correcta selección del ventilador ya que esta tendrá que suplir esta caída de presión y garantizar que el agente secante atraviese la capa de producto húmedo y es expresada en la forma.

$$u = a \left(\frac{\Delta P}{hl} \right) \quad (3.31)$$

Donde u es la velocidad del aire superficial; hl es el espesor de lecho de secado (m); a es una constante cuyo valor se determina experimentalmente, en nuestro caso, ($a = 0.465 \text{ m}^3\text{s/Kg}$).

Esta caída de presión hay que tenerla en cuenta para calcular la carga que debe suplir el ventilador como elemento fundamental de la forma de tiro del prototipo.

3.3.1.7- Construcción del prototipo de secador solar

El diseño del prototipo de secadero solar tiene como elementos principales el colector solar de aire de placa plana a dos aguas que constituye a su vez el techo, la cámara de secado con las bandejas para el producto a secar y el sistema de recirculación forzada de aire (ventilador). Se utilizaron angulares de 75 x 75 de hierro para la estructura general. Para la construcción del colector (calentador de aire) tipo túnel se usaron láminas de acero pintadas de negro mate y la cubierta del colector es de vidrio comercial, la placa de abajo del colector que constituye el techo de la cámara de secado, así la cámara de secado gana energía por el aire que le es inyectado desde el colector y por radiación desde el techo.

Todas las paredes del secador que constituyen la cámara de secado fueron fabricadas de muros laminados con inyección de poliuretano (multimuro), las paredes son atornilladas a la estructura general, las puertas están sujetas por bisagras que abrirán hacia afuera garantizando la carga y descarga del secador. Para las juntas se usó hule y para hermetizar el colector silicona.

3.3.2 - Evaluación del prototipo de secado solar.

Aquí se desarrollaron las siguientes acciones.

3.3.2.1.- La evaluación sin carga (en vacío).

Esta evaluación ofrece el comportamiento termodinámico del secador así como determinar la eficiencia térmica del colector y valorar el comportamiento de las propiedades de la sustancia de trabajo (aire) a su paso por el secador como son temperatura y humedad relativa.

Aquí es importante hacer una comparación entre dos secadores similares uno ya diseñado y construido y el propuesto en este trabajo que son iguales pero este último tiene un sistema de acumulación térmica. Esto permite valorar la influencia de este sistema en su desempeño.

Esta evaluación se llevó a cabo disponiendo termopares tipo K en las mismas partes de ambos secadores tales como; cámara de secado, cubierta de vidrio, placa adsorbadora ennegrecida y paredes internas del secador: entrada y salida del tanque acumulador, paredes interiores de la cámara, etc. Además se registró la variación de la humedad relativa del aire dentro de la cámara. Al mismo tiempo la estación meteorológica registra los parámetros ambientales como la humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad del viento exterior así como la radiación solar incidente, entre otras.

Como resultado de esta evaluación se obtuvieron los niveles de temperatura y humedad del aire dentro de la cámara de secado y datos necesarios para el cálculo de pérdidas de calor y por ende de la eficiencia térmica del prototipo. Se compara la radiación incidente modelado y real en el lugar de evaluación del prototipo.

3.3.2.2.- La evaluación del prototipo con producto (con carga).

Esta prueba ofrece la variación de la humedad del producto con el tiempo (curva de secado) en dependencia del comportamiento de las variables que intervienen en el proceso, se determinará la humedad de equilibrio del Té Limón y la temperatura que se logra en la cámara para realizar el secado, estas corridas nos indican cada qué tiempo debemos reciclar el aire saturado de la cámara por aire fresco y el tiempo de secado del producto que a su vez nos indica el momento en que se hará la descargar y cargar el secador así como la temperatura que alcanzará el producto.

Se evalúa la influencia del sistema de acumulación térmica, cuanta energía adicional nos aporta una vez invertido el flujo de calor al proceso de secado.

Para la evaluación del prototipo se usaron diferentes instrumentos que se detallan a continuación y su posición dentro del mismo.

Termopares: para medir temperatura, se colocaron en la cámara de secado, placa adsorbedora superior, placa adsorbedora inferior, compuerta de salida del aire húmedo de la cámara al ambiente y dentro del producto. Son termopares tipo “K” que trabajan con un Multímetro STEREN tipo gancho modelo MUL – 100 que tienen un rango de medidas de 0 a 750 °C.

Sensor de Humedad Relativa: Para la cámara de secado, marca HANNA HI-6838 Estación Meteorológica. Registra en los alrededores del secador la radiación solar, temperatura ambiente, humedad relativa del aire, velocidad del viento (parámetros exteriores). Esta estación cuenta con sensores internos, el registrador cuenta con toma de temperatura y humedad relativa en un rango de -20 °F a 70 °F y de 20% a 100 %, respectivamente, con exactitudes de $\pm 0,7$ °F y ± 3 %. Se usó

un Piranómetro para medir la radiación solar, este tiene una escala entre 300 y 1100 w/m² con un margen de exactitud del $\pm 5\%$.

Balanza Digital: Registra las variaciones de peso de la muestra en el tiempo.

Computadora Personal. Encargada del procesamiento de datos.

Las corridas experimentales para ambas evaluaciones se programaron cada una hora, desde la salida del sol hasta el ocaso. Luego estos datos experimentales se procesaron y analizaron.

3.3.2.3.- La evaluación de la calidad del producto seco final.

En colaboración con los laboratorios de la Facultad de Nutrición de La UNICACH se realizó la caracterización bromatológica del Té Limón seco en el prototipo y el deshidratado en las instalaciones de Cintalapa.

Como antecedente de este tema tenemos los estudios hechos por la Universidad de Cienfuegos en Cuba (Soto 2001), además de estos también se comparan con los valores registrados en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM).

Contenido	Porcentajes
Hojas ennegrecidas	5 (máximo)
Materia orgánica e inorgánica extraña	1 (máximo)
Humedad	10 (máximo)
Cenizas	10 (máximo)
Cenizas insolubles en ácido clorhídrico	0,5 (máximo)
Sustancias solubles en agua	25 (mínimo)
Aceite Esencial	0,2 (mínimo)

Las pruebas de laboratorio realizadas al Té Limón seco se exponen a continuación (Domínguez.2003) y (Pearson 1995).

1.- Determinación de humedad.

Se entiende por humedad el agua libre que contiene el producto. Para una buena conservación ha de ser del 10%. Se pueden usar varios métodos: Método gravimétrico (fue el usado), Método volumétrico, Método Karl-Fisher.

Se usó el método gravimétrico para el cual se utilizaron 3 charolas rectangulares de 4 x 5 x 1 cm con papel aluminio para colocar las muestras, estas se ubicaron en una estufa a la temperatura constante de 50 °C, hasta obtener el peso constante (P_0).

Descripción del proceso

1. Distribuir de 5g de muestra (P_m) en el interior de la charola.
2. Colocar la charola en la estufa a 50 °C durante 24 horas.
3. Hacer mediciones de pérdidas de pesos de las charolas hasta que este se mantenga constante.
4. Retirar las charolas finalmente y anotar peso de muestra seca (P_i), 0 % de humedad final
5. Calcular el contenido de humedad a partir de la pérdida de peso de la muestra.

$$\% \text{ de humedad} = \frac{(P_m + P_f) - P_i}{P_m} 100\% \quad (3.32)$$

2.- Determinación de cenizas

Las cenizas representan el contenido en sales minerales o materia inorgánica de la droga. En condiciones rigurosas, es constante y nos permite descubrir falsificaciones por otras drogas, tierras u otros minerales presentes en la muestra.

Las cenizas dan una idea del contenido en materia mineral de la planta, que suele ser alrededor del 5 %. Las cenizas totales se logran por calcinación que son las cenizas derivadas del tejido vegetal (cenizas fisiológicas).

Para esta prueba se usaron crisoles y una mufla a una temperatura de 550 °C, se preparan muestras molidas finamente.

Descripción el proceso

1. Limpiar y marcar con lápiz los crisoles
2. Colocarlos en la estufa a 50 °C, sáquelos con una pinza y déjelos enfriar en un desecador y luego de enfriados cerrarlos y pesarlos (P_0)
3. Adicionar 5 g (P_m) de muestra molida, en una capa delgada, en cada crisol.
4. Calentar hasta que deje de liberarse humo, cuidando que no se incendie, pues puede haber pérdida de peso por “proyecciones de la muestra”.
5. Incinerar en la mufla a temperatura de 550 °C.
6. Mantener la temperatura de la mufla hasta que las cenizas tengan un color Blanco a Gris-Blanco (aproximadamente de 2 a 3 horas).
7. Retirar los crisoles de la mufla, colocarlos en un desecador para que se enfríen, por 30 minutos y pesar los crisoles (P_f), sin tocarlos con las manos.
8. Incinerar durante otros 15 minutos y volver a pesar después de enfriar. Repetir este último paso hasta que no se observe una disminución de peso significativa.

$$\% \text{ de cenizas} = \frac{P_f - P_0}{P_m} \cdot 100\% \quad (3.33)$$

3. Determinación de extracción de grasa cruda.

Para esta prueba se usaron la siguiente instrumentación.

- Matraz Bola con fondo plano y cuello esmerilado de 250 ml.
- Mortero con mango.
- Equipo de Extracción Soxhlet.
- Pinza para crisol.
- Balanza analítica.
- Papel filtro o cartuchos de papel.
- Desecador.
- Estufa de calentamiento.
- Perlas de vidrio.
- Reactivo: Hexano.

Acciones antes a la Práctica

1. Moler, lo más fino y homogéneamente posible la muestra (50 g) y secarla en una Estufa a una temperatura de 65 °C.
2. Colocar 3 cartuchos, con su respectiva cama y tapa de algodón, a peso constante. Pesar (P_0) con ayuda de la pinza y regresar al desecador, sin tocar.

En el momento de la Práctica

3. Pesar 5g de muestra seca (P_m) dentro del cartucho previamente pesado (P_0). Luego depositar el cartucho con su contenido en la cámara del extractor, cuidando que este quede abajo del sifón.
4. Aplicar de 2 a 3 sifonadas de hexano al extractor.
5. Abrir la llave de agua del refrigerador y encender la fuente de calor.
6. Extraer la grasa gruesa por 16 horas (cuidar de que siempre haya paso de agua y hexano suficiente), dependiendo del contenido de grasa de la muestra.

7. Colocar el cartucho con la muestra sin grasa a peso constante cuando se haya evaporado el solvente. Pesar (P_f).

$$\% \text{ de extracto etéreo} = \frac{P_f - P_0}{P_m} 100\% \quad (3.34)$$

4. Determinación de proteína cruda.

Los nutrientes se analizan a partir de las cenizas totales de 1 g de muestra calcinada a 400°C durante 24 horas y disueltas en ácido clorhídrico (1:1). La determinación analítica de metales y elementos tales como Na, K, Mg, Ca, Fe, Cu, Zn y Mn se analizan por espectrofotometría de absorción atómica de llama.

Material y equipamiento usado en esta prueba

- Matraz Micro- Kjeldhal de 30 ml
- Pipetas de 2ml
- Matraz Erlen Meyer de 125 ml
- Pipetas de 10ml
- Equipos de Destilación
- Digestor
- Equipos para titulación
- Balanza analítica.
- Reactivos: Ácido clorhídrico, Ácido Sulfúrico concentrado (libre de Nitrógeno); Oxido de Mercurio, Sulfato de Potasio (libre de Nitrógeno); Solución de Sosa -Tiosulfato Pentahidratado.

Disolver 60 g de sosa y 5 g de Tiosulfato en agua y diluir a 100 ml; 50 ml de solución saturada de ácido Bórico al 5 %; HCl 0.02N o 0.05 N y como Catalizador 1.9 g de sulfato de potasio +40 mg de Oxido de mercurio.

Indicadores micro-kjeldahl

- 1.- Mezclar dos partes de solución alcohólica de Rojo de Metilo al 0.2 % con una parte de solución alcohólica de Azul de metileno al 0.2 %.
- 2.- Mezclar una parte de Solución alcohólica de Rojo de Metilo al 0.2 % con cinco partes de solución alcohólica Verde de Bromocresol al 0.2 %.

Procedimiento

- 1.- Pesar entre 0.2 a 0.1 g de muestra libre de grasa y seca.
- 2.- Adicionar la muestra a un matraz Micro-Kjeldhal de 30 ml.
- 3.- Agregar 2 gr. de catalizador Micro-Kjeldhal.
- 4.- Agregar 2 ml de ácido sulfúrico
- 5.- Adicionar perlas de vidrio y colocar en el digestor de 1 a 1.5 horas (cuando la muestra se vuelve transparente, calentar 1 hora más).
- 6.- Transferir la solución al aparato de Destilación y lavar el matraz de 5 a 6 veces con agua.
- 7.- Colocar un matraz de 125 ml con 5 ml de ácido Bórico y 3 gotas de indicador, bajo el extremo del condensador, cuidando que la manguera quede sumergida en la solución de ácido Bórico.
- 8.- Agregar 10 ml de la Solución Sosa-Tiosulfato, y comenzar la Destilación.
- 9.- Colectar 50 ml de destilado
- 10.- Titular con HCl 0.02 N o 0.05 N hasta la aparición de un color violeta.

Nota: Se debe hacer lo mismo sin muestra (blanco).

$$\% \text{ de } N \text{ total} = \frac{(\text{ml de HCl muestra} - \text{ml de HCl blanco})(0.0014)}{\text{peso de la muestra en mg}} 100\% \quad (3.35)$$

$$\% \text{ de proteína cruda } (P_c) = (\% \text{ de } N \text{ total})(Factor) \quad (3.36)$$

Según el libro “Técnicas de Laboratorio para Análisis de Alimento.” de D. Pearson el factor a que hace referencia la ecuación 3.36 está en dependencia del tipo de alimento.

Tabla 3.2 Factor para determinar el por ciento de proteína cruda final.

Materia prima	Factor
Trigo (harina blanca)	5.83
Trigo (otras harinas)	5.70
Macarrones	5.70
Salvado	6.31
Arroz	5.95
Cebada, Avena Y centeno	5.83
Maíz	6.25
Soya	5.71
Nueces, Cacahuete	5.41
Almendras	5.18
Otras nueces	5.30
Lácteos	6.38
Gelatina	5.55
Otros alimentos	6.25

5.- Determinación de fibra cruda

Materiales y equipamiento para esta prueba

- Vaso de Berselius
- Probeta de 50 ml
- Vaso de precipitado de 250 ml
- Embudo Bucher
- Balanza analítica
- Condensador de Fibra Cruda
- Papel filtro
- Reactivos: Acetona y Reactivo de Scharrer-Kurschener (S - K). Para preparar el reactivo (S - K) hay que disolver 50 g de Ácido Tricloroacético

en 1.0 a 1.5 l de Ácido Acético al 70%, adicionar 124 ml de Ácido Nítrico (65% y densidad de 1.4) y complementar a 2.0 l con Ácido Acético al 70%.

Procedimiento

Antes de la práctica

- 1.- Muestra biológica desengrasada, molida y tamizada
- 2.- Colocar el papel filtro a peso constante (P_0).

En el momento de la práctica

- 3.- Transferir la muestra al Vaso de Berselius y adicione 30 ml del reactivo S-K.
- 4.- Colocar el vaso en el Condensador de Fibra Cruda.
- 5.- Llevar el contenido del Vaso de Berselius a ebullición lo más rápido posible (agitar cada 5 min., aproximadamente).
- 6.- Hervir por exactamente 30 min.
- 7.- Filtrar en caliente a través del embudo Buchner (utilizando el papel filtro llevado a peso constante).
- 8.- Lavar el residuo con agua caliente.
- 9.- Lavar el residuo con acetona (hasta obtener la decoloración).
- 10.- Colocar a peso constante el papel filtro.
11. Pesar el papel filtro, más residuo (P_1).

$$\% \text{ de Fibra} = \frac{(P_1 - P_0)}{P_m} 100 \quad (3.37)$$

6.- Determinación de aceites esenciales.

El aceite esencial de Té Limón se extrae por destilación directa con vapor de agua, es un líquido de color amarillo con un potente olor a limón y contiene como componentes principales el Citral. (Guenther, 1950 y Sharapin, 2000).

El aceite esencial de esta planta se acumula en células que fueron detectadas por Lewinson y Dudai, (1998), en el lado adaxial del mesófilo de las hojas, comúnmente adyacente al tejido no fotosintético y entre los haces vasculares. Estos resultados sugieren que la acumulación del Citral tiene lugar en dichas células individuales dentro del tejido foliar.

Reactivo: Sulfato de sodio anhidro.

Equipo de destilación

- Balón de 5 L.
- Manta de calentamiento.
- Trampa Dean Stark con llave de teflón.
- Refrigerante de bolas.
- Mangueras.

Procedimiento

1. La masa vegetal verde cosechada debe ser sometida a un proceso de troceado para facilitar la extracción del aceite esencial, el troce de las hojas debe ser en pedazos de 5 a 10 cm. La masa vegetal debe ser destilada ante las 6 horas para evitar que se produzca su fermentación la cual altera la calidad organoléptica del aceite esencial.
2. Moler la materia prima.
3. Pesar la planta (3 – 5 kg).

4. Poner la materia prima en un hidroddestilador (alambique), de manera que forme un lecho fijo compactado con una presión de 6 psi; de manera que se eviten canales de vapor durante el proceso de destilación que provocan una disminución de los rendimientos.
5. Inyectar vapor de agua en el hidroddestilador (100 °C), evitando el quemado de la muestra porque si no se altera la calidad organoléptica del aceite esencial, este proceso de precalentamiento demora alrededor de 15 minutos.
6. Destilar por unos 50 minutos. Suspenda el calentamiento cuando el volumen del destilado sea de 100 o 150 ml aproximadamente. Este proceso debe ser controlado, vigilando la presión y que la temperatura del condensado no exceda los 40 grados para evitar la pérdida de sustancias volátiles
7. Garantizar una adecuada separación del aceite esencial y el agua en el separador o florentino. Concluida la destilación se extrae el aceite esencial del florentino.
8. Recoger el aceite esencial en un frasco de vidrio color ámbar.
9. Secar el aceite esencial con sulfato de sodio anhidro.
10. Almacenar el frasco a temperatura fría (4°C).

$$\% Re = \frac{C_a}{M_p} 100 \% \quad (3.38)$$

Donde % Re es el porcentaje de rendimiento del Aceite Esencial (%); C_a es la cantidad de Aceite Esencial extraído (ml); M_p es la cantidad de Té destilado (g).

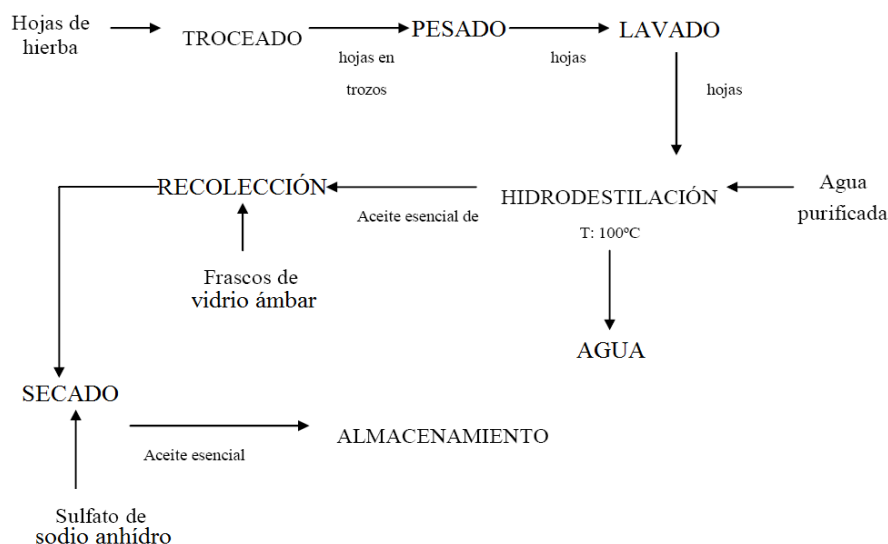


Figura 3. 5 Flujo del proceso para la obtención del aceite esencial

3.3.3 - Modelo matemático del prototipo de secador.

Las técnicas de simulación numérica resultan cada vez de mayor utilidad para la caracterización de procesos. Los modelos matemáticos para la implementación por ordenador de los sistemas de secado solar proporcionan una herramienta importante para predecir la influencia de diferentes parámetros en su funcionamiento, posibilitando la obtención del diseño del sistema de secado más eficiente energéticamente.

La necesidad de tales modelos para el desarrollo y optimización de los diseños de secaderos radica en el hecho de considerar que la experimentación a escala con sistemas que incorporen diferentes combinaciones de diseño, variaciones en las condiciones climatológicas y en los parámetros de secado, resulta altamente complicada. Sin embargo, en la medida de lo posible será interesante comparar los valores obtenidos por

simulación de un modelo teórico con los resultados alcanzados en una investigación puramente experimental.

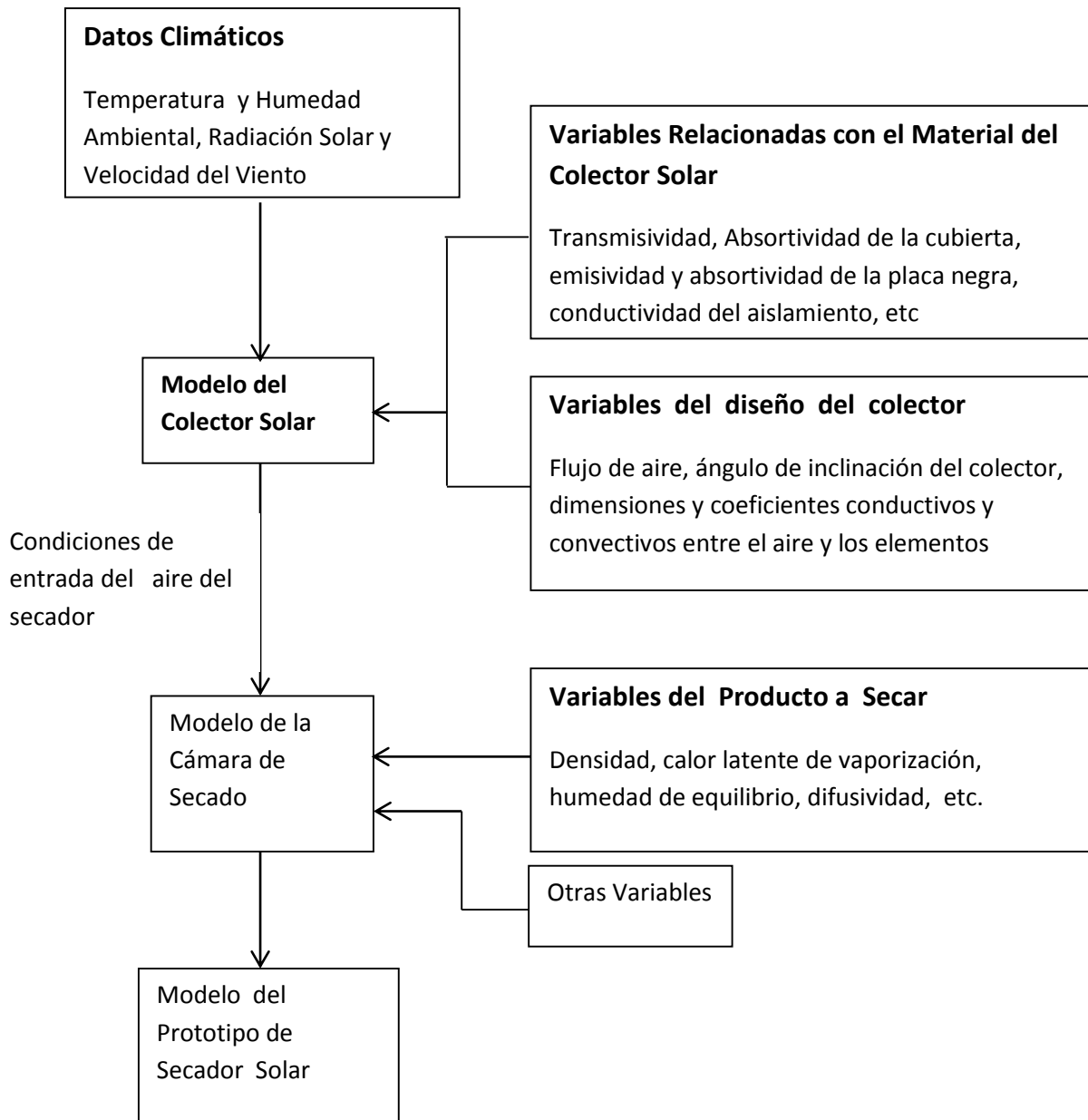


Figura 3.6 Esquema del proceso de modelado matemático del secador solar

El modelo matemático desarrollado para este prototipo de secador solar consta de dos partes bien diferenciadas, correspondientes a los elementos

fundamentales de dicho dispositivo, el colector solar y la cámara de secado. En general, todos los modelos matemáticos se basan en la aplicación de los balances de masa y energía en los diferentes elementos de los que conste el sistema de secado. (Arranz 2005).

Se propuso el siguiente esquema del proceso de simulación teórica del secador, donde se relacionan los dos grandes grupos de variable a medir.

- Variables relacionadas con los materiales del colector solar.
- Variables de diseño del colector.

Variabes del producto a secar

El modelo matemático se basará en las ecuaciones que describen el comportamiento del colector y la cámara de secado Su implementación se realizará mediante programación en Visual Basic y la utilización del método numérico iterativo de Ruge-Kutta de orden cuatro. (Arranz 2005).

Aunque, en general, para la validación del modelo se utilizarán las propiedades registradas durante el ensayo, resulta interesante disponer de valores horarios medios mensuales de los parámetros climáticos para futuras simulaciones de procesos. La modelación por separado del colector solar y de la cámara de secado se hace en el mismo terreno donde se secará el producto.

3.3.3.1 Modelo del colector solar, su rendimiento y temperatura de salida del aire.

El captador solar es el elemento necesario en una instalación de secado solar para precalentar el aire ambiente y así disminuir su humedad relativa, además de

guiarlo e introducirlo en la cámara de secado. Para caracterizar el proceso que tiene lugar en él, las tres variables más importantes a conocer son la temperatura del aire a la salida del calentador, la temperatura de la placa absorbadora y su rendimiento. Por un lado, la temperatura de salida es una variable imprescindible para el modelado de la cámara de secado y, por otro, el rendimiento del captador resulta importante para evaluar la eficiencia del proceso.

3.3.3.1.1.- Rendimiento del colector y temperatura del aire a la salida.

En este capítulo se presenta la expresión para el rendimiento del colector en función del calor útil, la irradiancia global y el área de captación. Para obtener, mediante simulación, el rendimiento de un captador solar, es necesario definir el factor de disipación en el colector (F_R), dado como el cociente entre el calor útil realmente proporcionado por el colector y el calor útil que proporcionaría si toda la superficie del colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido.

$$F_R = \frac{m_a c_{pa} (T_{f2} - T_{fi})}{A_c [S - U_l (T_{fi} - T_{amb})]} \quad (3.39)$$

Donde m_a es el caudal másico de aire (Kg/s), c_{pa} es el calor específico del aire ($J/Kg \text{ } ^\circ C$); A_c es la superficie del colector (m^2); S es la energía absorbida por la placa, U_l es el coeficiente global de pérdidas en el colector ($w/m^2 \text{ } ^\circ C$); T_{amb} es la temperatura del aire ambiente ($^\circ C$); T_{f2} es la temperatura de salida del aire en el colector ($^\circ C$); T_{fi} es la temperatura de entrada del aire al colector ($^\circ C$).

El Q_u se obtiene en función del factor F_R . (Duffie J. A. y Beckman W.A., 1980)

$$Q_u = A_c F_R [S - U_l (T_{f1} - T_a)] \quad (3.40)$$

El coeficiente total de pérdidas de calor (U_l) requiere de un análisis detallado, a continuación se presenta un modelo matemático de cómo obtenerlo. El modelo toma en cuenta cómo contribuyen las distintas pérdidas de calor al coeficiente total, dando la oportunidad de analizar cada una por separado.

$$U_l = U_t + U_b + U_e \quad (3.41)$$

Donde U_t es el coeficiente total de transferencia de calor para la parte superior del colector que se obtiene de la ecuación siguiente. (Duffie J. y Beckman W. 1980).

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_p} \left[\frac{T_p - T_a}{N + f} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.00591Nh_w} + \frac{2N + f - 1 - 0.133\varepsilon_p - N}{\varepsilon_g}} \quad (3.42)$$

De donde N es el número de cubiertas de vidrio. ($N = 1$)

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w * \varepsilon_p) (1 + 0.07899 N) \quad (3.43)$$

$$C = 520(1 - 0.000051\beta^2)$$

Para $0^\circ < \beta < 70^\circ$; Para $70^\circ < \beta < 90^\circ$ se usa $\beta = 70^\circ$

$$e = 0.43 \left[1 - \frac{100}{T_p} \right] \quad (3.44)$$

Donde β es el ángulo de inclinación del colector; ε_g es la emitancia del vidrio; ε_p es la emitancia de la placa; T_a es la temperatura ambiente (K); T_p es la temperatura de la placa (K).

$$h_w = 5.7 + 3.8 v \quad (3.45)$$

Donde h_w es el coeficiente de transferencia de calor al ambiente (w/m^2C); y v la velocidad del viento.

U_b y U_e , son los coeficientes de pérdida de calor por conducción por el fondo y lados respectivamente y que tienen relación con las dimensiones del colector y el tipo y grosor del aislante utilizado, de manera que podemos escribir las siguientes relaciones:

$$U_b = \frac{K_{aisl}}{\delta_{aisl,fondo}} \quad (3.46)$$

$$U_e = \frac{K_{aisl} MP}{l A_c} \quad (3.47)$$

En estas ecuaciones, K_{aisl} es la conductividad térmica del aislante, $\delta_{aisl,fondo}$ es el espesor del aislante por el fondo, P el perímetro del colector y M la altura del mismo, l es el espesor del aislante en los lados o paredes (m) y A_c es el área de captación del colector (m²). En estas dos últimas ecuaciones, todas las variables pueden ser conocidas de manera que se pueden obtener los valores de U_b y U_e .

Con el análisis de las pérdidas de calor, podemos calcular U_l , y teniendo en cuenta que la temperatura de la placa absorbidora varía en el tiempo, asumiremos una temperatura media de la placa (T_{pm}) y por consiguiente el calor útil Q_u queda.

$$Q_u = A_c F_R [S - U_l (T_{pm} - T_a)] \quad (3.48)$$

Una forma de medir el funcionamiento del colector es mediante la eficiencia de colección (η). Esta se define como la relación entre el calor útil y la energía solar incidente sobre el colector en un mismo período de tiempo.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_t A_c} = \frac{m_a c_{pa} (T_{f2} - T_{fi})}{I_t A_c} \quad (3.49)$$

$$S = I_t (\tau \alpha) \quad (3.50)$$

Donde I_t es la radiación total incidente sobre la superficie inclinada del colecto (w/m^2); $(\tau\alpha)$ es el producto transmisividad del vidrio y absorptividad efectiva de la placa ennegrecida.

Asumiendo una variación lineal de temperatura a lo largo del colector, la temperatura a la salida del mismo, T_{f2} resulta:

$$T_{f2} = T_{fi} + \frac{Q_u}{m_a c_{pa}} \quad (3.51)$$

3.3.3.1.2.- Modelo Matemático del colector solar

Las consideraciones bajo las cuales se ha realizado el modelo son las siguientes: el régimen es estacionario, el caudal de aire que entra en el colector es constante y conocido; las temperaturas del fluido y de la superficie absorbidora son temperaturas medias.

En la figura 3.7 se muestran las principales variables que intervienen en el modelo tales como: la energía solar absorbida (S), de la radiación incidente I_t , está en función de la emisividad (ϵ_1) y transmisividad de la cubierta (τ_1) y de la emisividad (ϵ_2) y absorptividad de la placa (α), a la temperatura T_{pm} de dicha placa. Por un lado, la energía absorbida por la placa se transfiere de diferentes formas desde la placa hasta el aire ambiental, a través del aislamiento, mediante el coeficiente de pérdidas U_b ; hasta el fluido a T_{f1} , a través del coeficiente de transferencia de calor h_2 y hasta la superficie interior de la cubierta de vidrio, a través del coeficiente de transferencia de calor por radiación h_1 , por otro lado, la energía se transfiere desde el fluido de trabajo a la cubierta (a una temperatura T_c) a través del coeficiente de transferencia de calor h_2 y se pierde al aire ambiental a través del

coeficiente de pérdidas superiores U_t . Parte de la energía absorbida la placa también es transmitida hacia abajo al aire que está a una temperatura T_{f2} a través del coeficiente U_p .

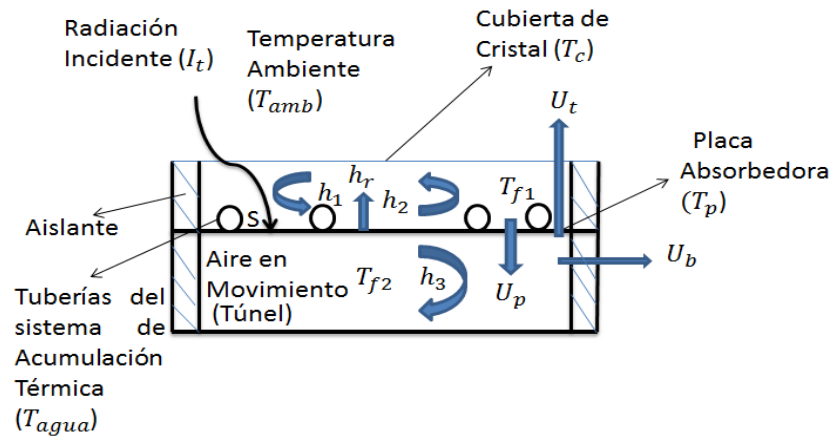


Figura 3.7 Principales variables que intervienen en el modelo del colector solar

Ecuaciones de balances térmicos.

Ecuación de balance de la cubierta de vidrio.

$$h_w(T_{amb} - T_c) + h_r(T_p - T_c) + h_1(T_{f1} - T_c) = 0 \quad (3.52)$$

Ecuación de Balance de la placa negra.

$$S + h_r(T_c - T_p) + h_2(T_{f1} - T_p) + \frac{k}{\delta} (T_{agua} - T_p) = 0 \quad (3.53)$$

Ecuación del Calor útil.

$$q_u = h_3(T_p - T_{f2}) + h_2(T_p - T_{f1}) + \frac{k}{\delta} (T_{agua} - T_p) + U_b(T_{agua} - T_{f2}) \quad (3.54)$$

Siendo T_{amb} la temperatura ambiente, T_c la temperatura de la cubierta, T_p la temperatura de la placa absorbadora, T_{f1} temperatura del fluido (aire) se encuentra en el recinto entre la cubierta de vidrio y la placa absorbadora, T_{f2} temperatura del aire que circula por debajo de la placa absorbadora y recircula por la cámara de

secado, h_1 el coeficiente convectivo de transferencia de calor entre el aire y la cubierta, h_2 el coeficiente convectivo transferencia de calor entre el aire y la placa absorbidora, h_r el coeficiente de transferencia de calor por de radiación entre la cubierta y la placa, S la cantidad de energía absorbida por la placa y q_u la ganancia de calor útil por unidad de área del colector, k conductividad térmica del material de la placa y δ su espesor.

Las ecuaciones de balance anteriores permiten obtener (q_u) en función de U_t , U_b , h_w , h_1 , h_2 , h_3 , h_r , T_{f1} , T_{f2} , T_{amb} y T_{agua} . Haciendo complejos arreglos algebraicos se obtienen las expresiones de la temperatura de la placa y del fluido a la salida del colector que son los valores que deseamos modelar en el colector junto a su eficiencia.

$$T_p = \frac{T_c(h_w+h_r+h_1)-h_wT_a-h_1T_{f1}}{h_r} \quad (3.55)$$

$$T_{f2} = \frac{T_p\left(h_3+h_2+h_r+\frac{K}{\delta}\right) - S - h_2T_{f1} - \frac{K}{\delta}T_a}{h_3} \quad (3.56)$$

Entonces se obtiene la expresión del calor útil por unidad de área en función del Factor de eficiencia (F') y el coeficiente global de pérdidas de calor (U_l).

$$q_u = F' [S - U_l(T_f - T_{amb})] \quad (3.57)$$

Según (Duffie J. A. y Beckman W.A. 1980) este Factor de Eficiencia es.

$$F' = \frac{\frac{1}{U_l}}{W \left[\frac{1}{U_l[D+(W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (3.58)$$

Donde el factor F es:

$$F = \frac{\tanh[m(W-D)/2]}{m(W-D)/2} \quad (3.59)$$

Donde el facto m de esta ecuación es

$$m = \sqrt{\frac{U_l}{K\delta}} \quad (3.60)$$

$$C_b = \frac{K_b b}{\gamma} \quad (3.61)$$

Donde w es la distancia entre tubos en el colector de agua, D es el diámetro exterior de los tubos, D_i es el diámetro interior de los tubos, K conductividad térmica de la placa absorbedora y δ es el espesor de dicha placa. El término C_b es la conductancia de enlace y se puede estimar por la ecuación 3.61 teniendo en cuenta que K_b es la conductividad térmica del material de la placa, b es el ancho y γ es el espesor, por lo que C_b caracteriza la calidad del material de la placa, por lo que una buena selección aumentaría la eficiencia térmica del colector.

Temperatura media del aire y de la placa absorbedora

Para evaluar las propiedades del fluido se calcula el valor medio de la temperatura de la placa absorbedora.

$$T_{fm} = T_i + \frac{Q_u}{A_c F_r U_l} (1 - F'') \quad (3.62)$$

Donde F'' es el factor de flujo del colector (ec. 3.63) y T_i Temperatura inicial de entrada del aire al colector.

$$F'' = \frac{m C_{pa}}{A_c U_l F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_l F'}{M_a C_{pa}}\right) \right] \quad (3.63)$$

Por otro lado, la temperatura media de la superficie absorbedora T_{mp} será siempre mayor que la temperatura media del fluido T_{mf} . Esta diferencia de temperatura puede ser importante en calentadores de aire. Si se indica el calor útil del colector, la temperatura media de la placa será.

$$T_{mp} = T_{fi} + \frac{Q_u}{A_c F_R U_l} (1 - F_R) \quad (3.64)$$

Como se aprecia en las ecuaciones dadas 3.62 y 3.64, las expresiones de las temperaturas medias dependen del coeficiente global de pérdidas U_l que a su vez es función la temperatura media de la placa T_{mp} . Por tanto, el cálculo de éstas necesitaría de un proceso iterativo que consiste en suponer una T_{mp} , a partir de la cual se calcula un primer valor de U_l , con éste y unos valores supuestos de F_R y F'' , se calcula T_{fm} y a partir de ella, se recalculan U_l , F_R , F'' , repitiéndose el proceso hasta converger. Para el caso del colector de aire, un buen valor para comenzar el proceso es tomar como la T_{mp} la siguiente.

$$T_{mp} = T_i + 20 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.65)$$

3.3.3.1.3.- Parámetros de entrada y proceso de cálculo del modelo matemático del colector solar.

El procedimiento para calcular la eficiencia horaria y la temperatura de salida en el colector es el siguiente:

1. Se suponen unos valores iniciales de las temperaturas medias de la superficie absorbadora (T_{mp}) y del fluido (T_{fm}).
2. Se obtiene el coeficiente global de pérdidas (U_l) (ecu. 3.41)
3. Se calcula F_R , F' y F'' (ecu. 3.39, 3.58, 3.63)
4. Se halla la energía absorbida del colector, (S) (ecu 3.50) y se determina el calor útil, (Q_u), (ecu. 3.57).
5. Se recalculan las temperaturas T_{fm} y T_{mp} (ecu. 3.62 y 3.64); con el valor obtenido de (Q_u).

6. Con estas nuevas temperaturas medias se repiten los pasos 2 a 5 iterativamente hasta converger con una tolerancia pre definida de (0.1).
7. Alcanzado los valores deseados de T_{fm} y T_{mp} se puede obtener la eficiencia horaria del colector (ecu. 3.49).

Los datos iniciales necesarios son:

T_a , Temperatura ambiente (se ha considerado que la temperatura del fluido a la entrada es igual a la temperatura ambiente, esto es, ($T_{fi}=T_{amb}$)).

T_{mpo} , Temperatura media de la placa inicial (como se indicó en la ecu. 3.64) se ha tomado 20 °C superior a la temperatura ambiente).

T_{mf0} , Temperatura media del fluido inicial (comprendida entre T_{amb} y T_{mpo} , se ha considerado 10 °C sobre la temperatura ambiente).

I_t , radiación solar incidente, v , velocidad del viento y v_c velocidad del aire dentro del colector.

Y parámetros constantes durante todo el proceso tales como: A_c superficie del colector; A_f sección transversal del colector; D_h diámetro hidráulico (en superficies paralelas se considera dos veces la distancia entre placas); β ángulo de inclinación del colector con la horizontal (18°) (en las ecuaciones se utiliza su valor en radianes), N número de cubiertas de vidrio: K_{aisl} y δ_{aisl} conductividad térmica y espesor del aislante, σ constante de Steffan-Boltzmann, ε_1 y ε_2 emisividades de la cubierta y la placa, τ transmisividad de la cubierta de vidrio, α absortividad de la placa, y constantes relativas al aire (densidad, viscosidad dinámica y conductividad térmica a la temperatura media).

Tabla 3.3 Valores considerados constantes en el modelo del colector.

$A_c = 2 \text{ m}^2$	$\varepsilon_1 = 0.91$	$K_{aisl} = 0.04 \frac{\text{W}}{\text{m C}}$	$\mu = 1.9 \times 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{m s}}$
$A_f = 0.1 \text{ m}^2$	$\varepsilon_2 = 0.83$	$C_{pa} = 1005.23 \frac{\text{J}}{\text{Kg C}}$	$N = 1$
$D_h = 0.314 \text{ m}^2$	$\tau = 0.97$	$\rho_a = 1.2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$	$\sigma = 5.667 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$
$\beta = 18 \text{ grados}$	$\alpha = 0.98$	$\delta_{aisl} = 0.1 \text{ m}$	

Calculo de los Coeficientes de transferencia de calor

Para poder hallar los diferentes términos de las ecuaciones de balance que conforman el modelo matemático se deben determinar los coeficientes de transferencia de calor tales como.

Radiación.

Coefficiente de transferencia de calor por radiación entre placa absorbidora y cubierta:

$$h_r = \left[\frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1 \right)} \right] \sigma (T_p^2 + T_c^2) (T_p + T_c) \quad (3.66)$$

Donde ε_c es la Emitancia de la cubierta, ε_p la emitancia de la placa y σ es la constante de Stefan- Boltzmann.

Convección.

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa absorbidora y el ambiente U_t cuyo cálculo ya lo describimos.
- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre placa absorbidora y el aire.

$$h_2 = k N_u / L \quad (3.67)$$

Donde k es la conductividad térmica del aire entre la placa negra y la cubierta; N_u es el número adimensional de Nusselt (convección libre en volumen limitado, régimen laminar); L es el espacio entre la placa y la cubierta.

$$N_u = 1 + 1.44 \left[1 - 1708 \frac{(\text{sen } 1.8\beta)^{1.6}}{(R_a \cos\beta)} \right] \left[1 - \frac{1708}{(R_a \cos\beta)} \right] + \left[\left(\frac{R_a \cos\beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (3.68)$$

Donde β es el ángulo de inclinación del colector.

$$R_a = \frac{\beta g \Delta t L^3}{\mu \alpha} \quad (3.69)$$

Donde μ es la viscosidad absoluta del aire; α es la difusividad térmica del aire y R_a número adimensional de Rayleigh que caracteriza la convección libre.

Conducción.

- Coeficiente de transferencia de calor por conducción a través de las paredes:

$$U_b = K_{aisl} / \delta_{aisl} \quad (3.70)$$

K_{aisl} y δ_{aisl} Coeficiente de conductividad térmica y espesor del material aislante

- Coeficiente de transferencia de calor por conducción a través de la placa negra superior hacia el túnel:

$$U_p = K_p / \delta_p \quad (3.71)$$

K_p y δ_p Conductividad térmica y espesor de la placa absorbadora.

- Coeficiente de transferencia de calor por conducción entre la placa y el aire interior: Aquí se considera conducción por el escaso espacio entre la placa y la cubierta en un recinto cerrado donde el aire casi permanece inamovible.

$$h_1 = K_{aire1} / L \quad (3.72)$$

K_{aire} es el coeficiente de conductividad térmica del aire, L distancia entre la placa y el vidrio.

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre aire en el interior del túnel y la placa absorbadora:

$$h_3 = k N_u / L \quad (3.73)$$

N_u Numero de Nusselt para régimen turbulento

$$N_u = 0.0255 R_e^{0.8} \quad (3.74)$$

R_e Numero adimensional de Reynolds

$$R_e = \frac{V L_0}{\nu} \quad (3.75)$$

Donde V es la velocidad del fluido (m/s); L_0 es la longitud característica, correspondiente al diámetro equivalente del túnel (m) y ν es la viscosidad cinemática del aire (m²/s).

3.3.3.2.- Modelo matemático de la cámara de secado.

La cámara de secado es el elemento de una instalación de secado solar que recibe el aire precalentado del colector y en la que se produce propiamente el secado de los productos. En general, el establecimiento de los balances de masa y energía, junto con un modelo empírico que represente la cinética del proceso, va a permitir la simulación de la operación y mejora de las diferentes configuraciones de dispositivos de secado térmico.

A lo largo de los años, distintos modelos de simulación han sido desarrollados para el secado de los más diversos productos (Diamante L. M. y Munro P. A. 1991, Jain 2005; Bahansawy A. y Shenana M. 2004, Bala y Woods 1994, Salon y

Felippe 1997, Ratti y Mujumdar 1997, Sogari y Saravia 2003, Bennamoun y Belhamri 2003, Hachemi y Asnoun 1998, Torres et al. 2002, Farkas Seresm y Meszaros 1999, Busso et al 2001) y básicamente todos ellos se apoyan en las ecuaciones de la transmisión de calor y en la cinética del material a secar. Uno de los métodos que mejor se adaptan a las diferentes configuraciones es el método paso a paso de Bayona C.A. (2011) aunque existen modelos más elaborados y complejos de cámaras de secado (Pangavhane y Sarsavadia 2002; Chirarattananon et al.1988, Condori y Saravia 2003).

La cámara de secado dispone de cuatro paredes aisladas térmicamente, en su interior tiene una estructura de soporte de las bandejas más 8 bandejas usadas depositar el producto, en medio de las dos hileras de bandejas existe un tanque de acumulación térmica con capacidad de 80 litros.

Para el balance se tuvo en cuenta que toda la energía que se extrae del colector se utiliza en el interior de la cámara inicialmente para calentar los elementos mecánicos que hay presentes en ella, precalentar el producto a secar y para calentar el aire de la cámara además del agua del sistema de acumulación térmica.

El modelo implementado para la cámara se basa en los balances de masa y energía (figura 3.8), así como en la cinética de secado del producto; se muestra el modelo matemático para la cámara de secado objeto de estudio y se establecen los parámetros de entrada de dicho modelo. A partir de la resolución de estas ecuaciones, es posible obtener, en cada instante, las temperaturas de producto y la temperatura del aire a la salida.

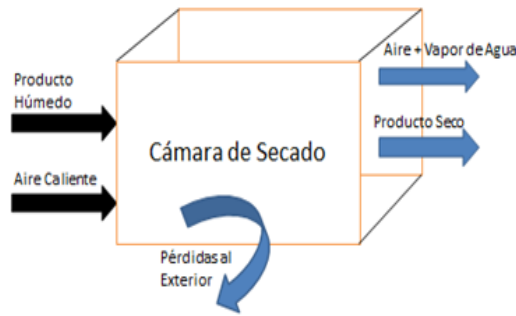


Figura 3.8 Esquema del balance de la cámara de secado.

Ecuaciones de balance de la cámara de secado

1. El flujo de aire desde el colector hacia la cámara produce un intercambio térmico entre el agente desecante con el producto húmedo, con las paredes de la cámara, el tanque de acumulación entre otros elementos mecánicos presentes.

$$m_a C_{pa} \left(\frac{dT_a}{dt} \right) = h_{a-ph} S_{ph} (T_{ph} - T_a) + h_{a-pi} S_{pi} (T_{pi} - T_a) + h_{a-T} S_T (T_T - T_a) \quad (3.76)$$

Donde C_{pa} es el calor específico del aire ($J/Kg \text{ } ^\circ C$); dT_a/dt es la variación en el tiempo de la temperatura del aire al pasar por la cámara; h_{a-ph} es el coeficiente de transferencia de calor entre el aire seco y el producto húmedo ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); S_{ph} es la superficie de intercambio de calor entre al aire y el producto húmedo (m^2); T_a es la temperatura del aire seco ($^\circ C$); T_{ph} es la temperatura del producto húmedo ($^\circ C$); h_{a-pi} es el coeficiente de intercambio de calor convectivo entre al aire y las paredes internas de la cámara ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); S_{pi} es la superficie de las paredes internas de la cámara (m^2); T_{pi} es la temperatura interna de las paredes ($^\circ C$); h_{a-T} es el coeficiente de transferencia de calor convectivo entre al aire y el tanque de acumulación ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$); S_T es el área de las

paredes del tanque de acumulación (m²).

2. El producto húmedo recibe energía del aire, una parte es acumulada y otra se emplea en evaporar su humedad (figura 3.9).



Figura 3.9 Té Limón fresco en las bandejas de la cámara del secador.

$$m_{ph} C_{ph} \left(\frac{dT_{ph}}{dt} \right) = h_{a-ph} S_{ph} (T_a - T_{ph}) - m_{ps} L_t \left(\frac{dM}{dt} \right) \quad (3.77)$$

Donde m_{ph} es la masa del producto húmedo (kg); C_{ph} es el calor específico del producto húmedo ($J/Kg\ ^\circ C$); m_{ps} es la masa de producto seco (kg); h_{a-ph} es el coeficiente de transferencia de calor convectivo entre el aire y el producto húmedo; S_{ph} es el área de intercambio entre el aire y el producto; L_t es el calor latente de evaporación (J/Kg) ya descrito su cálculo anteriormente; $\frac{dM}{dt}$ es la variación de la humedad en el tiempo.

$$C_{ph} = 1.159 m_{seca} + 4.187 m_{agua} \quad (3.78)$$

Donde $m_{agua} = m_p M_0$

$$m_{seca} = m_p (1 - M_0) \quad M_0 \text{ es la humedad inicial del producto.}$$

3. El aire seco también intercambia calor a través de las paredes de la cámara con el ambiente. Las paredes de la cámara están compuestas por dos láminas de metal y entre ellas el aislante es poliuretano inyectado (multimuro) (figura 3.11).

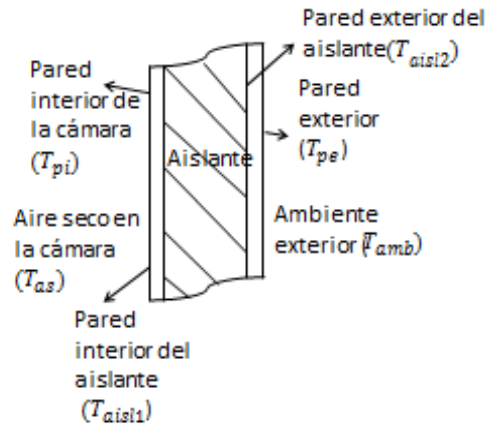


Figura 3.10 Esquema de la pared compuesta de la cámara de secado.

Existen varias formas de transferencia de calor en la cámara de secado.

- 1.- Convección entre el aire seco y la pared interior de la cámara.
- 2.- Conducción desde la pared interior de la cámara pasando por el aislante y de este a la pared exterior de la cámara.
- 3.- Convección entre la pared exterior de la cámara y el ambiente.

La ecuación que describe estos tres procesos es la siguiente:

$$m_a C_{pa} \left(\frac{dT_a}{dt} \right) = 4 \left[h_{a-pi} S_{pi} (T_a - T_{pi}) + \frac{K_{pi}}{\delta_{pi}} S_{pi} (T_{pi} - T_{aisl1}) + \frac{K_{aisl}}{\delta_{aisl}} S_{aisl} (T_{aisl1} - T_{aisl2}) + K_{ails} S_{aisl} (T_{aisl2} - T_{pe}) + h_{pe-amb} S_{pe} (T_{pe} - T_{amb}) \right] \quad (3.79)$$

Donde h_{a-pi} coeficiente convectivo entre el aire seco y las paredes internas de la

cámara (W/m^2K); T_{pi} temperatura de la pared interior de la cámara de secado ($^{\circ}C$); K_{pi} conductividad térmica del material de las paredes de la cámara ($W/m K$); S_{pi} área de la pared interna de la cámara de secado (m^2); T_{aisl1} temperatura de la pared anterior del aislante (K); K_{aisl} es el coeficiente de conductividad térmica del aislante ($W/m K$); S_{aisl} área del aislante (m^2); T_{aisl2} temperatura de la pared exterior del aislante (K); T_{pe} temperatura de la parte exterior de la pared de la cámara de secado (K); K_{pe} es el coeficiente de conductividad térmica de la pared exterior de la cámara de secado ($W/m K$); S_{pe} área de la superficie exterior de la cámara de secado (m^2); T_{amb} temperatura ambiente (K).

3.3.3.2.1.- Proceso de modelado matemático de la cámara de secado

Las consideraciones previas para el modelado son: el agua extraída del producto se incorpora en forma de vapor saturado a la corriente de aire; los intercambios de radiación entre las paredes de la cámara y el producto se consideran despreciables; el agua del producto se supone que está en estado líquido y distribuida uniformemente en él; la temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado se estima que coincide con la temperatura a la salida del colector ($T_a = T_{f2}$) y que las temperaturas de las diferentes partes y equipos dentro de la cámara son las mismas, ósea están en equilibrio termodinámico.

3.3.3.2.2.- Parámetros de entrada y proceso de cálculo del modelo de la cámara de secado.

Para el modelo de la cámara se usa una implementación en Visual Basic con una resolución de las ecuaciones diferenciales mediante el método numérico iterativo de orden cuatro de Runge-Kutta, para cada intervalo de tiempo. Las ecuaciones que están acopladas y que resuelve el método numérico de Runge Kutta son las 3.76, 3.77, 3.79.

Este programa realiza un proceso iterativo hasta converger. Mediante dicha simulación se podrán obtener las variaciones de la temperatura del producto (T_p) en las bandejas, así como del aire a la salida de la cámara (T_{as}).

Tabla 3.4 Valores que se consideran constantes en el modelo de la cámara

$C_{pa} = 1007 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$	$m_{ph} = 16 \text{ kg}$	$S_T = 2 \text{ m}^2$	$S_{pe} = S_{pi} = 6 \text{ m}^2$
$S_{ph} = 8 \text{ m}^2$	$K_{pi} = 68 \frac{w}{kg \text{ m}}$	$C_{ph} = 420 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$	$S_{mec} = 3.25 \text{ m}^2$
$S_{pi} = 6 \text{ m}^2$	$K_{aist} = 0,030 \frac{w}{kg \text{ m}}$	$Lt = 1390.14 \text{ kj/kg}$	$S_{aist} = 6 \text{ m}^2$
$K_{pe} = K_{pi} = 68 \frac{w}{kg \text{ m}}$			

Cálculos de los coeficientes de transferencia de calor.

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el aire seco y el producto húmedo.

$$h_{a-ph} = \frac{k N_u}{L} \quad (3.80)$$

Donde k es el coeficiente de transferencia de calor del aire a la temperatura (T_a) en ($W/Kg \text{ m}$); N_u es el número adimensional de Nusselt; y L es la longitud característica que en este caso será el perímetro de la sección trasversal de las

bandejas (m).

Para un fluido turbulento el número de Nusselt es:

$$N_u = 0.037 R_{ef}^{0.8} P_{rf}^{0.43} \left(\frac{P_{rf}}{P_{rw}} \right)^{0.25} \quad (3.81)$$

$$R_{ef} = \frac{vL}{\nu} \quad \text{Numero de Reynolds, ya descrito anteriormente}$$

P_{rf} y P_{rw} son los números de Prandtl a la temperatura del fluido y a la temperatura de la superficie (pared), estos valores están tabulados.

- Coeficiente de transferencia de calor por convección (h_{a-pi}); (h_{a-T}) se calculan por el procedimiento descrito anteriormente
- Coeficiente de transferencia de calor entre la pared exterior de la cámara y el aire ambiente (h_{pe-amb}) también se calcula por un proceso similar la diferencia es que aquí predomina la transferencia de calor por convección libre o natural entre la pared exterior de la cámara y el ambiente a régimen laminar. Por tanto el número de Nusselt tendrá la expresión:

$$Nu = 0.76 (G_{rf} P_{rf})^{0.25} \left(\frac{P_{rf}}{P_{rw}} \right)^{0.25} \quad (3.82)$$

$$G_{rf} = \frac{g \beta \theta_w l^3}{\nu^2} \quad \text{Numero adimensional de Grashof} \quad (3.83)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad (m/s^2); β es el coeficiente de expansión volumétrica (K^{-1}); θ_w es la diferencia de temperatura entre el fluido y la pared $\theta_w = T_{pe} - T_{amb}$ (K); l es la longitud característica en este caso será la longitud de la pared de la cámara (m); ν es la viscosidad del fluido (m/s). Los números de Prandtl ya fueron descritos anteriormente.

3.3.4 Validación del modelo matemático y propuesta de un secador a escala semindustrial.

La validación de un modelo matemático se realiza mediante la comparación y análisis de los resultados experimentales obtenidos en las evaluaciones del prototipo de secador solar y los valores obtenidos por medio de la simulación matemática anteriormente descritos, bajo las mismas consideraciones y condiciones.

Para la parte experimental como ya vimos se diseñó, construyó, y evaluó un secador solar indirecto con sistema de circulación forzada del aire, un sistema de control de parámetros y otro de acumulación térmica. Los valores experimentales se obtuvieron gracias a un diseño experimental descrito en el acápite 3.3.2.

Compararemos variables como:

- Temperatura media del aire dentro de la cámara de secado
- Temperatura media de la placa absorbidora
- Temperatura de salida del aire de la cámara de secado
- Temperatura del producto
- Variación de humedad del producto en el tiempo

Finalmente se propone una instalación semindustrial para el deshidratado del Té Limón que dé respuesta a las necesidades de los productores de Cintalapa; que resuelva los problemas de calidad en el deshidratado que se han presentado en este producto exportable y que además acorte el tiempo de secado y así aumentar la productividad, con la consecuente ventaja económica para los productores y sus

familias, así como con las prerrogativas de ser una instalación de bajo costo, poco gasto de mantenimiento, duradera y amigable con el medio ambiente.

3.4 Conclusiones

En este capítulo se describe el área de estudio. Luego se explica exhaustivamente el diseño investigativo, donde se expone la metodología de cómo vamos a resolver todas las tareas que conforman los objetivos específicos.

Se expone la metodología de diseño y construcción del prototipo de secador solar comenzando por la selección del tipo de secador a usar según las características del producto a secar. También se muestra como se calcula la demanda energética para la deshidratación del Té Limón, los elementos a tener en cuenta y la forma de cálculo del sistema de acumulación térmica y de control automático de parámetros. Uno de los aspectos más importantes de este capítulo es la descripción de la metodología del diseño y dimensionado de la cámara de secado y del colector solar.

Se explica cómo se lleva a cabo la evaluación del prototipo de secador tanto en vacío como con carga y como se evalúa la calidad del producto seco a través de análisis bromatológico de sus propiedades físicas y químicas.

Como aspecto novedoso de esta investigación se explica en este capítulo como se llevará a cabo el modelado matemático del proceso de secado en el prototipo propuesto, dividido en dos partes el modelo del colector solar y el modelo de la cámara de secado teniendo en cuenta las variables que intervienen en cada caso. Finalmente se anuncia la propuesta de un secador de tamaño tal que satisfaga la demanda de deshidratado del Té Limón que se produce en el municipio de Cintalapa.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 Introducción.

Una vez definida toda la metodología a usar en esta investigación queda expresar los resultados de cada una de las tareas que se propusieron. Estos se discuten comenzando con los resultados de la teoría de secado, los mecanismos de transferencia de masa, la energía de activación y difusividad térmica.

En orden cronológico se presentan los resultados de cada una de las tareas que conforman a su vez los objetivos específicos comenzando con los resultados del diseño y construcción del prototipo de secado, definiéndose las dimensiones del prototipo y los materiales para su construcción. También se exponen los resultados de las evaluaciones del prototipo, donde se determinan el comportamiento termodinámico del secador y la cinética de secado del Té Limón; así como la evaluación de la calidad del producto seco.

Por último se expone el modelo matemático de la instalación de secado y su validación basada en la comparación con las mediciones reales con el resultado del modelo, análisis hecho desde el punto de vista gráfico. Para terminar el capítulo se hace la propuesta de una instalación de secado de Té Limón que dé respuesta solución al problema planteado en esta investigación.

4.2 Mecanismo de deshidratación del Té Limón.

El Té Limón como el objeto de estudio es una planta herbácea, mide de 60 a 120 cm de altura, sus hojas son largas como listones. Las flores están agrupadas en espigas y se doblan como las hojas. El principal componente del aceite esencial

es el Citral (75-85 %), una mezcla de dos isómeros: neral (cis-citral) y geranial (trans-citral).

Los mecanismos de transferencia de calor y masa así como la migración de la humedad asociada en los procesos de secado fueron abordados en el acápite 2.2.6 y a continuación se exponen los principales resultados de estos.

Para el secado de las hojas del Té Limón, se calcularon los valores de los coeficientes de difusividad efectiva (D_{ef}), estos variaron entre 2,01 a $4,91 \times 10^{-11}$ m²/s para temperaturas entre 25 y 45 °C. Estos valores están dentro de los valores que Martinazzo (2006) encontró (desde 1,00 a $6,03 \times 10^{-11}$ m²/s) al secar diferentes tamaños de hojas de hierba-limón (2, 5, 20, 30 cm) a diferentes temperaturas (40, 50 y 60 °C). Para la hoja de 2 cm y temperatura del aire de secado a 50°C, encontró un valor de la difusividad efectiva de $3,20 \times 10^{-11}$ m²/s estando este valor muy próximo al encontrado en este trabajo ($3,24 \times 10^{-11}$ m²/s) para esta misma longitud y temperatura de secado. Barbosa et al. (2007) observaron que los valores de la difusividad efectiva calculados para las hojas de Erva-cidreira (*Lippia alba*) variaban entre $2,91 \times 10^{-12}$ y $11,71 \times 10^{-12}$ m²/s para temperatura de entre 40 a 80°C. Valores superiores fueron encontrados por Akpınar (2006), donde fue observada una amplitud de valores de $4,53 \times 10^{-12}$ y $7,04 \times 10^{-12}$ m²/s para diferentes especies de menta. La difusividad efectiva depende de las características del aire de secado y de las demás propiedades físico-químicas de la especie estudiada (Rizvi, 1986) siendo esta la explicación para la diversidad de resultados encontrados en otros trabajos.

La energía de activación se expresa por medio del modelo de Arrhenius, que relaciona la difusividad con la temperatura. El valor de la energía de activación para la difusión de agua en el secado de Té Limón fue de 16.78 kJ/mol.

4.3 Diseño y construcción del prototipo del secador solar.

4.3.1 Determinación del recurso energético.

Este aspecto fue abordado por dos vías; la teórica basada en los cálculos propuestos por el modelo matemático de Hottel y por mediciones reales hechas por una estación meteorológica.

Como es conocido la radiación total que llega a la superficie de la tierra es la suma de dos componentes la que llega de forma directa y las que incide después de haber sido reflejada, desviada y refractada por los diferentes componentes atmosféricos llamada difusa, en este estudio se despreció por su bajo valor la radiación de Albedo. El modelo Hottel fue descrito en el acápite 3.3.1.1. Para obtener la radiación diaria promedio en Cintalapa se toman los datos que arrojó la estación meteorológica ubicada en La Providencia en dicho municipio.

En la figura 4.1 se aprecia la variación de la radiación solar durante un día de experimentación. La mayor radiación se alcanza entre las 11.00 horas y las 16.00 horas manteniéndose en este horario por encima de los 600 W/m²; ese día (21 de noviembre) el promedio fue de 520 W / m², considerado un nivel alto de radiación en el día solar. Se elaboró un programa en Excel expuesto en el Anexo # 1 que simula la radiación por el modelo Hottel.

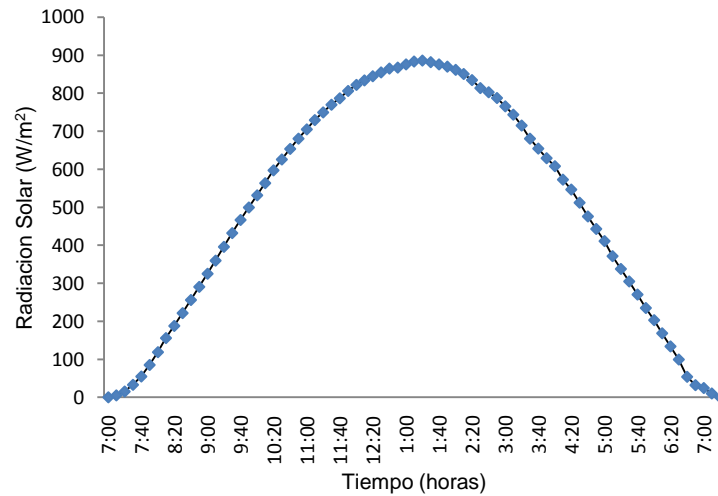


Figura 4.1 Radiación solar el 21 de noviembre en el municipio de Cintalapa.

4.3.2 Demanda energética.

Para eliminar el agua necesaria a un producto y llevarlo desde la humedad inicial hasta la de equilibrio se necesita una cantidad de energía determinada según la ecuación 3.16. La cantidad de agua a evaporar para llevar 1 Kg de producto desde la humedad inicial del 73 % hasta la humedad de equilibrio del 12 % según la ecuación 3.16, es de 0.68 Kg de agua por cada kilogramo de producto húmedo.

Entonces es necesario conocer el volumen de aire necesario para que evapore y arrastre dicha humedad. Según la ecuación 3.23 el flujo de aire necesario es $V_a = 6.9 \text{ Kg de aire}$. La demanda energética final que se necesita es de $Q_a = 0.507 \text{ Kw}$ por kilogramo de agua a evaporar según la ecuación 3.20.

Con la energía necesaria para la evaporación de la humedad del producto y la cantidad de energía solar con que se dispone en Cintalapa se puede pasar al diseño del secador solar.

4.3.3 Dimensionado de la superficie de captación y de la cámara de secado.

El diseño de secadores solares es un reto para el desarrollo de tan importante tecnología. El uso de la energía solar térmica para el secado de productos agrícolas es ampliamente difundido, la mayoría basados en una experiencia semiempírica. (Forson F.K et al. 2006, Saravia L et al. 2008).

Una revisión del diseño de secadores solares se puede encontrar en diferentes trabajos publicados pero cada metodología difiere de otra, porque el diseño está en dependencia de variables que determinan su diseño. Forson F. K. en el 2007 presentó una teoría básica para el diseño de un secador de tipo gabinete de circulación natural. Sarabia presenta un método basado en las curvas de secado del producto. Muchos secadores que se comercializan han sido diseñados basados bajo una base semiempírica de experimentación, aunque estas teorías de diseño son todas validas no es hasta que se hace un estudio experimental de dicho diseño y se conozca el desempeño termodinámico del prototipo de secador que se podrá decir que es efectiva o eficaz y que se ha cumplido con los principios básicos y características para las cuales están diseñados los secadores solares.

Los cálculos de diseño fueron descritos en el capítulo 3 en el acápite 3.3.1.3.

Según dicha metodología los resultados principales fueron:

- El aumento estimado de temperatura del aire al pasar por el colector solar según la ecuación 3.21 es como promedio 18 °C
- La masa de agua a evaporar por cada Kg de Te Limón $M_w = 0.61$ Kg, según ecuación 3.22.

- El volumen de aire necesario para la evaporación de dicha humedad es de $V_a = 5.57 \text{ m}^3$, (según ecuación 3.23).
- El área de secado de la cámara (área en bandejas) necesaria para llevar al Té Limón hasta su humedad de equilibrio resultó ser de $A = 15.12 \text{ m}^2$ (según ecuación 3.27).
- El secador tiene una eficiencia térmica del 45 % y según experimentación el tiempo de secado es de $t = 48 \text{ h}$, entonces el área de captación solar dada la ecuación 3.29 es de $A_c = 1.97 \text{ m}^2$.

4.3.3.1 Otras consideraciones de diseño del prototipo de secador solar.

Teniendo en cuenta el dimensionado y habiendo definido el tipo de secado para el desarrollo del trabajo de investigación se hacen algunas consideraciones de diseño final.

- El área de captación solar es de 2 m^2 , por tanto se diseña el colector a dos aguas con inclinación de la superficie de captación de 18° , tendrá cada lado un área de $1 \times 1 \text{ m}$. Las dimensiones de la placa absorbidora serán las mismas aproximadamente ($1 \times 1 \text{ m}$). Estas cubiertas se ajustarán con tornillos y una junta de goma para lograr la hermeticidad del colector.
- De igual forma se diseñaron las dimensiones de la cámara de secado sabiendo que el área de secado es de $A = 15.12 \text{ m}^2$, por tanto se distribuye esta área en 8 bandejas de 1 m^2 cada una, se colocaran en dos filas (4 y 4) en el medio de ellas estará el tanque de acumulación térmica, así se pueden definir las dimensiones de la cámara y además teniendo en cuenta que el colector

tendrá un área de 2 m^2 entonces la cámara será: ancho 1 m, largo 2 m y de altura 1 m, resultando un volumen de secado de 2 m^3 . En la altura de la cámara (1 m) se distribuyen las 4 bandejas con una separación entre ellas de 0.20 m.

- Para garantizar la separación del piso del secador se dispuso de una base con patas de angulares de una altura de 0.70 m. Así alejamos al secador de la humedad del piso y del acceso de roedores e insectos.

- Para permitir el acceso al interior de la cámara de secado, se diseñaron dos puertas laterales en cada lado, en forma de dos hojas cuyas dimensiones son $0.50 \times 1 \text{ m}$ cada una, en total serán 4 puertas. Por medio de pestillos ajustados se logra total hermeticidad.

- Dentro de la cámara se construyó una estructura donde se emplazaran las 8 bandejas y garantizando su separación de 20 cm entre cada una.

- Se construyó una escotilla lateral para la evacuación del aire húmedo saturado desde el interior de la cámara cuando sea necesario, con dimensiones de $0,08 \times 0.3 \text{ m}$. Esta escotilla está gobernada por el sistema de control de parámetros a través de un motor reductor.

- Para la remoción del aire dentro del secador, se escogió un ventilador con las siguientes características. El ventilador axial tiene un caudal de $1985 \text{ m}^3/\text{h}$, un motor de 1660 rpm, potencia $1/20 \text{ hp}$ y colocado en el techo de la cámara de secado justo encima del tanque de almacenamiento térmico.

- Para la impulsión del agua a través del sistema de acumulación se seleccionó una bomba fotovoltaica y así hacer de nuestro secador unos autónomos. La bomba de recirculación seleccionada tiene una presión de 68.9 KPa, con un

flujo de $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y puede trabajar vacía sin daños ya que es de 5 cámaras con accionar recíprocante y es de 12 v.

Después del diseño del prototipo de secador entonces se procede a diseñar los sistemas de control y de acumulación térmica

4.3.4 Desarrollo de un sistema de acumulación térmica.

Para poder acumular energía que después será usada en la continuación del proceso de secado, se diseñó un sistema de acumulación activo, este tendrá como sustancia acumuladora al agua ya que tiene un alto calor específico $C_p = 4,1813 \text{ K}_j/\text{Kg } ^\circ\text{C}$; se diseñó un colector de tubos de cobre, adosado a la placa absorbidora del colector, formando un colector aire-agua, el agua al pasar por este impulsada por la bomba de recirculación se calienta y entra al tanque desde donde será succionada nuevamente y así se moverá cíclicamente.

La cantidad de calor que es capaz de almacenar es $Q = M C_p (\Delta T)$. En un día solar inciden por metro cuadrado sobre territorio de Cintalapa $Q = 5 \text{ Kw}$, teniendo en cuenta que el colector solar tienen una eficiencia del 45 %; se acumulará una energía en el tanque de $Q = 2.25 \text{ Kw}$; sabiendo que $\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$; y que la diferencia promedio de temperatura entre la entrada y la salida del agua del tanque es de $5 \text{ }^\circ\text{C}$, se determina la masa (M) de agua y así el volumen de agua en el sistema de acumulación; dando como resultado $V = 0.079 \text{ m}^3$; aproximadamente 80 litros de agua. Con este dato se dimensiona el tanque acumulador en forma de pirámide de base cuadrada con las dimensiones

siguientes: Alto 0.8 m base de 0.9 x 0.4 m y será colocado entre las dos hileras de bandejas.

Finalmente esta cantidad de agua en las condiciones pre-establecidas aportaría 464 W. Con esta energía puede el sistema de acumulación extraer en horas de nula incidencia solar 1.7 Kg de agua, lo que significa secar unos 2.5 kg más de producto húmedo. El sistema de acumulación se representa en la figura 4.2.

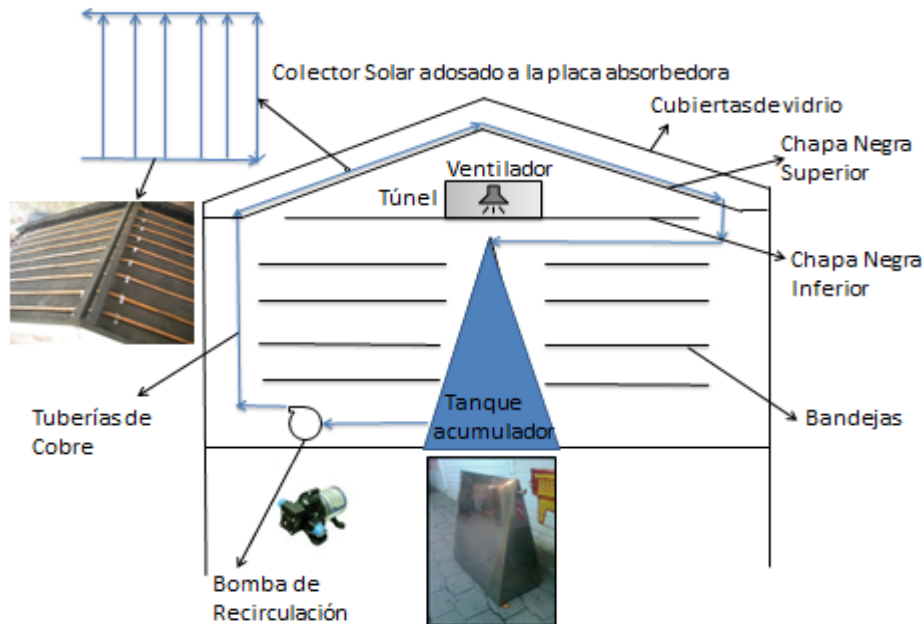


Figura 4.2 Esquema del sistema de acumulación térmica dentro del secador.

4.3.5 Desarrollo del sistema de control de parámetros.

Se diseñó un sistema de control el cual debe mantener los parámetros temperatura y humedad relativa dentro de la cámara en los niveles preestablecidos.

Como elementos fundamentales en el diseño del sistema de control tenemos el **Microcontrolador PIC18f4520 (μC)** que es de programación sencilla y es el cerebro del sistema.

El Sensor HST 11: es un sensor integrado de humedad calibrado en fábrica con salida digital, también dispone de un sensor de Temperatura integrado; rango de funcionamiento en humedad relativa de 0 - 100% y de -40°C a 125°C ; el tiempo de respuesta de humedad relativa 8 segundos.

La Pantalla de cristal líquido LCD es utilizada para mostrar un menú con la temperatura y humedad relativa leídas por el Sensor SHT11, así como los rangos de operación para la apertura y cerrado de la escotilla. Todo esto mediante una programación en lenguaje C.

El Teclado matricial 4x4 usado para poder modificar los parámetros del sistema de control

El Moto reductor este da 20 rpm esto ayuda a tener mejor precisión para la apertura y cerrado de la escotilla.

Los Switchs de final de carrera utilizados para la apertura y cerrado de la escotilla, esto envían una señal para encender y apagar el motor, mandando una señal al μC .

En la figura 4.3 se muestra el diagrama bloque del funcionamiento del sistema de control.

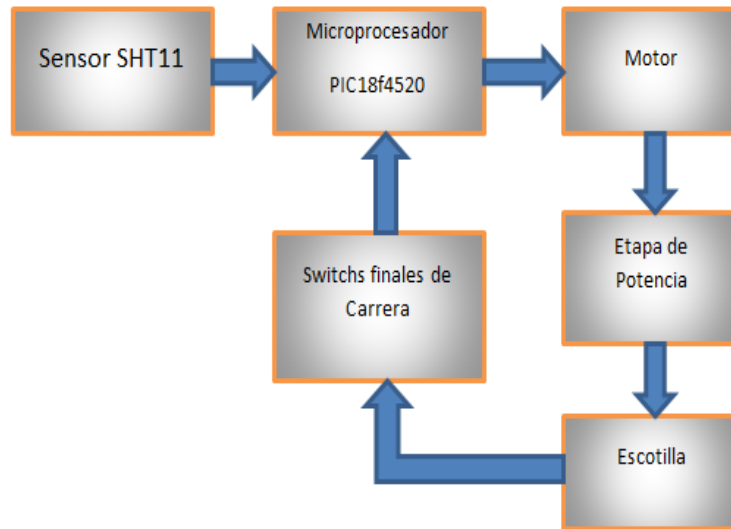


Figura 4.3 Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de control.

El diagrama está compuesto del sensor que es el encargado de proporcionar los rangos de temperatura y humedad relativa al microprocesador, dependiendo de los rangos seleccionados con el cual operará el sistema, hará abrir la escotilla de ventilación del secador solar a través de una etapa de potencia. El motor se desactivará cuando sea activado uno de los switches implementados como finales de carrera, con el cual enviaremos una señal al microprocesador, mandando a detener el motor. Esto funciona para la apertura y cerrado de la escotilla, logrando mantener los rangos de temperatura deseados para el secado y por ende de la calidad del producto final.

Diagrama general de conexiones

En la figura 4.4 se aprecia el diagrama general del PIC18f4520, con todos los componentes que conforman el sistema de control final.

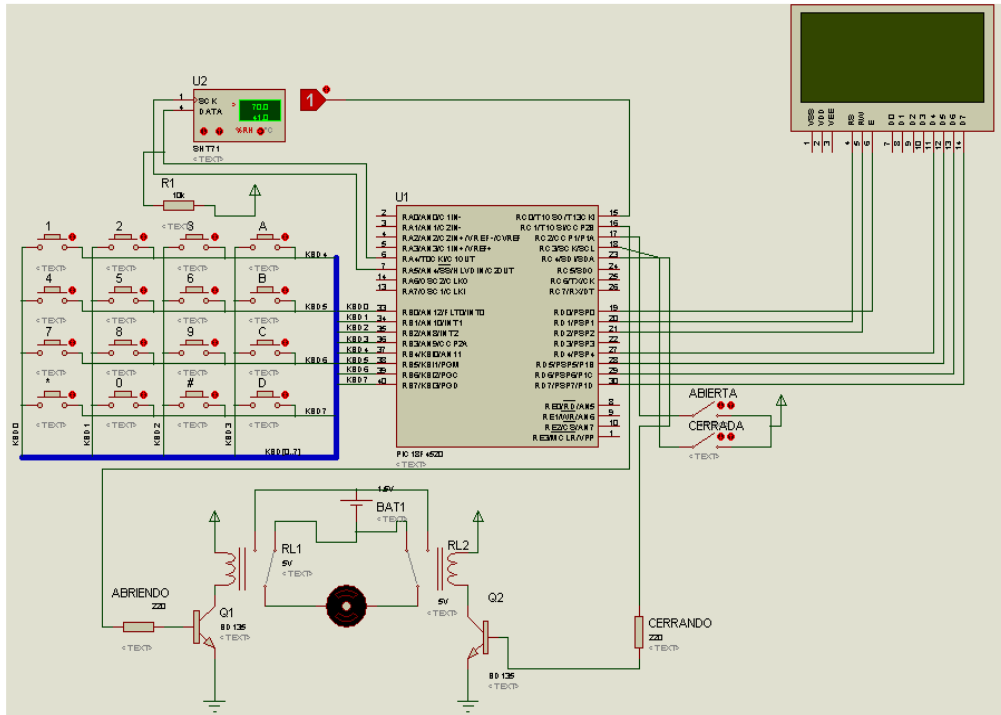


Figura 4.4 Diagrama General de conexión con el PIC18F4520.

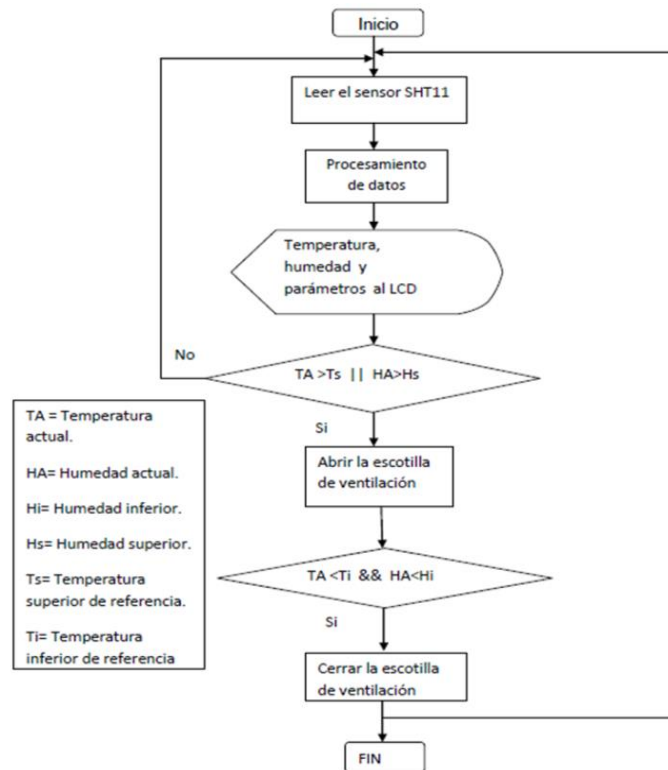


Figura 4.5 Esquema del funcionamiento del sistema de control.

4.3.6 Descripción del prototipo de secador solar.

En la figura 4.6 se muestra un esquema de la instalación de estudio, consiste en un prototipo de secador solar cuyos elementos principales son el colector solar de aire de placa plana, la cámara de secado con las bandejas para el producto a secar y los sistemas de control de parámetros y de acumulación térmica.

El funcionamiento básico del sistema consiste en la captación de radiación solar por la placa plana absorbadora externa (3), la radiación que pasa a través de la cubierta de vidrio (1) y por medio del efecto invernadero parte de esa energía en forma de calor se trasmite hacia abajo parte de la energía captada. Entre esa placa (3) y el techo de la cámara (9) de secado se crea un túnel, donde se calienta el aire disminuyendo así su humedad relativa y creciendo su avidez por la humedad del producto, este aire seco es impulsado por un ventilador (7) hacia la cámara de secado (10), este aire entra en contacto con el producto que está en las bandejas (4) adsorbiéndole su humedad superficial, este aire vuelve a recircular hacia el túnel.

El proceso de calentamiento del aire en el túnel y la circulación por la cámara de secado se repite hasta que el aire este próximo a saturarse que es renovado por aire fresco del exterior por medio de la acción del sistema de control.

El prototipo tiene un sistema de acumulación térmica que consiste en un tanque (6) de acero inoxidable en el centro de la cámara de secado, el agua contenida en dicho tanque es recirculada por una bomba (5) entre el colector solar agua –aire (3) y dicho tanque, el agua durante el día se calienta y acumula calor en el tanque

cuando sea de noche se invierte el sentido de la transferencia de calor y entonces el agua contenida en el tanque aporta la energía acumulada a la cámara de secado con el objetivo de continuar el proceso de secado en horas de baja incidencia solar. También este prototipo consta de un sistema de control de párametros dentro de la cámara de secado para regular la humedad del aire dentro de la cámara.

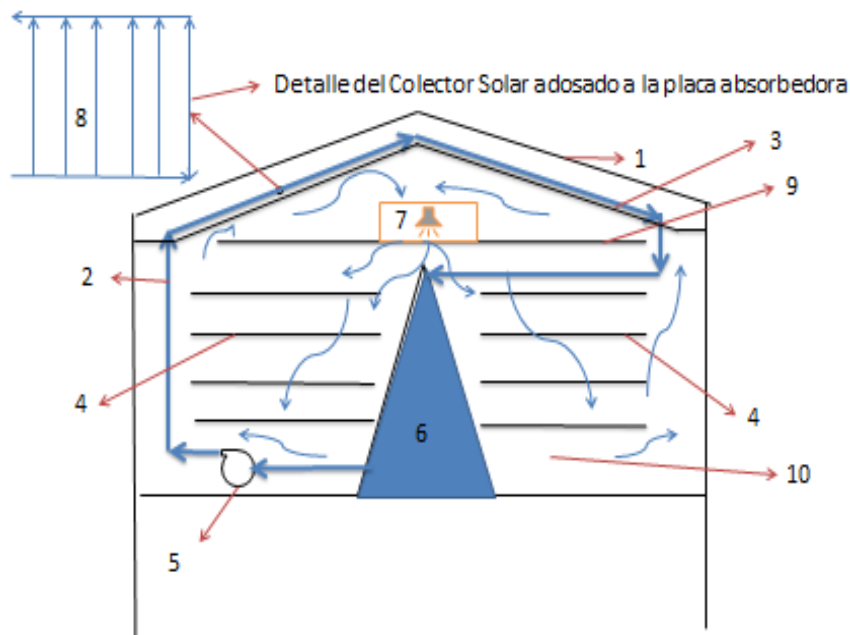


Figura 4.6 Esquema del prototipo de secador solar.

4.3.7- Construcción del prototipo de secador solar.

La construcción del secador se llevó a cabo dentro del marco del proyecto “Estación de Prueba de Sistemas Energéticos Renovables e Implementación en Comunidades de Alta Marginación en Chiapas” Proyecto CONACYT - CENER 152941 a desarrollarse en la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

(UNICACH), específicamente en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Energías Renovables(CIDTER). Una vez terminado fue expuesto en el polígono de pruebas del CIDTER, donde se realizaron las pruebas experimentales.

Para la construcción del prototipo se usaron los materiales siguientes: perfiles angulares de 75 x 75 para la estructura general, las paredes y fondo se construyeron con multimuro (MultyMuro Micro V que está compuesto por un núcleo de espuma rígida de poliuretano y dos caras de Lamina de Acero Ternium Pintro), con esto se garantiza un buen aislante, hermeticidad e higiene; el colector se fabricó con lámina de hierro negro y cristal comercial de 6 mm de espesor como cubierta.

Para pintar la placa absorbedora y el techo de la cámara se usó pintura negra mate, la estructura y demás partes se pintaron con pintura verde. Para la estructura de las bandejas y los estantes interiores de la cámara de secado se usaron perfiles de diferentes dimensiones. Las puertas son accionadas con bisagras tipo libro y cerradas con pestillos de seguridad.

El sistema de acumulación se fabricó en dos partes el colector y el tanque acumulador con la bomba de recirculación. El colector es de tubos de cobres soldados, el tanque es de acero inoxidable para garantizar su durabilidad, las conexiones entre todos los elementos también son de tubos de cobre.

En la figuras 4.7 y 4.8 se exponemos fotos de la construcción y ya terminado.



Figura 4.7 Fotos del proceso de construcción.



Figura 4.8 Fotos del secador terminado y emplazado en la UNICAH.

4.4 Resultados de la evaluación del prototipo de secador solar.

4.4.1 Evaluación en vacío.

Esta evaluación sin producto (en vacío) se llevó a cabo disponiendo termopares tipo K en diferentes partes de interés del secador tales como; cámara de secado, placa ennegrecida inferior, placa adsorbadora ennegrecida superior, temperatura del tanque acumulador. Además se registró la variación de la humedad relativa del aire dentro de la cámara. Las mediciones se realizaron cada una hora.

No debemos olvidar que al mismo tiempo la estación meteorológica registra los parámetros ambientales tales como humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad del viento y la radiación incidente, entre otras. Se hace una comparación entre un secador sin sistema de acumulación térmica y el secador propuesto para determinar la influencia del sistema de acumulación en el proceso de secado en este trabajo llegando a conclusiones interesantes

El día de la evaluación (21 de noviembre) la radiación en Cintalapa promedió 520 W/m² por tal razón se obtuvieron niveles de temperatura significativos dentro del secador solar. La mayor temperatura se registra en la placa absorbadora (superior) ayudada por el efecto invernadero que se forma entre ella y el vidrio. Las temperaturas en diferentes puntos del secador se comportaron en el tiempo como se muestra en la figura 4.9.

En esta evaluación se puede observar que a las 20:00 horas la temperatura en la placa ennegrecida inferior (techo de la cámara de secado), la temperatura del agua en el tanque acumulador y a la temperatura de la contra se igualan (30 °C), esto indica que no es necesario seguir recirculando el agua por el colector solar ya que esta no aportaría más calor a la cámara que el que actualmente acumula; entonces es el momento de apagar la bomba. También se observa que la temperatura del agua en el tanque de acumulación se iguala a la temperatura de la placa absorbadora aproximadamente a las 23:00 horas, por tanto se logra el equilibrio termodinámico en la cámara de secado, a esa hora se recomienda apagar el ventilador que recircula en aire entre el colector solar y la cámara de

secado), solo debe dejarse que el calor sea entregado por el agua en el tanque acumulador a la cámara por conveción libre.

En ambos instantes descritos anteriormente si no se opera el secador como se indica se provocan perdidas de calor acumulado por el sistema de acumulación térmica desarrollado.

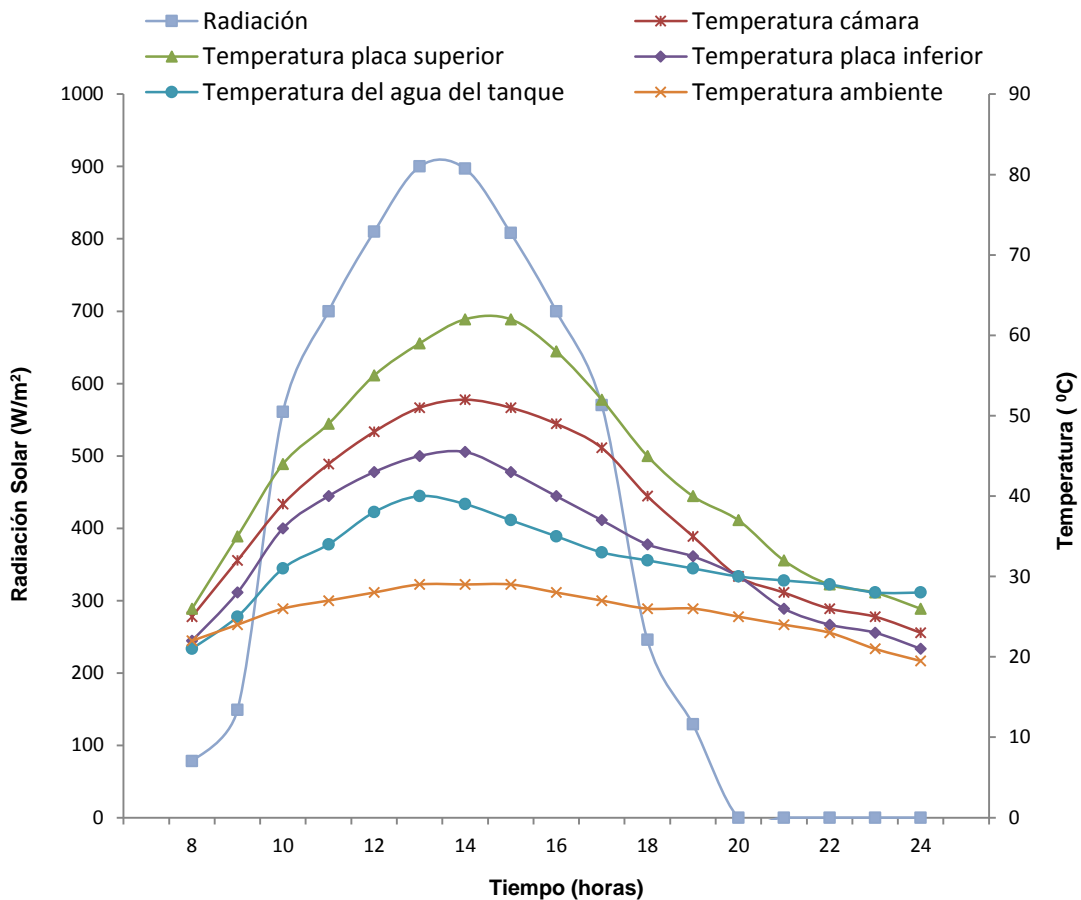


Figura 4.9 Variación de la temperaturas en la evaluación en vacío del prototipo.

Un aspecto importante es la ganancia de calor que experimenta el aire desde la temperatura ambiente (promedio 25 °C) hasta la temperatura de este dentro de la

cámara (promedio 45 °C), este incremento fue de 20 °C como promedio; esto corrobora el valor arrojado en este aspecto por el modelo (23 °C) según la ecuación 3.21. Se concluye que, las características termodinámicas del aire son idóneas para el deshidratado del Té Limón.

Humedad relativa del aire dentro de la cámara de secado.

La humedad relativa del aire dentro de la cámara de secado es un parámetro de vital importancia ya que este ofrece cuan ávido está el aire por la humedad o sea, el poder de absorción de humedad que tendrá el aire seco al entrar en contacto con el producto húmedo. Para esta prueba se usaron los datos de la estación meteorológica emplazada en la UNICAH y un hidrómetro que registró la humedad dentro de la cámara de secado.

En la figura 4.10 se muestra la variación de la humedad relativa del aire dentro de la cámara de secado cuando se va calentando y se hace una comparación con la humedad del ambiente en el día de experimentación.

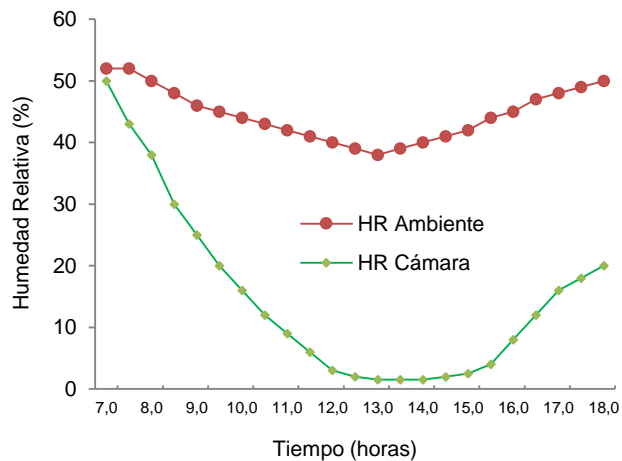


Figura 4.10 Variación de la humedad relativa del aire (evaluación en vacío).

Se aprecia en la figura 4.10 que la humedad del aire ambiente en el día de experimentación promedió un 44.56 %. En la cámara de secado la humedad relativa disminuye desde un máximo del 52 % hasta un mínimo del 1.5 % en horas del mediodía (11:00 a 16:00 horas); en dicho horario la humedad relativa del aire en la cámara promedió 5.5 %, lo importante es que se mantiene a niveles bajos por periodos prolongados, esto es una medida de cuan hermética es la cámara de secado constituyendo esto una exigencia en el diseño y construcción de un secador solar.

A medida que va variando la radiación incidente durante el día (figura 4.1), la humedad relativa del aire en la cámara va disminuyendo al mismo tiempo que se va calentando el aire al pasar por el colector solar.

4.4.1.1 Comportamiento térmico de dos prototipos de secadores con y sin sistema de acumulación térmica.

En la figura 4.11 se muestra el emplazamiento de los dos secadores. Para poder comparar y poder determinar los efectos del sistema de acumulación térmica en un secador se realizaron las evaluaciones en vacío de ambos en el mismo día y al mismo tiempo, se registraron temperaturas en los puntos de interés de los secadores.



Figura 4.11 Secadores con y sin sistema de acumulación térmica en evaluación.

En la figura 4.12 se muestra la variación de la temperaturas en el secador con sistema de acumulación termina (SCSAT) y también el comportamiento de la radiación solar, como se observa la temperatura de la cámara no sobrepasa los 60 °C y disminuye más lentamente ya que cuenta con el aporte del calor acumulado en el sistema de acumulación durante el día. Este nivel de temperatura indica que el sistema de control de parámetros no tendrá que controlar la temperatura en la cámara, solo la humedad relativa del aire en la misma.

La evaluación en vacío del SCSAT se comportó de forma similar a la evaluación anteriormente descrita bajo condiciones similares (figura 4.12).

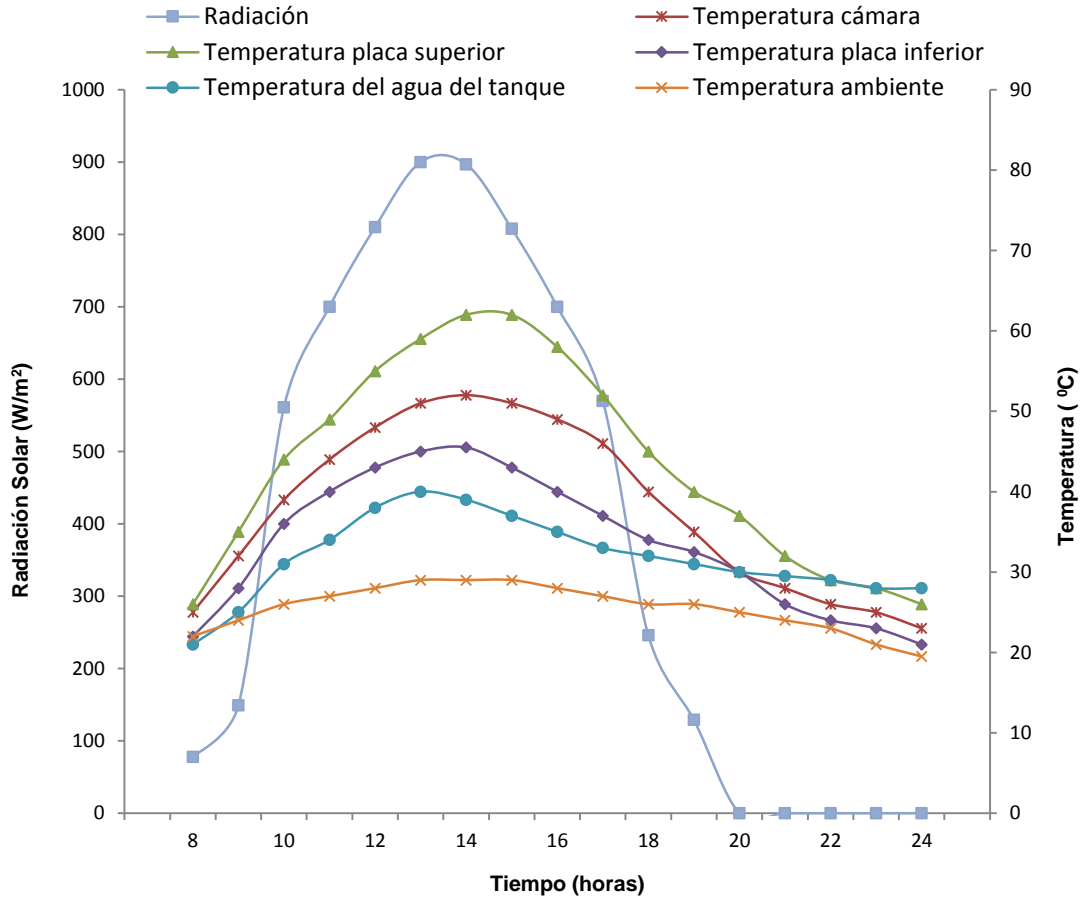


Figura 4.12 Variación de la temperatura del secador con sistema de acumulación térmica (SCSAT).

En la figura 4.13 se muestra la variación de las temperaturas de un secador igual pero sin sistema de acumulación térmica (SSSAT). Aquí la temperatura de la placa absorbidora ennegrecida y del aire en la cámara se incrementa más rápidamente y llegan a valores superiores que en el secador con sistema de acumulación térmica (SCSAT); esto se debe a que la energía solar que llega la placa absorbidora solo se usa para el calentamiento del aire que recircula enter el colector y la cámara de secado y sin embargo en el secador con sistema de acumulación térmica la energía que llega a la placa absorbidora se utiliza además

de calentar el aire que pasa por el colector también calienta el agua que circula por el calentador adosado a esta placa absorbadora y que es parte del sistema de acumulación, o sea en este se calienta al mismo tiempo aire y agua.

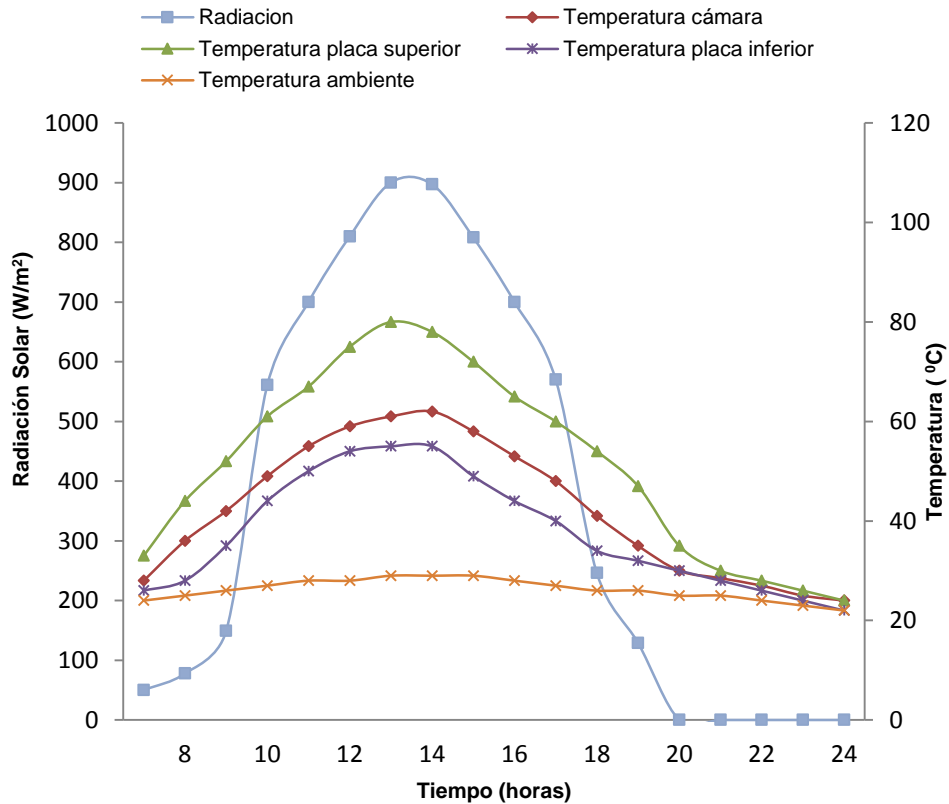


Figura 4.13 Variación de la temperaturas del secador sin sistema de acumulación térmica (SSSAT).

De esta comparación se puede concluir que en el colector del secador con acumulación térmica (SCSAT) se calientan dos fluidos (de agua y del aire), al calentar ambos fluidos esto no permite que la temperatura de la placa absorbadora provoque el calentamiento “excesivo” del aire y por tanto la

temperatura de la cámara no sobrepasa los 60 °C que es uno de los requerimientos importantes en el proceso de secado de Té Limón.

En el SSSAT se eleva más la temperatura de su placa absorbidora y por ende de la cámara de secado hasta valores de 63 °C, pero el descenso de la temperatura del aire después de las 18:00 horas es brusco y ya a las 20:00 horas el secador pierde su capacidad de secar ya que todos los elementos internos del secado tienden al equilibrio termodinámico. (25 °C)

Uno de los aspectos más importante es el comportamiento de la temperatura del aire en la cámara en los dos secadores (figura 4.14), que se analiza a continuación.

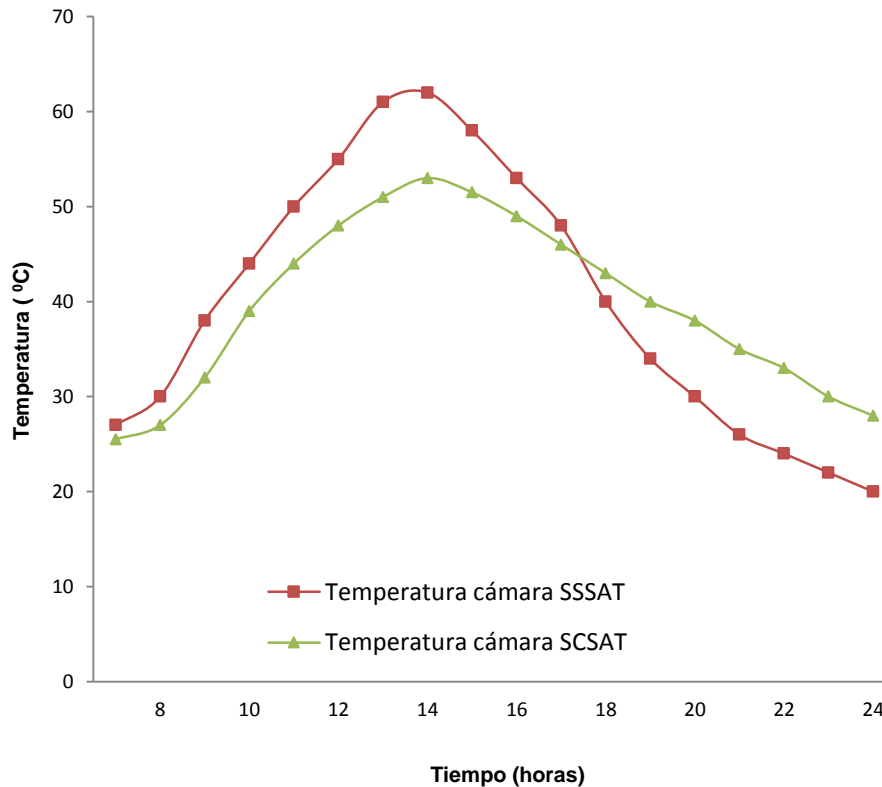


Figura 4.14 Temperaturas del aire dentro de las cámaras en ambos secadores.

En el SSSAT la temperatura aumenta más y más rápidamente que en el SCSAT, en el SCSAT la temperatura no alcanzó los 60 °C pero si mantiene temperaturas superiores al ambiente durante las primeras horas de la noche (hasta pasadas la media noche 02:00 horas), el SCSAT pierde su capacidad de seguir secando a las 2:00 horas del siguiente día mientras que el SSSAT pierde su capacidad de secar a las 20:00 horas del mismo día. Se puede concluir con esta evaluación que el SCSAT está en condiciones de seguir secando en horas nocturnas no así el SSSAT que es el objetivo por el cual se desarrolló el sistema de acumulación térmica.

4.4.2 Evaluación con carga.

En la figura 4.15 se expone la variación horaria del peso de la muestra de producto húmedo durante los dos días que duro el proceso de secado.

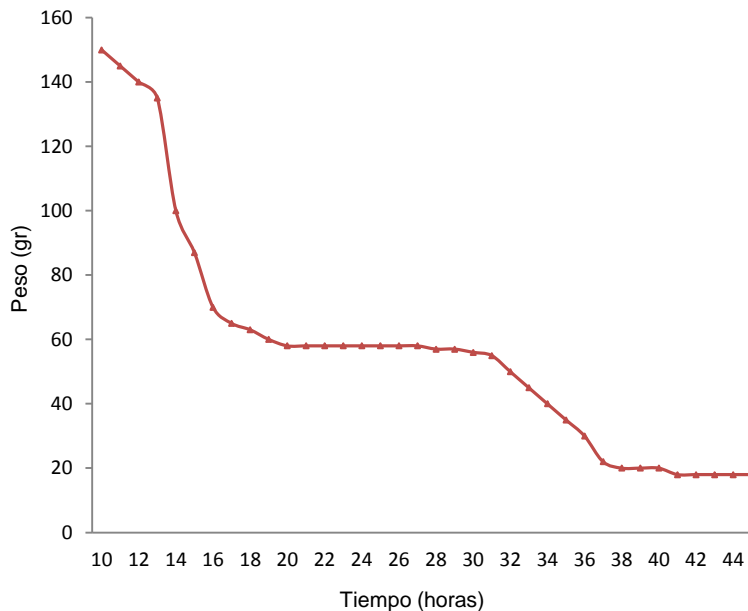


Figura 4.15 Variación del peso de la muestra del Te limón.

La muestra se tomó de hojas frescas de Té Limón cortadas a las 7:00 horas, se escogieron las sanas y se picaron a 0.20 m de longitud, se cargaron las 8 banderas de producto fresco y se seleccionó una muestra la cual se puso en una bandeja tarada, se inició con un peso fijo de 150 gr, se midió la variación de peso con una balanza electrónica cada una hora, este proceso se continuó hasta que al cabo de los dos días-sol este ya no variaba más lo que nos indica que el producto había alcanzado su humedad de equilibrio, en ese momento la muestra pasaba 20 gramos.

En la figura 4.16 se muestra la curva de secado del Té Limón donde se observa la variación de la humedad del producto durante el proceso de secado.

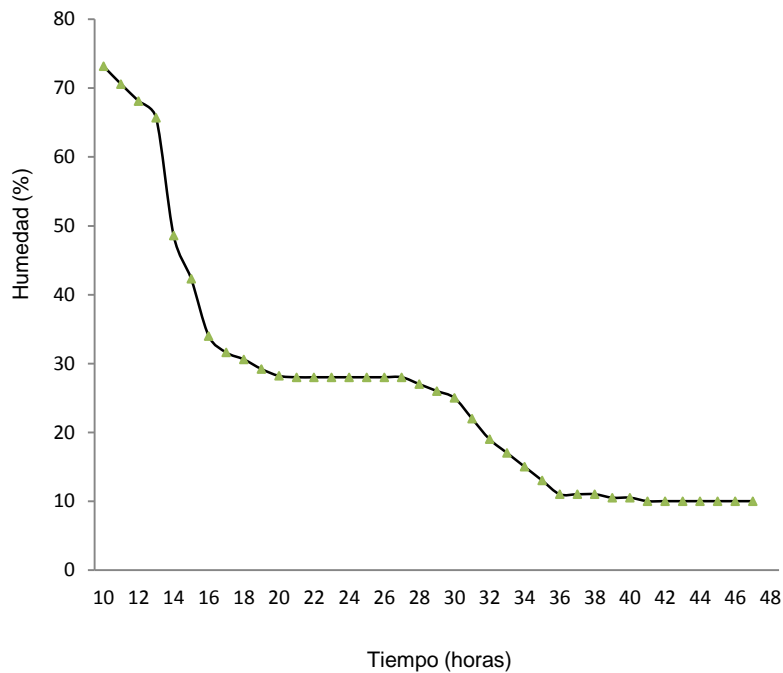


Figura 4.16 Curva de humedad del Té Limón.

En la figura 4.16 se ve como en las primeras horas el cambio de humedad del producto es muy poco, porque la energía que le aporta el aire se usa solo para calentar el producto aunque pierde algo de humedad. Luego de este proceso comienza la deshidratación del Té Limón a una mayor velocidad, que es un proceso gradual durante el transcurso del primer día solar, a una velocidad de secado de 2.5 %/h. A partir de las 21:00 horas la humedad del producto deja de descender a este ritmo y solo decae de un 35 % hasta un 28%, para mantenerse constante durante toda la noche. Hasta este momento el Té Limón ha perdido el 45 % de su humedad inicial.

En el segundo día solar continua la deshidratación del Té Limón pero como se aprecia la pendiente de la curva es menor, eso quiere decir que a medida que se va secando “quitarle” más humedad es un proceso más lento y difícil, aquí la velocidad de secado baja hasta 1.5 %/h. Este proceso prosigue hasta que se alcanza la humedad de equilibrio del te limón del 10 %, ya al final del segundo día solar (19:00 horas), se mantiene ese nivel de humedad durante un tiempo más antes de ser extraído del secador (21:00 horas) y así comprobar que está en su humedad de equilibrio.

4.4.3 Resultados del análisis de la calidad final del producto seco.

Según la información recopilada de los trabajos sobre la calidad del Té Limón deshidratado publicados por la Dra. Soto Ortiz (2001) y la información que brinda la norma NMX-F-431 del 1982, se puede establecer una comparación entre valores reportados y los determinados en el producto deshidratado por el

prototipo experimental de secador solar y secado en las instalaciones de Cintalapa. En la tabla 4.1 se muestra esta información comparativa

Tabla 4.1 Resumen comparativo de la caracterización del Té Limón seco en el prototipo experimental, en Cintalapa y los valores reportados y establecidos.

Características	Porcentajes Reportados	Producto seco en Instalación Experimental	Producto seco en Cintalapa
Humedad Inicial	72.5 %	73.2 %	73.2 %
Humedad Final(equilibrio)	12.0 %	8.0%	19.0 %
Por ciento de Ceniza	10.0 %	9.22 %	9.0 %
Por ciento de Grasa	4.4 %	3.79 %	4.0 %
Por ciento de Fibra	20.0 %	25.32 %	26.0 %
Por ciento de Proteína	6.03 %	5.54 %	6.1 %
Por ciento de hojas ennegrecida	5.0 %	3.0 %	7.0 %
Materia Orgánica e Inorgánica Extraña	1.0 %	0.0 %	1.5 %
Por ciento de Aceite Esencial	0.2 %	0.221 %	0.168 %

El porcentaje de humedad inicial del Té Limón cultivado en Cintalapa promedia el 73.2 %. Esta humedad esta entre los rangos reportados.

El Té Limón deshidratado en el prototipo logró una humedad final del 8 %, esta humedad es demasiado baja en comparación con los valores de humedades de equilibrio reportados para este producto que es del 12 %, esto quiere decir que se secó el producto a niveles por debajo de su equilibrio, no es malo pero es un gasto innecesario de energía y tiempo. El producto secado en Cintalapa presentó una humedad final muy alta (19 %) que es una de las razones de deterioro del producto seco que se ha reportado por el comercializador.

Los promedios de diferentes características del Té Limón seco tales como: el por ciento de cenizas, el porcentaje de extracto etéreo (extracción de grasa cruda en el Té Limón seco), el por ciento de fibra cruda y el porcentaje de proteína cruda se ajustan con bastante precisión a los reportados en Soto 2001 y Larrasoña 2010 y con trabajos realizados sobre plantas silvestres que son comestibles de la “Flora Tabasqueña (México)”, el Manual Agropecuario (tomo I) y por la norma NMX-F-431-1982. ALIMENTOS. TÉ DE LIMÓN.

El por ciento de hojas ennegrecidas como se observa es alto en el producto secado en Cintalapa esto se debe a la forma en que este se deshidrata, expuesto a la acción de agente climáticos y al ataque de plagas que provoca el cambio de coloración en sus hojas; en el que se deshidrato en el prototipo experimental sin embargo no tuvo ennegrecimiento de sus hojas durante el secado. Por tanto la calidad en cuanto a las características organolépticas son superiores en el Té Limón deshidratado en la instalación propuesta.

A los aceites esenciales por su importancia en esta planta le dedicaremos un análisis aparte. Los aceites esenciales son las fracciones líquidas volátiles, que contienen las sustancias responsables del aroma de las plantas y que son

importantes en la industria de perfumería, de alimentos (condimentos y saborizantes) y farmacéutica. Generalmente son mezclas complejas de hasta más de 100 componentes (compuestos alifáticos de bajo peso molecular, monoterpenos, sesquiterpenos y fenilpropanos). En su mayoría son de olor agradable y se encuentran distribuidos en unas 60 familias de plantas.

Se observa que el Citral que pertenece a los esteres ya fue cuantificado en las grasas, el Citral pertenece a la familia de los terpenoides, son esteres en su estructura, entonces se concluye que el método de extracción de aceite esencial para separar las fases de aceite y agua se realizó correcta y eficientemente ya que no se encontraron diferencia en estos valores de este indicador en el Té Limón.

El porcentaje de Citral que se encuentra en el producto seco se reporta con valores mínimos del 0.2 % y se obtuvo el 0.22 %, esto quiere decir que el deshidratado se realizó con calidad. Por otro lado el porcentaje de aceite esencial del producto secado en Cintalapa solo alcanzo el 1,68 % un valor bajo que demuestra pérdida de aceite esencial en el proceso de secado.

Por otro lado las características organolépticas del Té limón seco fueron mejores en el producto seco en la instalación propuesta que en el producto seco proveniente de Cintalapa, en cuanto a color verdoso, el olor y textura

Por todo lo anterior se puede concluir que la calidad del Té Limón deshidratado en la instalación experimental propuesta reúne las características requeridas para su comercialización y que es superior a la calidad del Té Limón seco en las instalaciones de Cintalapa y así dar solución al problema de investigación dado.

4.5 Modelo Matemático.

4.5.1 Análisis de las variables climatológicas.

Las principales variable climatológicas que se estudiaron del municipio de Cintalapa fueron: radiación solar, temperatura ambiente; humedad relativa ambiente, precipitaciones, velocidad del viento, entre otras.

Como se aprecia en la figura 4.1 la radiación en Cintalapa promedió $520 \text{ W} / \text{m}^2$ valor utilizado en los cálculos de modelación.

En la figura 4.17 se expone cómo se comportan las temperaturas ambientales promedios mensuales en este Municipio siendo la máxima de $36.67 \text{ }^\circ\text{C}$ que es una temperatura alta y por tanto muy buena para su uso en el secado solar, la temperatura mínima fue de $18 \text{ }^\circ\text{C}$ valor alto en todo el año en comparación con otras zonas del Estado de Chipas, por lo que podemos asegurar que en abundante el recurso solar térmico en esta zona. La temperatura promedio anual en Cintalapa es de $24.67 \text{ }^\circ\text{C}$.

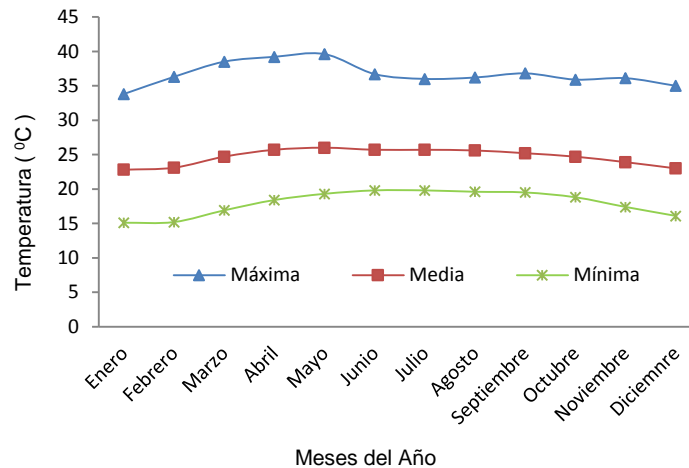


Figura 4.17 Temperaturas ambientales promedio anuales en Cintalapa.

En la figura 4.18 se expone cómo se comporta la humedad relativa ambiente promedio diaria en Cintalapa. Esta promedia al día 47.6 %. Esta humedad aunque no es alta nos dice que el aire ambiente no tiene suficiente avidez por al agua o que al menos pudiera ser mucho mejor, por eso aumentándole la temperatura al aire en el colector bajaría aún más hasta niveles donde sus propiedades desecantes del aire sean óptimas.

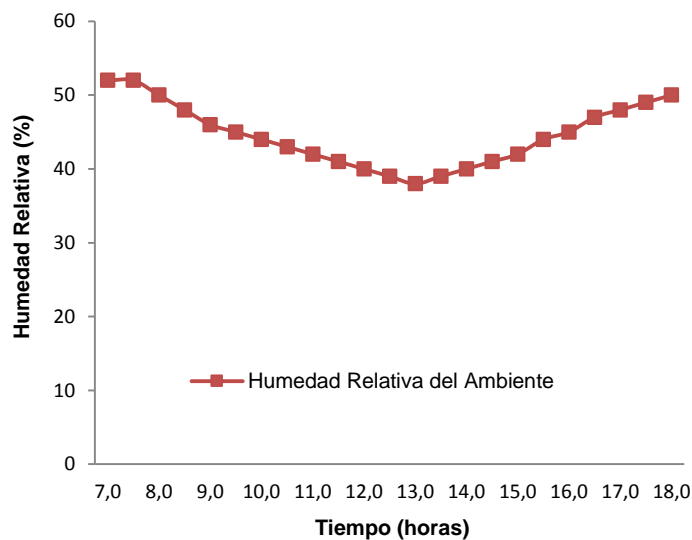


Figura 4.18 Humedad relativa promedio del ambiente diaria en Cintalapa.

En la figura 4.19 se presenta la precipitación promedio anual en el municipio de Cintalapa, en los meses donde se llevó a cabo la experimentación fueron meses que históricamente las lluvias van disminuyendo y por ende la humedad relativa del aire ambiente va descendiendo hacia finales de año rumbo al invierno como es lógico según el clima templado imperante en este municipio. No obstante la norma nos indica que las precipitaciones son aun menores a las máximas obtenidas alguna vez.

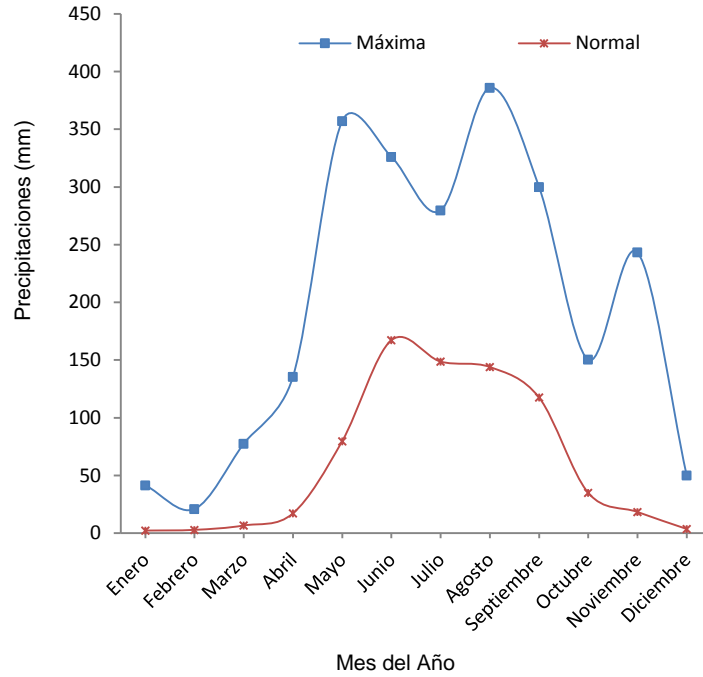


Figura 4.19 Precipitación promedio anual en Cintalapa.

Otra de las características climatológicas importante en el modelo matemático es la velocidad del viento que se muestra en la figura 4.20.

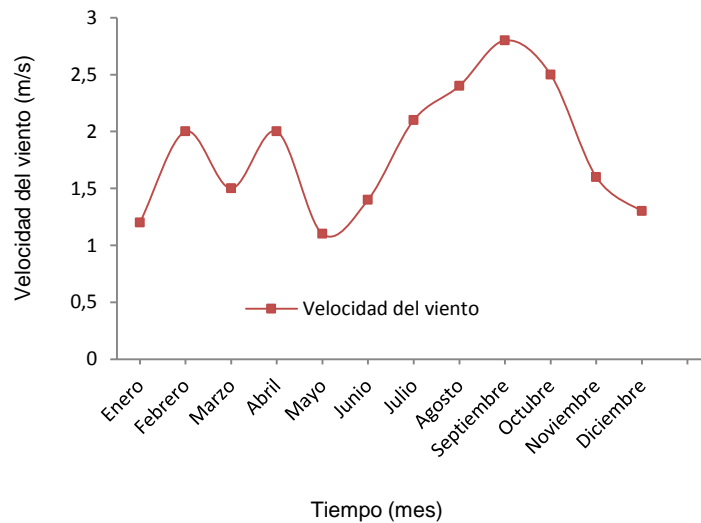


Figura 4.20 Velocidad del viento anual en Cintalapa. INEGI

El promedio anual de la velocidad del viento es de 1.8 m/s, es realmente baja, por tanto no tendrá mucha influencia en las pérdidas por transferencia de calor por cubierta de vidrio del colector.

En la figura 4.21 se pueden observar otras características climatológicas de Cintalapa; se puede concluir que los meses de mayor precipitación están entre junio y septiembre, pero que aún no son significativos al extremo que podamos afirmar que es una región lluviosa, sino todo lo contrario en los otros ocho meses restantes la precipitación es muy escasa; en cuanto a Niebla, Tormentas Eléctricas y Granizo es casi nula su ocurrencia, como se muestra.

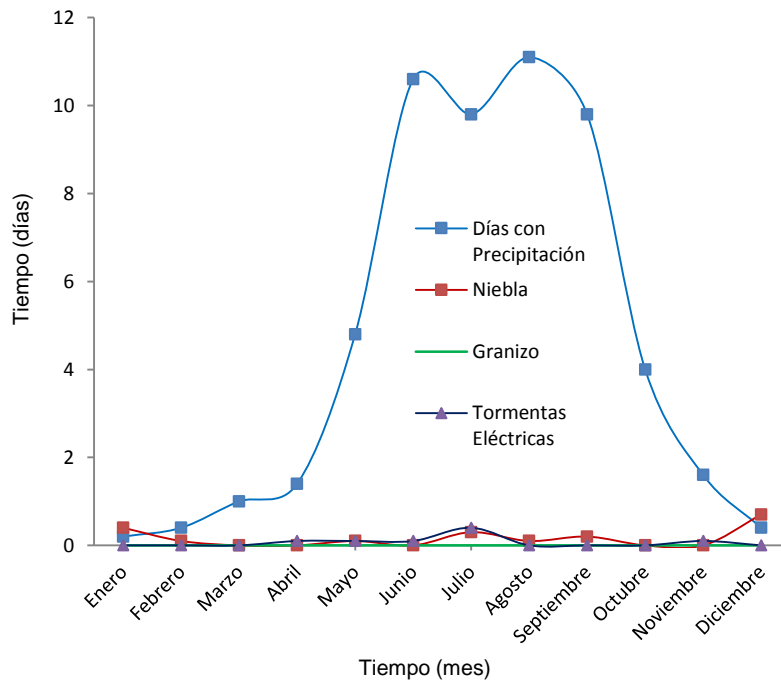


Figura 4.21 Otras características climatológicas de Cintalapa

Con esta caracterización del Clima en Cintalapa se tienen más conocimientos del terreno donde vamos a trabajar; Cintalapa tiene un clima semicálido subhúmedo, muy apropiado para la deshidratación de productos agrícolas.

4.5.2 Análisis de las variables relacionadas con los materiales del colector

Las principales características físicas de los materiales y fluidos que intervienen en el sistema de secado solar propuesto se presentan en la tabla 4.2 y 4.3 además algunas dimensiones ya calculas en su diseño.

Tabla 4.2 Características físicas de los materiales del colector solar

$A_c = 2 \text{ m}^2$	$\varepsilon_1 = 0.91$	$K_{aisl} = 0.04 \frac{W}{m C}$
$A_f = 0.1 \text{ m}^2$	$\varepsilon_2 = 0.83$	$\rho_a = 1.2 \frac{Kg}{m^3}$
$D_h = 0.314 \text{ m}^2$	$\tau = 0.97$	$\delta_{aisl} = 0.1 \text{ m}$
$\beta = 18 \text{ grados}$	$\alpha = 0.98$	$\mu = 1.9 \times 10^{-5} \frac{Kg}{m s}$
$N = 1$	$C_{pa} = 1005.23 \frac{J}{Kg C}$	$\sigma = 5.667 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

Donde A_c área del colector; ε_1 emisividad del vidrio; A_f área efectiva de entrada; ε_2 emisividad de la placa negra; D_h diámetro hidráulico del colector; τ transmisividad del vidrio; β ángulo de inclinación del colector; α absorptividad del colector, N número de cubiertas de vidrio; C_{pa} calor específico del aire; K_{aisl} conductividad térmica del aislante del colector, ρ_a densidad del aire; δ_{aisl} espesor del aislante; μ viscosidad absoluta del aire, σ constante de Stefan – Boltzman

Tabla 4.3 Características físicas de los materiales de la cámara

$C_{pa} = 1007 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$	$m_{ph} = 16 \text{ kg}$	$S_T = 2 \text{ m}^2$
$S_{ph} = 8 \text{ m}^2$	$K_{pi} = 68 \frac{w}{kg \text{ m}}$	$C_{ph} = 420 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C}$
$S_{pi} = 6 \text{ m}^2$	$K_{aisl} = 0,030 \frac{w}{kg \text{ m}}$	$Lt = 1390.14 \text{ kJ/kg}$
$S_{mec} = 3.25 \text{ m}^2$	$S_{aisl} = 6 \text{ m}^2$	$K_{pe} = K_{pi} = 68 \frac{w}{kg \text{ m}}$
		$S_{pe} = S_{pi} = 6 \text{ m}^2$

Donde m_{ph} masa del producto húmedo, S_T área del tanque acumulador; S_{ph} área que el producto húmedo tiene expuesta al aire seco, K_{pi} coeficiente de conductividad térmica de las paredes interiores, C_{ph} calor específico del producto húmedo; S_{pi} área de la paredes internas, K_{aisl} coeficiente de conductividad térmica del aislante; Lt calor latente de vaporización; S_{mec} área de las partes mecánicas que están en la cámara; S_{aisl} área del aislante; K_{pe} coeficiente de conductividad térmica de las paredes externas; S_{pe} área de las paredes externas de la cámara.

4.5.3 - Validación del modelo matemático del prototipo

Para validar los modelos teóricos se comparan los resultados obtenidos en las simulaciones con los alcanzados experimentalmente, esta comparación se hará de forma gráfica donde se observa el comportamiento de las variables experimentales y teóricas parte por parte del secador, colector, cámara de secado y las variables climáticas (Bautista et al. 1991)

4.5.3.1 Validación del Modelo del colector solar.

Aquí se modela la temperatura de la placa absorbadora y de la cámara de secado como variables más significativas en esta parte del modelo además se valida la eficiencia instantánea del secador. El modelo matemático está regido por tres ecuaciones de balance de energía aplicada al colector solar (ecuaciones 3.52; 3.53; 3.54)

En la figura 4.22 se expone la **variación de la temperatura de la placa absorbadora** del prototipo de secador solar, también se grafica la curva modelada y se hace una comparación entre ellas.

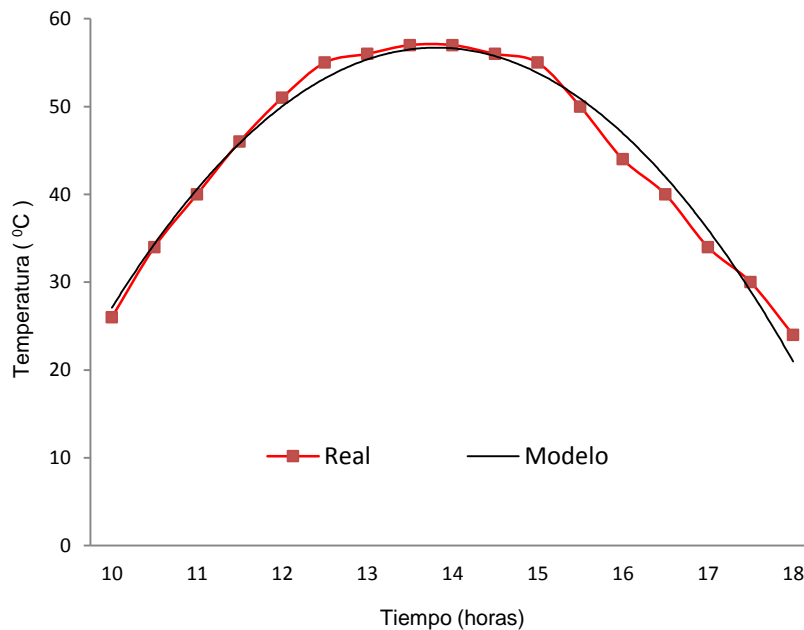


Figura 4.22 Variación de la temperatura de la placa absorbadora real y modelada. $R^2=0.983$.

Como se aprecia en la figura 4.22 la placa absorbidora mantuvo una temperatura promedio por encima de los 45 °C, durante las principales horas del día solar (11:00 a las 16:00 horas), esto quiere decir que el potencial energético solar de la zona de Cintalapa es importante y cumple con las expectativas y exigencias para lo cual será utilizado. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.983$ es alto por lo que existe un buen ajuste entre los datos experimentales y el modelo.

En la figura 4.23 se muestra la **variación de la temperatura del aire en la cámara de secado en el tiempo**.

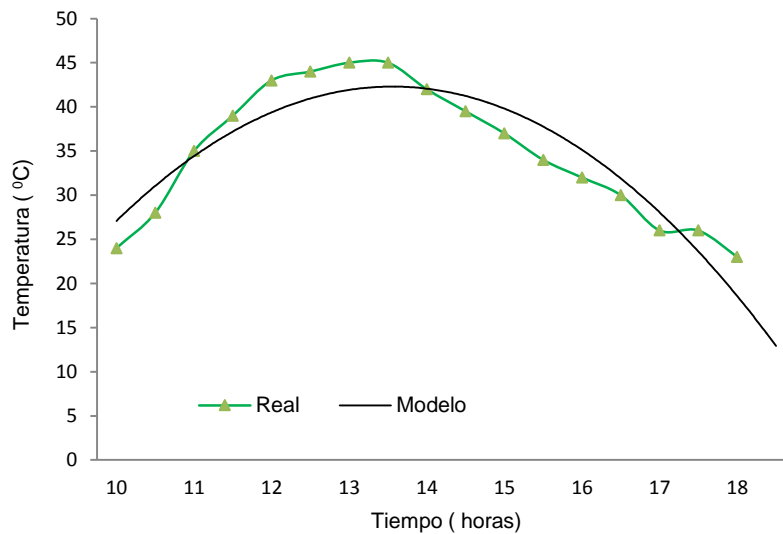


Figura 4.23 Variación de la temperatura del aire en la cámara, real y modelada $R^2=0.8631$

Se muestra en la figura 4.23 que la temperatura del aire en la cámara de secado alcanza un valor máximo de 46 °C a las 13:00 horas, a partir de ese momento desciende lentamente debido a que la cámara de secado está bien aislada y hermética además del aporte energético que hace el sistema de acumulación. El

coeficiente de determinación $R^2= 0.863$, valor alto por lo que existe un buen ajuste entre los datos experimentales y el modelo

Eficiencia instantánea

La eficiencia de un colector solar se define como el cociente de la energía térmica útil entre a la energía solar total recibida.

En la figura 4.24 se muestra la **variación de la eficiencia térmica del colector** a lo largo del tiempo.

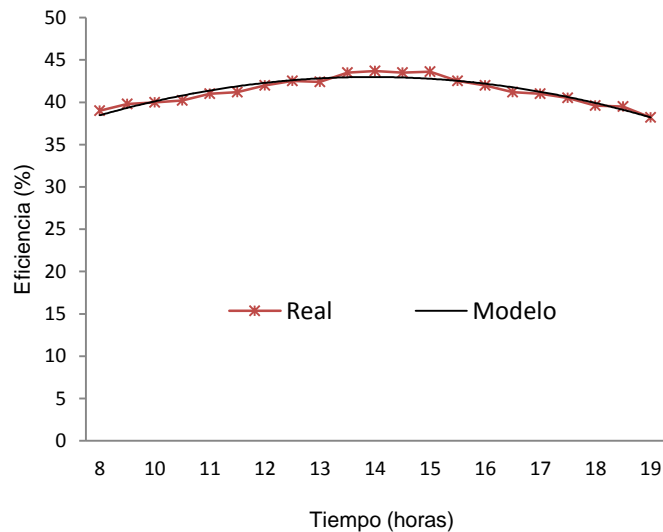


Figura 4.24 Variación de la eficiencia horaria modelada del prototipo de secador $R^2= 0.919$

El modelo arrojó la eficiencia instantánea basada en resultados de datos también modelados y se muestra la eficiencia horaria calculada con los datos reales medidos durante la evaluación experimental del secador. Como se aprecia la eficiencia del colector calculada promedió el 45 %. El coeficiente de determinación

$R^2 = 0.919$ es alto por lo que existe un buen ajuste entre los cálculos basados en mediciones reales experimentales y el modelo.

Se realizó la validación del modelo matemático que simula el comportamiento térmico del diseño de colector propuesto. Este modelo se implementó en un programa que permite su solución numérica y obtener la influencia de variaciones de parámetros de diseño en el funcionamiento del colector. Se analizó la diferencia entre los valores horarios de temperatura simulados con el modelo y los obtenidos experimentalmente llegando a la conclusión de que el modelo reproduce resultados con un alto grado de exactitud.

4.5.3.2 Validación del Modelo de la cámara de secado.

El modelo implementado para la cámara se basa en los balances de masa y energía que tienen lugar en ella, así como en la cinética de secado del Té Limón. A partir de la resolución de estas ecuaciones, es posible obtener, en cada instante, las temperaturas del producto y la temperatura del aire a la salida de la cámara.

En la figura 4.25 se muestra la **variación de la temperatura del Té Limón** en el tiempo.

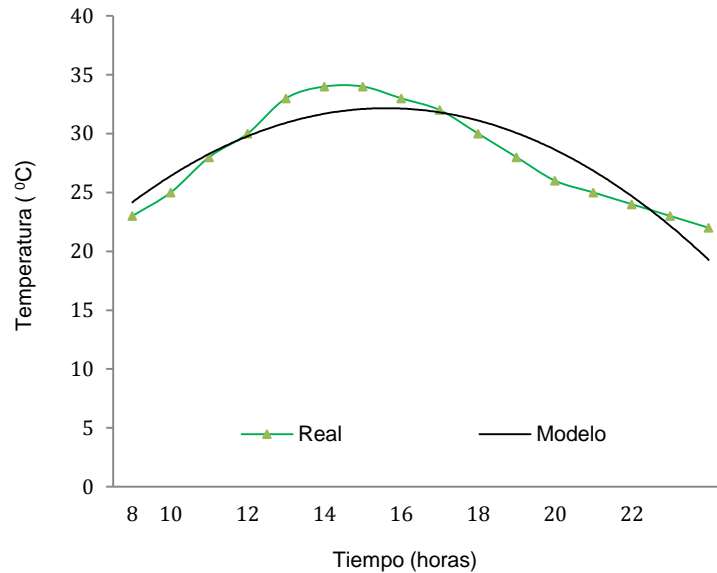


Figura 4.25 Variación de la temperatura del producto real y modelada $R^2=0.8444$

Como se puede apreciar la curva asciende hasta los 35 °C, esto demuestra que no es necesario que se controle la temperatura del aire en la cámara y por ende del producto. Podemos observar que en horas del ocaso y la noche, la curva desciende con menos pendiente, esto es debido a la acción del sistema de acumulación térmica que aporta calor y al buen diseño y construcción del secador en cuanto a hermeticidad y aislamiento térmico. El coeficiente de determinación $R^2= 0.8444$, tiene un valor alto por lo que existe un buen ajuste entre los datos experimentales y el modelo.

En la figura 4.26 se aprecia la **variación de la temperatura de salida del aire de la cámara** en el tiempo, una vez que ha pasado a través del producto y le ha extraído la humedad, hay que tener en cuenta que el aire pasa una y otra vez por el producto y el colector hasta que se satura.

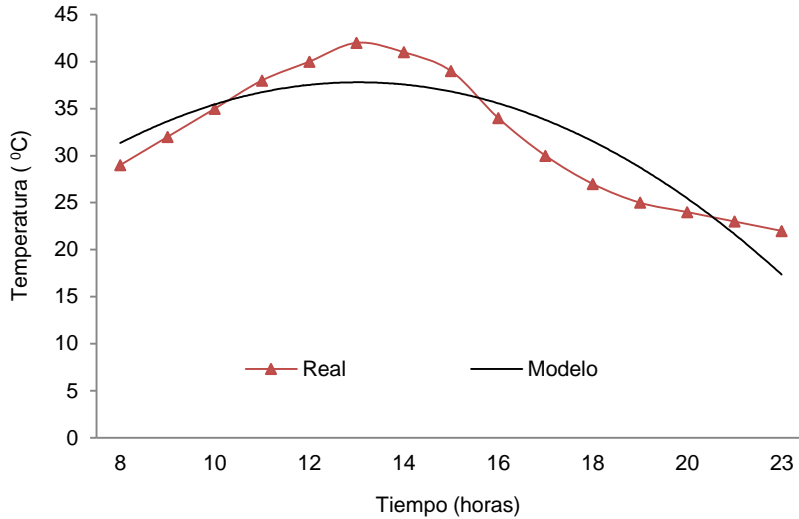


Figura 4.26 Variación de la temperatura de salida del aire de la cámara real y modelada. $R^2=0.8113$.

En la figura 4.26 se aprecia que en las primeras horas del día la pendiente de la curva es grande lo que indica que el aire se calienta rápidamente llegando a un máximo de 42 °C, pero en horas de la tarde la curva desciende lentamente, ya que el sistema tiene una tendencia al equilibrio termodinámico que se logra a partir de las 23:00 horas en los 22 °C.

Finalmente la diferencia entre los valores horarios de temperatura del producto y del aire a la salida de la cámara reales y los modelados es pequeña llegando a la conclusión que el comportamiento del secador es muy similar al desenvolvimiento modelado matemáticamente, por lo que validamos nuestro modelo.

4.6 Propuesta del secador solar a escala semindustrial.

Para seleccionar y dimensionar un sistema de secado solar es necesario, en primer lugar, considerar las cantidades de producto a procesar en el mismo y el tiempo en que se deshidrata el producto. En Cintalapa están produciendo 10 ton/año por hectárea. En estos momentos están produciendo tres hectáreas, pero se debe tener en cuenta que es un cultivo cíclico con tres cosechas anuales.

En este trabajo se ha dimensionado un prototipo de secador que pudo procesar en cada tanda de secado 2 Kg de producto húmedo por m² (8 bandejas de 1m²), de bandeja y 8 Kg de producto húmedo por m² (2 m² de área de captación), o sea un total de 16 Kg de Té Limón fresco. Según las proporciones calculadas y moduladas se propone un secador que diera respuesta a la necesidad de Té Limón deshidratado para la exportación con calidad y eficacia en Cintalapa.

Superficie de secado.

La superficie de secado está en función de la cantidad por tanda de producto a procesar y de su densidad, además de los días necesarios de funcionamiento del secadero para cada tanda de producto húmedo, siendo este último aspecto función de los parámetros logrados y simulados en el secadero experimental (temperatura, humedad, caudal de aire, etc).

Descripción del sistema propuesto.

Basándose en las características del producto a secar y la necesidad de aumentar la calidad final del producto seco se ha seleccionado un dispositivo de secado indirecto de circulación forzada. Teniendo en cuenta que la radiación solar

incidente por metro cuadrado de superficie captadora es la misma, entonces los parámetros de funcionamiento termodinámico del secador serán iguales en el prototipo y en el secador a escala semindustrial, en lo referido a la temperatura de la placa absorbadora, temperatura del aire en la cámara, temperatura del producto, flujo de aire en la cámara, etc. Esto quiere decir que hay una dependencia lineal entre la cantidad de producto a secar y el área de captación solar. Entonces se puede considerar el prototipo como un dispositivo modular que puede ser reproducido a escalas mayores manteniendo un desenvolvimiento equivalente el prototipo original, en cuanto a eficiencia y parámetros de operación ya descritos con anterioridad.

Se proponen **dos colectores solares tipo túnel** (figura 4.27), situados en paralelo y de idénticas características, para funcionamiento por convección forzada que permite un mejor control de los parámetros de secado en la cámara, mejorando la calidad del producto seco final, (este hecho se ha demostrado en los ensayos realizados en el prototipo). Estos túneles serán del mismo material que el colector del prototipo, con la placa plana ennegrecida (absorbadora) y en la cubierta vidrio comercial de 6 mm de espesor.

Esta propuesta de secador tendrá la capacidad de secar unos 300 Kg de producto fresco cada dos días, con un área de captación de 40 m², lo que implica dos túneles de 20 m² cada uno, cuyas dimensiones serán 10 x 2 m.

Se usaran dos ventiladores axiales (figura 4.27) uno en cada túnel, cada uno con las siguientes características: flujo 1m³/s, velocidad del aire impulsado 3 m/s y potencia de 0.1 kW

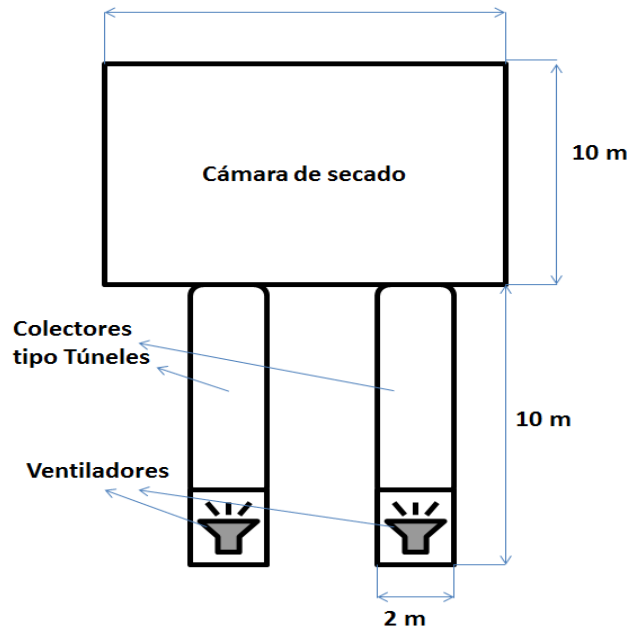


Figura 4.27 Esquema de la propuesta de secador de Té Limón.

La cámara de secado (figura 4.27), se construirá dentro de una nave ya construida, ocupando solo parte de ella. La nave tiene 30 x 18 m, se utilizará un área enmarcada de 15 m de ancho por 10 m de largo y 2.5 m de altura, esto hace una cámara con una capacidad de 375 m³, las paredes y techo serán fabricadas con lámina rellenas de poliuretano. (Multimuro V).

Dentro de la cámara se dispondrán los estantes (figura 4.30) separados a 1m de las paredes y entre ellos también, con divisiones de 0.20 m de separación entre ellos hasta lograr una altura de 1.9 m, comenzando a 0.5 m del nivel del piso. Por lo que dispondremos de estantes para colocar 8 hileras de bandejas hechas de perfiles y como fondo tela metálica.

Estos estantes tendrán dimensiones de 8 m de largo, 0.5 m de ancho y 1.9 m de alto; estas 8 hileras de estantes estarán repartidas en los 15 metros de ancho de la cámara de secado (figura 4.28) de la siguiente forma:

- Los estantes estarán separados de las paredes 1 m
- Entre los estantes también abra una separación de 1 m
- La distribución dejará en pasillo central de 3 m para facilitar la carga y descarga del producto

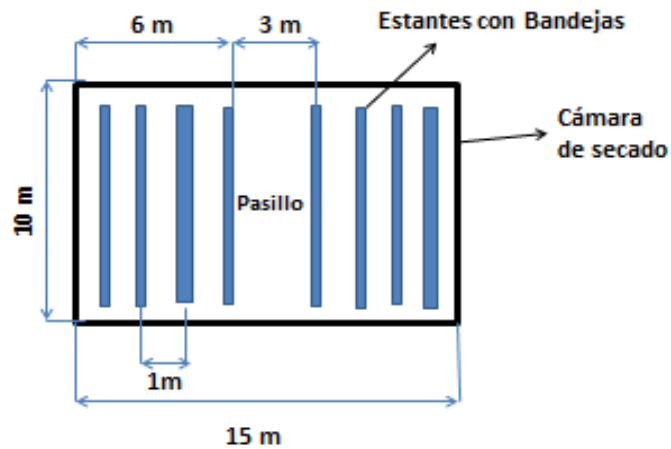


Figura 4.28 Vista superior de la distribución de los estantes dentro cámara de secado.

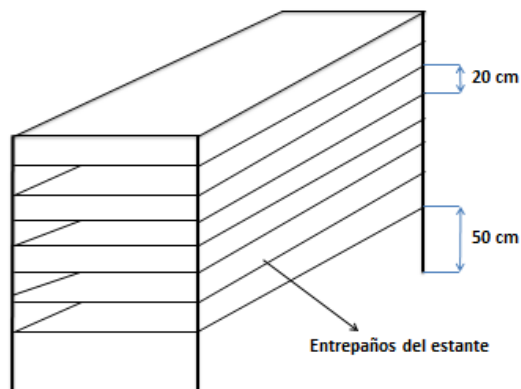


Figura 4.29 Estante para el interior de la cámara

Cada estante podrá cargar 1.4 m^3 de Té Limón, ($\cong 43 \text{ Kg}$), que por la densidad del producto (30 Kg/m^3) nos arroja una capacidad de área de secado para 344 Kg de producto suficiente para la demanda de 300 Kg .

Sistema de control

El sistema de control monitoreará solo la humedad relativa del aire dentro de la cámara por razones ya expuestas. Se dispondrá un ventilador axial (figura 4.30) para la extracción de aire húmedo de la misma, situado en la parte baja posterior de la cámara a 0.5 m de altura sobre el piso ya que el aire húmedo pesa más que el seco y se concentrará en la parte inferior de la cámara. Este ventilador estará gobernado conjuntamente con las ventanillas de regulación del flujo de salida, por el sistema de control.

El funcionamiento del moto- ventilador es el siguiente: cuando el sistema de control mande a extraer aire y por tanto a encender el moto- ventilador, la presión del aire impulsado por este hace que se abran las ventanillas que permanecerán cerradas por la acción de un resorte o contrapeso, cuando se apaga el ventilador las estas ventanillas vuelven al su posición inicial de cerradas.

Además se dispondrán dos ventiladores axiales con las mismas características técnicas que el que se usó en el prototipo, que inducen una turbulencia del aire sobre la superficie del producto y disminuyen la estratificación de temperatura y humedad, aspecto éste muy importante para conseguir un secado de calidad. Estos dos ventiladores estarán en el techo de la cámara sobre el pasillo central.

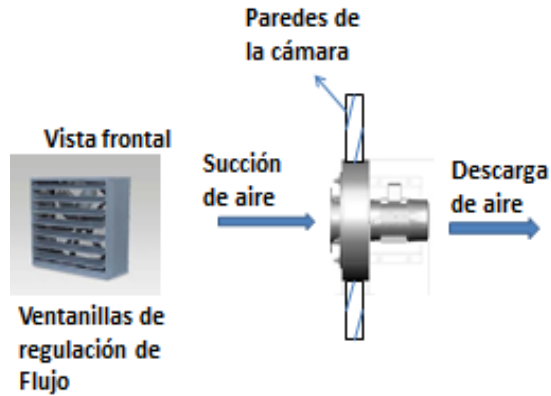


Figura 4.30 Ventilador para la extracción del aire húmedo de la cámara

El sistema de acumulación térmica propuesto tendrá las mismas características que el del prototipo experimental. El calentador del sistema de acumulación estará en la placa negra del colector de aire y tendrá su bomba de recirculación entre el colector y el tanque acumulador que será plano con aletas (radiador) este estará en el techo del justo debajo de los ventiladores axiales de remoción del aire (figura 4.31).

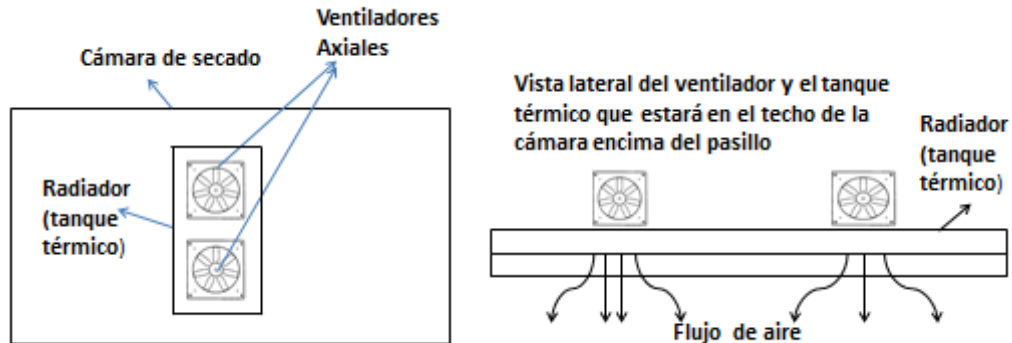


Figura 4.31 Esquema de la disposición de los ventiladores de remoción internos y del tanque térmico (vista de planta)

Materiales para la construcción del sistema de secado

Se han seleccionado los materiales teniendo en cuenta parámetros como calidad, durabilidad, facilidad de montaje y mantenimiento, coste y características físicas. Además similares a los usados en el prototipo.

La estructura de la **cámara de secado** será de paneles de Multimuro que garantizan hermeticidad, buen aislante térmico e higiene. Los estantes se harán de perfiles de acero 25 x 25, las bandejas de perfiles y como fondo de ellas tela metálica.

Los colectores tipo túnel tendrán como cubierta vidrio resistente al desgaste, la placa absorbidora será acero pintadas de negro mate.

Los ventiladores serán seleccionados de acuerdo a los catálogos. Por los resultados obtenidos en el prototipo se estima conveniente una velocidad de paso del fluido sobre el producto de 0.5 m/s. Este caudal se consigue, por un lado, a través de dos ventiladores axiales ubicados en la parte anterior de los colectores solares. La potencia nominal de estos equipos se estima en 1.5 Kw para cada uno de los ventiladores axiales de impulsión.

Carga y descarga del producto en el secador

Primeramente se hará una selección de producto eliminando lo más que se pueda las hojas marchitadas y con cambio de color, separando las ramas del tallo. Luego se transporta hacia la cámara en costales, se llenarán las bandejas de producto húmedo dispuestas en los estantes y se extraerá cuando este el Té Limón este a

la humedad de equilibrio, el proceso de llenado se realizará al igual que la recogida de forma manual. Una vez seco se llevará al área de trituración para su embazado final en costales, se almacenará en un lugar fresco, seco y techado y quedará listo para su comercialización.

4.7 Conclusiones.

En este capítulo se ha hecho el análisis de cada uno de los resultados, se han expuesto en orden cronológico el cumplimiento de todas las tareas que se propusieron en cada objetivo particular.

Se comenzó por la determinación de los principales parámetros de la deshidratación del Té Limón; se analizaron los resultados del diseño y construcción del prototipo propuesto.

Se analizaron ampliamente las evaluaciones hechas al prototipo; la evaluación en vacío arrojando su comportamiento termodinámico y su evaluación con carga donde se estudió la cinética de secado del Té Limón.

Se propuso un modelo matemático teniendo en cuenta las variables climatológicas, características físicas de los materiales usados en la construcción del secador, las variables relacionadas con el producto entre otras, para finalmente hacer una propuesta de una instalación que dé solución al problema planteado en esta investigación.

Se está en condiciones entonces de dar las conclusiones y trabajos futuros de este trabajo investigativo.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El Té Limón es una de las plantas medicinales y aromáticas de gran importancia por la diversidad de aplicaciones que tiene su aceite esencial.

Esta planta se cultiva en Cintalapa, estado de Chiapas México y se exporta de forma orgánica a Alemania, por la Unión de Productores de Zonas Marginadas del Estado de Chiapas; constituyendo una fuente de trabajo y de ingresos para los campesinos que lo han visto como una opción alternativa de siembra en sus terrenos que ya se consideraban improductivos.

Para su exportación es necesario conservarlo ya que es un producto perecedero y la mejor forma es la deshidratación. En Cintalapa no existe un proceso para el deshidratado de grandes volúmenes de Té Limón como es el caso; lo hacen de forma natural y muy rustica, bajo pequeños techos al aire libre, secándose en 5 días y además con los peligros latentes de contaminación por polvo, ratas e insectos y bajo la influencia negativa de agentes climáticos. Además se está entregando al cliente un producto “seco” con problemas de calidad, con pérdidas de componentes activos y de producto por deterioro.

Teniendo en cuenta la problemática anterior y que a este producto no debe incidirle directamente el sol además de que la temperatura de secado no debe superar los 60 °C y que se debe aumentar la productividad disminuyendo el tiempo de secado se planteó el diseño, construcción, evaluación y validación de un prototipo de secador para finalizar con la propuesta de un secador solar semindustrial que resuelva el problema en la deshidratación del Té Limón.

Para cumplir con este objetivo se propuso en esta investigación los objetivos secundarios siguientes: Diseñar y construir el prototipo de secador solar; Evaluar el prototipo de secador solar; Modelar matemáticamente el secador solar propuesto; Validar el modelo propuesto y hacer una propuesta a escala semindustrial.

Bajo las premisas anteriores se acomete el desarrollo de esta investigación obteniéndose las principales consideraciones, conclusiones y líneas futuras de trabajo que se establecen a continuación.

1.- Se diseñó y construyó un prototipo de secador solar teniendo en cuenta las características del producto a secar y las exigencias de su deshidratación, calidad y productividad. Se seleccionó un secador indirecto de tiro forzado y mejorado con sistemas de control de parámetros y de acumulación térmica.

2.- Se determinó la demanda de energía para el secado del Té Limón desde su humedad inicial del 73 % hasta la humedad de equilibrio del 10 %, se necesita para evaporar 0.68 Kg de agua por cada Kg de producto húmedo por tanto la demanda energética para secar el Té Limón húmedo es de $Q_a = 0.507 Kw / Kg \text{ de agua a evaporar}$

3.- Se desarrolló un sistema de control automático para controlar la humedad relativa del aire dentro de la cámara así se logró aumentar la calidad del producto seco final, demostrado con un análisis de calidad del producto seco y que se expone más adelante.

4.- Se desarrolló un sistema de acumulación térmica que aporta energía extra al proceso de secado, esto permitió disminuir el tiempo de secado de 5 días a 2 días y por tanto aumentar la productividad.

5.- De la evaluación en vacío del prototipo se obtuvo:

- Que en el sistema de secado propuesto el aire logra dentro de la cámara de secado parámetros termodinámicos ideales para el secado solar de productos agrícolas. Temperatura promedio de 45 °C y la humedad relativa desciende hasta los 1.5 %.
- Que la recirculación del agua del sistema de acumulación debe suspenderse a las 21:00 horas para que no se invierta el flujo de calor y se pierda el calor acumulado durante el día.
- El sistema de recirculación del aire entre la cámara y el colector debe detenerse a las 23:00 horas por las mismas razones anteriores y evitar pérdidas de calor acumulado.

6.- La comparación entre la evaluación en vacío de dos prototipos de secadores, uno sin el sistema de acumulación térmica (SSSAT) y el propuesto en este trabajo investigativo con sistema de acumulación térmica (SCSAT), dio como resultado que el SCSAT tiene mayor capacidad de secado que el SSSAT. El SCSAT sigue secando en horas nocturnas, durante 6 horas más que el SSSAT, con esto pudimos bajar el tiempo de secado a dos días y así aumentar la productividad.

7.- De la evaluación con carga del prototipo se obtuvo:

- Que el tiempo necesario para el secado es de 2 días

- Se determinó la curva de secado del Té Limón, donde están bien definidas las tres atapas con velocidades de secado distintas del proceso de secado.
- Se determinó la cantidad de producto fresco a secar por área de colector ($\cong 8 \text{ Kg /m}^2$ de área de colector).

8.- Se determinó la calidad del Té limón seco. Se compararon los resultados de calidad del Té Limón secado en la instalación experimental, en las instalaciones de Cintalapa con los expuestos en trabajo reportados y en las NOM llegando a la conclusión que el producto que se deshidrato en la instalación experimental propuesta tiene una calidad superior. Pero lo más importante el por ciento de aceite esencial, el de Cintalapa fue 0.168 % y en la estación experimental 0.221%. Además las características organolépticas del producto obtenido en la instalación experimental fueron muy superiores a la que se obtiene en Cintalapa en cuanto a color verdoso y fragancia alimonada final. Por lo que podemos concluir que el producto deshidratado en la instalación experimental tiene mejor calidad.

9.- Se planteó un modelo matemático basado en la simulación de las principales temperaturas del proceso de secado y su eficiencia; este modelo fue validado obteniéndose un nivel de ajuste de los parámetros reales y modelados alto, esto queda evidenciado por el coeficiente de determinación (R^2) que estuvo variando entre 0.84 y 0.98. La validación se realizó mediante la comparación gráfica de los párametros modelados y reales.

10.- Se propuso con esta experimentación previa una instalación de secado a escala semindustrial que procesará unos 300 Kg de producto fresco cada dos días y se expone su diseño y características de operación.

Consideraciones globales y trabajos futuros.

1.- Este trabajo propone una solución a la deshidratación de una planta medicinal y aromática que se cultiva extensivamente para su exportación en el municipio de Cintalapa en el Estado de Chiapas, México. La solución propuesta consiste en una instalación de secado solar indirecta con sistemas de circulación forzada, de control automático de parámetros y de acumulación de energía.

2.- La utilización de la energía solar es de gran interés para el deshidratado de productos agrícola con resultados de alta eficiencia y con un producto final seco de alta calidad como se demostró en esta investigación.

3.- Se realizó un modelo matemático para conocer el comportamiento de los principales párametros de secado y poder diseñar secadores para otros productos y otras dimensiones

4.- Se propuso una instalación a escala semindustrial capaz de procesar 300 Kg de producto húmedo cada dos días, con la cual se eleva la productividad del tratamiento poscosecha del Té Limón y se mejora la calidad del producto final.

5.- Hasta la fecha no existe ninguna instalación comercial que implemente el sistema propuesto. Sin embargo, por los resultados alcanzados, se considera

que la extrapolación del secado solar a una planta de grandes dimensiones presenta excelentes perspectivas.

Líneas Futuras

- ❖ La posibilidad futura de la optimización de la instalación propuesta en lo referente a los flujos de aire y niveles de temperaturas que se alcanzan en el secador
- ❖ Evaluación económica del sistema propuesto.
- ❖ Evaluación del Impacto Ambiental del sistema propuesto.
- ❖ Evaluación del Impacto Social del sistema propuesto.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
CAPÍTULO 1		
1.1	Zacate Te Limón (<i>cymbopogon citratus</i> (DC.) stapf).	2
1.2	Proceso de secado del Te Limón en Cintalapa.	4
1.3	Comparación del Te Limón con características exportables (Izquierda) y él producido en Cintalapa (derecha).	8
CAPÍTULO 2.		
2.1	Procesos de transferencia de calor y masa durante el secado.	22
2.2	Curvas de secado	26
2.3	Diversas fases en el proceso de secado	28
2.4	Isotermas de sorción a diferentes temperaturas	30
2.5	Curva típica de la variación de humedad de un producto hasta su humedad de equilibrio.	31
2.6	Mecanismo de difusión superficial en el transporte de vapor de agua	32
2.7	Carta Psicométrico del aire húmedo. Diagrama Mollier	37
2.8	Comportamiento del aire al calentarse. Cortesía del autor	41
2.9	Secador solar directo.	44
2.10	Secador indirecto con circulación natural.	45
2.11	Secador indirecto con circulación forzada	45
2.12	Secador Solar Mixto.	46
2.13	Espectro de la radiación del sol	49
2.14	Movimiento elíptico de la Tierra alrededor del sol	50
2.15	Movimiento de traslación de la tierra	50
2.16	Movimiento de rotación de la tierra	52
2.17	Coordenadas geográficas. Latitud y Longitud	53
2.18	Coordenadas celestes horizontales	54

2.19	Coordenadas celestes horarias	55
2.20	Triángulo esférico formado por el polo (Norte en el hemisferio Norte y Sur en el hemisferio Sur), el Cénit y el astro	56
2.21	Planos del ecuador y la eclíptica	57
2.22	Representación gráfica de la ecuación del tiempo	58
2.23	Ángulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie.	63
2.24	Pirheliómetro	64
2.25	El Piranómetro	64
2.26	Curva de radiación anual	67

CAPÍTULO 3.

3.1	Mapa de México destacándose el Estado de Chiapas y el Mapa político de Chiapas. Municipio de Cintalapa. INEGI	69
3.2	Distribución espacial de la población.	70
3.3	Proyecto electrónico del sistema de control para el prototipo de secador solar	77
3.4	Esquema del sistema de acumulación térmica.	78
3.5	Flujo del proceso para la obtención del aceite esencial	96
3.6	Esquema del proceso de modelado matemático del secador solar	97
3.7	Principales variables que intervienen en el modelo del colector solar	103
3.8	Esquema del balance de la cámara de secado	112
3.9	Te Limón fresco en la bandeja de la cámara del secador	113
3.10	Esquema de la pared compuesta de la cámara de secado	114

CAPÍTULO 4

4.1	Radiación solar el 21 de noviembre en el municipio de Cintalapa	123
4.2	Esquema del sistema de acumulación térmica dentro del	128

	secador.	
4.3	Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema de control	130
4.4	Diagrama General de conexión con el PIC18F4520.	131
4.5	Esquema del funcionamiento del sistema de control	131
4.6	Esquema del prototipo de secador solar	133
4.7	Fotos del proceso de construcción.	134
4.8	Fotos del secador terminado y emplazado en la UNICAH.	135
4.9	Variación de la temperaturas en la evaluación en vacío del prototipo Ratio de humedad del Te Limón	137
4.10	Variación de la humedad relativa del aire (evaluación en vacío)	138
4.11	Secadores con y sin sistema de acumulación térmica en evaluación	140
4.12	Variación de la temperatura del secador con sistema de acumulación térmica (SCSAT).	141
4.13	Variación de la temperaturas del secador sin sistema de acumulación térmica (SSSAT)	142
4.14	Temperaturas del aire dentro de las cámaras en ambos secadores	143
4.15	Variación del peso de la muestra del Te limón.	144
4.16	Curva de humedad del Té Limón	145
4.17	Temperaturas ambientales promedio anuales en Cintalapa	150
4.18	Humedad relativa promedio del ambiente diaria en Cintalapa.	151
4.19	Precipitación promedio anual en Cintalapa.	152
4.20	Velocidad del viento anual en Cintalapa. INEGI	152
4.21	Otras características climatológicas de Cintalapa	153
4.22	Variación de la temperatura de la placa absorbadora real y modelada.	156
4.23	Variación de la temperatura del aire en la cámara, real y	157

	modelada	
4.24	Variación de la eficiencia horaria modelada del prototipo de secador	158
4.25	Variación de la temperatura del producto real y modelada	160
4.26	Variación de la temperatura de salida del aire de la cámara real y modelada	161
4.27	Esquema de la propuesta de secador de Té Limón.	164
4.28	Vista superior de la distribución de los estantes dentro cámara de secado.	165
4.29	Estante para el interior de la cámara	165
4.30	Ventilador para la extracción del aire húmedo de la cámara	167
4.31	Esquema de la disposición de los ventiladores de remoción internos y del tanque térmico (vista de planta)	167

LISTA DE TABLAS

TABLA	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
Tabla 3.1	Valores de r_0 , r_1 y r_k en dependencia del tipo de clima	73
Tabla 3.2	Factor para determinar el por ciento de proteína cruda final	92
Tabla 3.3	Valores considerados constantes en el modelo del colector	108
Tabla 3.4	Valores que se consideran constantes en el modelo de la cámara	116
Tabla 4.1	Resumen comparativo de la caracterización del Té Limón seco en el prototipo experimental, en Cintalapa y los valores reportados y establecidos.	147
Tabla 4.2	Características físicas de los materiales del colector solar	154
Tabla 4.3	Características físicas de los materiales de la cámara	155

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
A_c	Área total de captación.	m^2
A_f	Área de la sección transversal del colector	m^2
Ca	Cantidad de Aceite Esencial extraído	g
C_{ph}	Calor específico del producto húmedo	$J/Kg\ ^\circ C$
C_{pa}	Calor específico del aire	$J/Kg\ K$
C_{ph}	Calor específico del producto húmedo	$J/Kg\ K$
C_{pas}	Calor específico del aire seco	$J/Kg\ ^\circ C$
DR	Ratio de humedad	$\frac{Kg\ agua}{Kg\ seco}$
D_h	Diámetro hidráulico	m
D_{ef}	Coeficiente de difusión	m^2/s
D_x	Difusividad de Knudsen	m^2/s
D	Diámetro exterior de los tubos	m
D_i	Diámetro interior de los tubos	m
F'	Factor de eficiencia del colector	%
F''	Factor de flujo del colector	%
F_R	Factor de disipación en el colector	---
G_{on}	Flujo de radiación extraterrestre	w/m^2
G_{dir}	Radiación directa	w/m^2
G_{dif}	Radiación difusa	w/m^2
G_r	Radiación reflejada o albedo	w/m^2

G_{sc}	Es la constante solar	w/m^2
G_n	Irradiancia	w/m^2
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
h	Entalpia	J/K_g
hl	Espesor de la capa de producto	m
h_2	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la placa y el aire	$W/m^2 K$
h_1	Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa y el vidrio	$W/m^2 K$
h_w	Coeficiente de pérdidas de calor por la cubierta	$w/m^2 K$
h_r	Coeficiente de transferencia de calor por de radiación entre la cubierta y la placa	$w/m^2 K$
h_{a-ph}	Coeficiente de transferencia de calor entre el aire seco y el producto húmedo	$w/m^2 K$
h_{a-pi}	Coeficiente de intercambio de calor convectivo entre al aire y las paredes internas de la cámara	$w/m^2 K$
h_{a-ph}	Coeficiente de transferencia de calor convectivo entre el aire y el producto húmedo	$w/m^2 K$
h_{a-T}	Coeficiente de transferencia de calor convectivo entre al aire y el tanque de acumulación	$w/m^2 K$
h_{a-T}	Coeficiente convectivo entre el aire y el tanque	$w/m^2 K$

h_{pe-amb}	Coeficiente de transferencia de calor entre la pared exterior de la cámara y aire ambiente	$w/m^2 K$
I_0	Irradiación	J/m^2
I_t	Intensidad de la radiación incidente sobre la superficie horizontal	w/m^2
K_{aisl}	Conductividad térmica del aislante	$w/(m K)$
K_{pe}	Coeficiente de conductividad térmica de la pared exterior de la cámara de secado	$w/(m K)$
K_{pi}	Conductividad térmica de las Paredes interiores de la cámara	$w/(m K)$
k	Conductividad térmica del material de la placa	$w/(m K)$
L	La densidad de carga de las bandejas	Kg/m^2
L_t	Calor latente de evaporización	J/Kg
l	Espesor del aislante en los lados y paredes	m
M	Altura del colector	m
m_{ph}	Masa del producto húmedo	kg
m_{ps}	Masa de producto seco	kg
M_{db}	Contenido de humedad base seca	$\frac{Kg\ agua}{Kg\ prod\ seco}$
M_{wb}	Contenido de humedad en base húmeda	$\frac{Kg\ agua}{Kg\ prod\ húm}$
M_o	Contenido de humedad inicial	%
M_{owb}	Humedad inicial base húmeda	%
M_{odb}	Humedad inicial base seca	%

m_a	Caudal de aire	m^3
M_t	Contenido de humedad másico en cada instante	Kg
M_{wb1}	Humedad base húmeda en el estado inicial,	$\frac{Kg\ agua}{kg\ prod\ húm}$
M_{wb2}	Humedad base húmeda en el estado final	$\frac{Kg\ agua}{Kg\ prod\ húm}$
m_{ph}	Masa del producto húmedo	Kg
n	Número de días	---
N	Número adimensional de cubiertas	---
P	Perímetro del colector	m
P_c	Presión crítica del agua	Mpa
P_m	Peso de muestra final	Kg
P_i	Peso de la muestra seca	Kg
Q_a	Energía consumida en la evaporación de la humedad del producto	W
q_u	Calor útil por unidad de área del colector	w/m^2
R	Constante universal de los Gases	$J/(Kmol\ K)$
R_a	Constante de los gases ideales	$J/K_g\ K$
R_g	Constante de los gases para el vapor de agua	$J/Kg\ K$
S	Energía absorbida por la placa	J/m^2
S_{ph}	Superficie de intercambio de calor entre al	m^2

	aire y el producto húmedo	
S_{pi}	Superficie de las paredes internas de la cámara	m^2
S_T	Área de las paredes del tanque de acumulación	m^2
S_T	Área de la superficie del tanque acumulador	m^2
S_{pe}	Área de las paredes externas de la cámara	m^2
t	Tiempo	s
T	Temperatura absoluta	K
T_f	Temperatura del aire a la salida de la cámara de secado	K
T_b	Temperatura del punto de ebullición del agua	K
T_{pt}	Temperatura promedio del producto	K
T_c	Temperatura crítica del agua	K
T_{amb}	Temperatura del aire ambiente	K
T_{f2}	Temperatura de salida del aire en el colector	K
T_{fi}	Temperatura de entrada del aire al colector.	K
T_{pm}	Temperatura media de la placa	K
T_c	Temperatura de la cubierta	K
T_{mf}	Temperatura media del fluido	K
T_{ph}	Temperatura del producto húmedo	K
T_{pi}	Temperatura interna de las paredes	K
T_{aisl2}	Temperatura de la pared exterior del aislante	K

T_{pe}	Temperatura de la parte exterior de la pared de la cámara de secado	K
u	Velocidad del aire superficial	m/s
U_l	Coeficiente global de pérdidas en el colector	$w/m^2 K$
U_t	Coeficiente total de pérdidas de calor por la parte superior del colector	$w/m^2 K$
U_b	Coeficientes de pérdida de calor por conducción por el fondo	$w/m^2 K$
U_e	Coeficientes de pérdida de calor por conducción por los lados	$w/m^2 K$
U_p	Coeficientes de pérdida de calor por conducción por las paredes	$w/m^2 K$
V_a	Volumen de aire	m^3
W_a	Cantidad de agua retirada en el tiempo (t)	$Kg\text{agua}/s$
W_0	Peso inicial del material a secar	Kg
W_d	Peso de materia seca	Kg
W_w	Masa total inicial	Kg
w	Distancia entre tubos en el colector de agua	m

SÍMBOLOS GRIEGOS

SÍMBOLOS	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
ε	Porosidad	---
τ	Transmisividad del vidrio	---
ρ	Densidad del producto humedo	Kg/m^3

λ	La longitud terrestre	grados
ϕ	Latitud terrestre	grados
θ_z	Ángulo cenital	grados
ψ	Acimut	grados
ω	Angulo Horario	grados
λ_z	Longitud del meridiano central local	grados
δ	La declinación solar	grados
β	Angulo de inclinación de la superficie	grados
σ	Declinación solar	grados
τ_b	Transmisividad directa	---
τ_d	Transmisividad difusa	---
ε_g	Emitancia del Vidrio	---
ε_p	Emitancia de la placa	---
ε_1	Emisividad del vidrio	---
ε_2	Emisividad de la placa absorbedora	---
τ_1	Transmisividad de la cubierta	---
τ_2	Transmisividad de la	---
σ	Constante de Steffan-Boltzmann	W/m^2K^4
α	Absortividad de la placa	---
μ	Viscosidad absoluta del aire	$N s/m^2$
η	Eficiencia térmica del colector	%
$\delta_{aisl,fondo}$	Espesor del aislante por el fondo	m
δ	Espesor de la placa	m
ε_v	Fracción de la bandeja que queda vacía	---

ν Viscosidad cinemática del aire. m^2/s

SÍMBOLO **NÚMEROS ADIMENSIONALES**

G_{rf} Numero adimensional de Grashof

R_a Número de adimensional de Rayleigh

R_e Numero de adimensional de Reynolds

P_{rf} Números de Prandtl a la temperatura del fluido

P_{rw} Números de Prandtl a la temperatura de la superficie

N_u Número adimensional de Nusselt

LITERATURA CITADA

Alaiz E. 1981 Energía solar. Cálculo y diseño de instalaciones. Sección de publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros Industriales, Madrid.

Arranz Barriga J.I, 2005. Herramienta de Simulación de Procesos Aplicados al Secado Solar de Biomasa. Informe Técnico del Proyecto del mismo nombre de la Universidad de Extremadura. España.

Aviara N.A, Ajibola O. y Dairo U. 2002. Termodinámica de las curvas de sorción en semilla de sésamo. 4ta edición, McGraw-Hill Interamericana Editores. S A. de CV, México. Pp. 15.

Bala B. K. y Woods J. L. 1994 .Simulation of the indirect natural convection Solar drying of rough rice. Solar Energy, vol. 53, no. 3, Pp. 259—266.

Bala, B.K. ; Mondol, M.R.A 2001.: Experimental investigation on solar drying of fish using solar tunnel dryer. En: *Drying Technology* 19, Pp. 427-436.

Ballandim D.A, I. Chan Yen, D.R. McGraw & O. Headley, 1996. Solar drying of West Indian Ginger rhizome using a wire basket dryer. *Renewable Energy*, 7 (4): Pp. 409 – 418.

Bahansawy A. H. y Shenana M. E. 2004. A mathematical model of direct sun and solar drying of some fermented dairy products (Kishk). *Journal of Food Engineering*, vol. 61, no. 3, Pp. 309—319.

Bautista P., Gracia P., Gutiérrez M. 1991. Modelos Matemáticos Aplicados al Secado Solar de Mango. Memorias del XV Reunión Nacional de Energía Solar. Zacatecas. México. Pp. 210-238.

- Bayona C.A. 2011. Modelamiento matemático de un secador solar de plantas aromáticas. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería.
- Bennemoun L. Belhamri A. 2003. Desing and simulation of a solar dryer for agricultural products. *Journal of Food Engineering*, vol 59, no 2-3 Pp 259 266.
- Bennemoun L. Belhamri A. 2003. Desing and simulation of a solar dryer for agriculture products. *Journal of Food Engineering*. vol 59, no 2 Pp 259-266.
- Bérriz L. 1993. Secadores solares para productos agropecuarios e industriales. Centro de Investigaciones de Energía Solar, La Habana, Cuba.
- Bernard R. Menguy G. y Schwart. 1982. La radiación solar. Conversión térmica y aplicaciones. *Technique and Documentation*. Ed. Lavoisier.
- Breto, S. Serrano S .L y M. Muñoz,1998. Manual de secaderos. Universidad de Zaragoza, España.
- Bussco A. Sogari N. Lancelle H, Arrieta F,2005. Optimisacion de un secadero solar de tipo gabinete: Evaluación y modelación del proceso de secado y tipificación del producto seco. *Avances en energía renovables y medio ambiente*, vol 5.
- Celma A. Rojas S. y Montero . Simulación térmica del proceso de secado. *Alimentación , Equipos y Tecnología* , vol 192 Pp 86-90.
- Cengel, Y. A. Boles M. A. 1996. Termodinámica. 2da edición. Tomo I y II. McGraw-Hill Interamericana Editores. S A. de CV. México. Pp. 650.
- Cordori M. y Saravia L. 2003. Analytical model for the performance of the túnel type greenhouse drier. *Renewable Energy*, vol 28, no 3 Pp 467- 485.
- Corvalan R. Horn M. Roman R. y L. Saravia, 1995. Ingeniería del secado solar. CYTED-D.

Costa A y Ferreira R. 2006. Sistema de Secado Solar para Frutos Tropicales Universidad Federal de Río Grande del Norte, Departamento de Ingeniería Química, Brasil, Revista EIA. Número 5: 119-128.

Diamante L.M y Munro P.A. 1991 “Mathematical modelling of hot air drying of sweet potato slices,” International Journal of Food Science and Technology ,vol. 40, no. 3, Pp. 99—109.

Diamante L.M.y Munro1993. “Mathematical modelling of thin layer solar drying of sweet potato slices,” Solar Energy, vol. 51, no. 4, Pp. 271—276, 1993.

Domínguez J. A AÑO 2005. Métodos de Investigación Fotoquímica. Capítulo 16. Editorial, PAIS. Pp 229 - 233.

Duffie J. A. y Beckman W.A. 1980. “Procesos Térmicos de la Ingeniería Solar”. 2da edición. Editorial John Wiley & Sons, Interscience. EUA. Pp.165.

Ekechukwu O.V 1999. “Estudios de sistemas de secado solar y principios y teorías del secado”, 6ta edición. Convention of Energy. Vol. 40. Pp. 34.

Ekechukwu O. y Norton B, 1999. Review of solar energy drying systems II and overview of solar drying technology. 6ta edición. Energy Conversion and Management, 40. Pp. 615—655.

Estrada Cajigal R. 1987. Métodos de Cálculo de la Radiación Solar. Notas de un curso de actualización en Energía Solar del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM, México. Pp 19-77.

- Ethmane Kane C. S; Jamali A; Kouhila M; Mimet A y Ahachad M. 2008. "Single-Layer Drying Behavior of Mexican Tea Leaves (*Chenopodium ambrosioides*) in a Convective Solar Dryer and Mathematical Modeling". Taylor & Francis Group.
- Exell RHB. 1980. Solar drying of mushroom using solar tunnel dryer *Renew Energy Rev.* Pp. 1–14.
- Fargas I, Seresm y Meszaros 1999. Analitical and esperimental study of modular solar dryer. *Renewable Energy*, vol 16, no 1-4 Pp 773-778 vol. 36, no. 10, Pp. 989—997.
- Fath H.E.S.1995. "Thermal performance of a simple design solar air heater with built-in thermal energy storage system," *Energy Conversion and Management*.
- Forson, F. Nazha M. Akuffo F. Rajakaruna H. 2007. Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. Department of Mechanical Engineering, Kwame Nkrumah University of Science and Technology. Kumasi. Ghana. Department of Mechanical Engineering, De Montfort University, Queens Building, Leicester LE1 9BH, UK.
- Finck Pastrana A. 2000. Notas de actualización en Energía Solar 2000. Secado solar, Centro de Investigación en Energía, Temixco Morelos, México.
- Fito P, A. Grau, J. Barat y A. Albors, 2001. Introducción al secado de alimentos por aire caliente. 1ª edición. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia. Pp 24 – 261.
- Gana D. 2007. Análisis teórico-experimental de un deshidratador solar combinado (térmico fotovoltaico) para el tratamiento de arroz. Tesis para la obtención del grado de Maestro. CIE Morelos. UNAM.

Goenther 1950. The essential Oil. D. Van Nostrand Company, New York. Vol 1 Pp 294.

Giner S.A M.C. Gely. 2005. Sorption Parameters of Sunflower Seeds of Use in Drying and Storage Stability Studies. 2a edición. Ingeniería de Biosistemas. vol. 92, Pp. 97.

Hachemi, A. B. Abed y Asnoun, A. 1998 “Theoretical and experimental study of solar dryer,” Renewable Energy, vol. 13, no. 4, Pp. 439—45.

Hassanain A. A. 2010 “Unglazed Transpired Solar Dryers for Medicinal Plants” Drying Technology, Copyright # 2010 Taylor & Francis Group

Iqbal. M 1983 , An introduction to solar radiation. Academic Press, 1983.

Jain 2005 “Modeling the system performance of multitray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage,” Journal of Food Engineering, vol. 71, no. 1, Pp. 44—54.

Janjai S. y Tung P. 2005. “Performance of a solar dryer using hot air from roof-integrated solar collectors for drying herbs and spices”. Renewable Energy 30 Pp. 2085–2095

Johnson H. K, Dale A.C. Heat required to vaporise moisture. Agric Eng; 1974:705– 714.

Kneule F, 1982. “El secado”. 2ª edición. Editorial Urmo S.A. de Ediciones, Bilbao. Portugal. Pp 41 –183.

Kitinoja . A, Kader A. 1996 “Manual de Practicas de Manejo Postcosecha de los productos Hortofrutícolas a Pequeña Escala. Universidad Autonoma Metropolitan de Iztapa. Mexico Pp 15-16 , 23 -114.

Liley P.E, Gambill W. R. 1973. Physical and chemical data. In: Perry RH, Chilton CH, editors. Chemical engineers hand book. 5th ed. New York: McGraw-Hill Book Company; 1973. Section 3.

López L. Torres E. López de Alba P. Pérez B. 2000. Producción de frutas deshidratadas con Energía Solar. Manual de Procedimiento y control de la calidad. Como mejorar nuestra alimentación”. Editado por la Universidad de Guanajuato, SIHGO del CONACYT. Pp 16-34

Macedo IC, Altemani C 1978. Experimental evaluation of natural convection solar air heaters. Sol Energy. Pp 367–9.

Marques Pereira J. A., Marcal de Queiroz D. 1991. “Secado solar de granos natural y a bajas temperaturas”. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe Santiago de Chile. Pp 5-48.

Medugu, D. W. 2010. Performance study of two design of solar dryers. Department of Physics, Adamawa state University, Mubi, Nigeria Scholar Research Library.

Mendenhall W., Beaver R. Beaver B. 2010. Introducción a la Probabilidad y Estadística. 10a edición. Editorial CENGAGE Learning. Pp 120.

Miranda F. 2003. “La Vegetación de Chiapas” Segunda Parte. Del Instituto Botánico del Estado de Morelos. Pp 238 - 239.

Mujumdar A. S 2000. Drying Technology in Agriculture and Food Sciences. Publicaciones Científicas Inc, Enfield. EUA. Pp 14 -23

Nandwani S. S. 2006. “Design, construction and study of a hybrid solar food processor in the climate of Costa Rica”. Renewable Energy 32 Pp. 427–441

Navarrete J. J. y Torres E. 2009. Curso de Secado Solar. ANES.

Nijmenh M. Ragab A. Emeish S y Jubran, B. 1998 "Design and testing of solar dryers for processing food wastes," *Applied Thermal Engineering*, vol. 18, no. 12, pp. 1337—1346, 1998.

Okos M. R. Narsimhan G. Singh R. y Weitnaver A. 1992. Food dehydration. *Handbook of food Engineering*. Editado por D. R. Heldman y D. Marcel Dekker. New York.

Pearson. D, 1998 "Técnicas de laboratorio para análisis de alimento". Editorial Acribia. S.A Zaragoza. España Pp 123-156.

Pilatowsky F. 2002. "Análisis técnico económico del secado de arroz mexicano producido en el estado de Morelos". *Memorias de la XXIII Reunión Nacional de Energía Solar*, Morelia, Michoacán. Pp 65-127.

Purohit, P., Kumar, A. ; Kandpal, T. 2006. Solar drying vs. open sun drying: A framework for financial evaluation. En: *Solar Energy* 80. Pp. 1568 – 1579.

Ratti, Mujumdar, 1997 "Solar drying of foods: modeling and numerical simulation," *Solar Energy*, vol. 60, no. 3/4, pp. 151—157.

Sagar, V.y Suresh, P.:2010. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. En: *Journal of Food Science Technology* 47. Pp. 15-26.

Salom L. y Felipe, 1999 "Modelo matemático para secadores solares indirectos." VIII Congreso Ibérico de Energía Solar. Oporto, Portugal.

Sánchez. O. 2006. *Manual Práctico de aceites esenciales, aromas y perfumes*. España. PP. 74.

Sarapin Nikolai 2000" *Fundamentos de Tecnología de Procesos Fototerapeuticos*", Edición 1era. Red Iberoamericana de Productos Fototerapeuticos. Santa Fe de Bogotá Colombia.

Saravia L, Saravia D, Sánchez B. El diseño de secadores solares usando las curvas de secado del producto. Instituto UNSA-CONICET, Argentina. 2008.

Sarsavadia P.N. 2007 “Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion”. *Renewable Energy* 32 Pp. 2529–2547

Saravia L. Zunino L. y R. Echazú, 1990. “Performance y diseño de secaderos-invernaderos de convección forzada.” V Congreso Ibérico y IV Congreso Iberoamericano de Energías Renovables. Madrid, España.

Shahi, A. K. y Tava, A. 1993. Essential Oil Composition of three *Cymbopogon* Species of Indian Thar Desert. *J. Essent. Oil Res*, 5 : Pp 639-643.

Sogari N. y Saravia L 2003. Modelación de un secador de madera con circulación de aire por convección natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 7, no. 1, Pp. 02.07—02.12.

Soto Ortiz R. 2001 “*Cymbopogon Citratus* (DL) Stapf (Caña Santa). Tesis para la obtención del grado de doctor, Cienfuegos. Cuba. Pp. 5 -12.

Tiwari.G.N. 2002. *Solar Energy. Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. Alpha Science International Ltd., New Delhi, India.

Togrul I. T. y Pehlivan, D. 2004. Modeling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. *Journal of Food Engineering*, vol. 65, no. 3, pp. 413—425.

Torres Roldán Francisco, Gómez Morales Emmanuel. 2006. *Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México*. Secretaria de Energía (SENER). Pp 12-87

Torres E. y Navarrete J. J, 2004. Congreso Mundial de Energía Renovable México 2004. Instituto de Investigaciones Científicas. Universidad de Guanajuato.

Torres E. 1998. "Secado Solar en el Estado de Guanajuato2. Mt-23/96. CONACYT.

Torres E. Navarrete e Ibarra 2002. Thermodynamic method for designing dryers operated by flat - plate solar collectors. Renewable Energy, vol 26 no 4 Pp 649-660.

Van Arsdel N. B. y Copley M. J. 1963. Food Dehydration. AVI Publishig.

Van Brakel J. 1980. Mass transfer in convective drying. En Advances in Dry. Editado por A. S. Mujundar. Hemisphere Publishing. New York.

Normas Mexicanas

NMX-AA-005-SCFI-2000. Análisis de agua, determinación de grasa y aceites recuperables en aguas naturales. Métodos 5520 "Soxhlet Extraction Method". Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, WA American Public Health Association (APHA), Washington, DC 20005, 19 th Edition 1995, pp. 5-34.

NMX-F -257-S-1978. Preparación de la muestra y determinación del porcentaje de humedad y de materia seca en Té y producción similares. Dirección General de Investigación en Salud Pública. Secretaria de Salubridad y Asistencia. Técnicas para el análisis Fisicoquímicos de Alimentos. 1976.

Páginas Web

<http://es.wikipedia.org/wiki/cintalapa>". Categoría. Chiapas. INEGI

ANEXO 1

PROGRAMA DE CALCULO DE RADIACION SOLAR INCIDENTE

DATOS DE ENTRADA

Fecha de nacimiento (DD/MM)		"Día"	/	"Mes"
Longitud Estándar		Hora civil		
Longitud Local		"Horas"	:	"Minutos"
Latitud		"Horas.Min"		
Tiempo solar	"Horas.Min"			

Resultados

N	Dado por la fecha de nacimiento, "N" número de días transcurridos del año	
Declinación	$23.24 * (\text{SEN}((360/365) * (N+284.4)))$	
α	$360 * (N-81) / 365.25$	
ϵ	$9.87 * (\text{SEN}(2 * (\alpha\pi/180))) - (7.53 * \text{COS}(\alpha\pi/180)) - (1.5 * \text{SEN}(\alpha\pi/180))$	
Diferencia en minutos	$4 * (\text{LongitudEstandar} - \text{LongitudLocal}) + \epsilon$	
Altura Solar	$\text{ArcoSEN}(((\text{SEN}(\text{Declinacion}) * \text{SEN}(\text{Latitud})) + (\text{COS}(\text{Declinación}) * \text{COS}(\text{Latitud}) * \text{COS}(\text{Ángulo horario}))))$	
Tiempo Solar	La hora real del lugar, añadiendo la diferencia de minutos a la hora civil.	
Ángulo horario	$360 * (\text{Tiempo solar} - 12) * (1/24)$	
Ángulo Zenital	$\text{ArcoCOS}((\text{SEN}(\text{Declinación}) * \text{SEN}(\text{Latitud})) + (\text{COS}(\text{Declinación}) * \text{COS}(\text{Latitud}) * \text{COS}(\text{Ángulo horario})))$	
Ángulo Acimutal	$\text{ArcoCOS}(((\text{SEN}(\text{Altura Solar}) * \text{SEN}(\text{Latitud})) - \text{SEN}(\text{Declinación})) / (\text{COS}(\text{Altura solar}) * (\text{COS}(\text{Latitud}))))$	
Radiación Total		
Radiación Directa		
Radiación directa en una Superficie vertical		
Radiación Difusa		

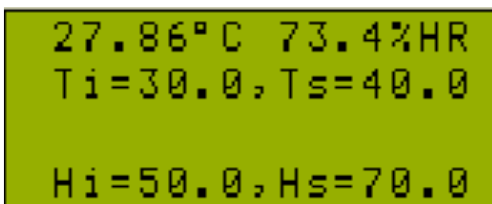
ANEXO 2

FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL. COMO MODIFICAR LOS PARAMETROS DEL SISTEMA.

Para poder modificar los rangos de temperatura y humedad relativa se deberán seguir los siguientes pasos:

Paso 1:

Se deberá visualizar en el LCD, la temperatura y humedad relativa actual, así como los rangos a los que está operando en ese momento el sistema, a continuación se muestra una figura con los parámetros mencionados:



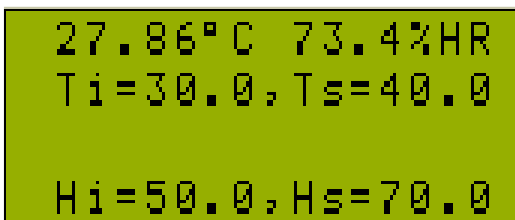
```
27.86° C 73.4%HR
Ti=30.0, Ts=40.0

Hi=50.0, Hs=70.0
```

Pantalla principal del sistema

Paso 2:

Se deberá elegir el parámetro a modificar, para este ejemplo se modificara el parámetro: Temperatura Inicial (Ti). En la figura # se muestra una Ti = 30°C.



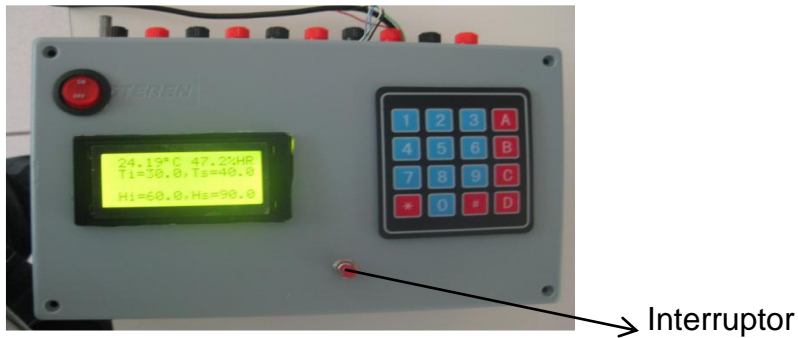
```
27.86° C 73.4%HR
Ti=30.0, Ts=40.0

Hi=50.0, Hs=70.0
```

.Temperatura Inicial (Ti)

Paso 3:

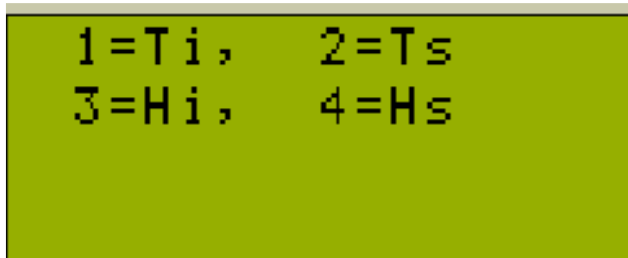
Se deberá presionar el push- button que está en la parte superior del sistema, esto activará una interrupción en el microcontrolador, y servirá para acceder al menú del sistema.



Interrupción del sistema

Paso 4:

Al activar la interrupción, aparecerá un menú con las siguientes opciones:



Menú de selección

- 1: Temperatura Inferior
- 2: Temperatura Superior
- 3: Humedad Inferior
- 4: Humedad Superior

Como se observa aparece un menú donde se muestran los parámetros a modificar, cada uno con un número del 1 al 4. Para seleccionar uno de ellos, basta con presionar en el teclado el número que corresponde al parámetro. Para este ejemplo seleccionaremos el número 1.

Paso 5:

Una vez seleccionado el parámetro Automáticamente aparecerá en la pantalla del LCD un mensaje como se muestra en la siguiente figura



Dato nuevo

Para este caso se modificará la $T_i = 30$ por $T_i = 24.5$, por lo tanto se deberá presionar en el teclado las teclas: Dos (2) + cuatro (4) + punto (*) + cinco (5), los datos aparecerán como se muestra en la figura:



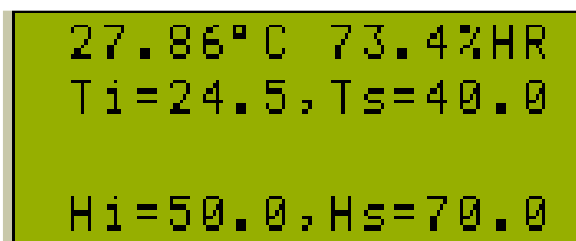
Dato nuevo escrito

Después de escribir los datos se presiona enter (#), para que el numero sea guardado, con esta acción el sistema vuelve a su estado normal regresando a la pantalla principal del sistema.

Paso 6:

Verificar que el parámetro haya sido modificado y guardado en el sistema, esto se puede ver en la pantalla principal, para este ejemplo es $T_i = 24.5$, esto quiere decir que el parámetro fue aceptado por el sistema.

A continuación se muestra una imagen con el parámetro "Ti" modificado



Parámetro Ti modificado

ANEXO 3

TEMPERATURAS PROMEDIOS EN LA EVALUACIÓN EN VACÍO DEL PROTOTIPO

Hora	Vidrio	Cámara	Placa Arriba	Placa Abajo	Entrada al Tanque	Salida del Tanque	Paredes Cámara	Ambiente
10:00	40	45	51	42	40	47	47	26
11:00	44	57	50	52	41	56	57	28
12:00	50	64	52	60	43	60	66	28
13:00	56	70	72	67	54	67	68	30
14:00	51	75	70	69	49	75	72	31
15:00	51	63	69	68	65	68	70	31
16:00	45	63	43	65	55	65	55	30
17:00	40	60	45	58	51	59	48	30
18:00	30	48	30	45	37	51	42	27

ANEXO 4

VALORES PROMEDIOS REGISTRADOS DE HUMEDAD RELATIVA EN EL AMBIENTE Y EN EL INTERIOR DE LA CÁMARA (HR- HUMEDAD RELATIVA)

Tiempo (h)	HR Ambiente (%)	HR Cámara (%)	Tiempo (h)	HR Ambiente (%)	HR Cámara (%)
7.00	52	50	13.00	38	1.5
8.00	50	38	14.00	40	1.5
9.00	46	25	15.00	42	2.5
10.00	44	16	16.00	45	8
11.00	42	9	17.00	48	16
12.00	40	3	18.00	39	20

PRODUCTOS DE LA TESIS

1. Artículo "DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR CON CIRCULACIÓN FORZADA". Revista LACANDONIA". UNICACH. año 5, vol 5, núm. 1, junio del 2011.
2. Patente "SECADOR SOLAR DE USOS MÚLTIPLES CON SISTEMA DE ACUMULACIÓN TÉRMICA". Número de registro MX/a/2013/000425
3. Patente "PROCEDIMIENTO PARA EL SECADO SOLAR DE QUESO FRESCO". Número de registro MX/a/2013/000426.
4. Patente "COLECTOR SOLAR INTEGRAL AIRE – LIQUIDO CON ALMACENAMIENTO TÉRMICO" Número de registro MX/a/2012/13734.
5. Patente "SECADOR SOLAR MIXTO CON CIRCULACIÓN NATURAL Y FORZADA" Número de registro MX/a/2012/137737.
6. International Materials Research Congress "EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF DIFFERENT TECHNOLOGY THE CONSERVATION OF PRODUCT". Sociedad Mexicana de Materiales Cancun 2010.
7. International Materials Research Congress "SOLAR DRYING TECHNOLOGY FOR THE CONSERVATION OF LEMONBGRASS". Sociedad Mexicana de Materiales Cancun 2011.

8. International Materials Research Congress “ANALYSIS AND COMPARISON OF SOLAR AND CONVENTIONAL DRYING OF HERBARIUM SPECIMENS”. Sociedad Mexicana de Materiales Cancun 2011.
9. International Materials Research Congress “DESIGN OF A SOLAR – BIOGAS SYSTEM FOR THE DEHYDRATION OF AGRICULTURAL PRODUCTS”. Sociedad Mexicana de Materiales Cancun 2011.
10. International Materials Research Congress “DRYING KINETICS OF CHEESE UNDER CONTROLLED CONDITIONS”. Sociedad Mexicana de Materiales Cancun 2012.
11. International Materials Research Congress “THE EFFECT OF THE SLIP CONDITION ON HEAT TRANSFERS IN A VISCOUS FLOW BETWEEN PARALLEL PLATES”. Sociedad Mexicana de Materiales Cancun 2011.
12. International Materials Research Congress “SOLAR AND CONVENTIONAL DRYING PROCESS OF HERBARIUM SPECIMENS. ANALYSIS AND COMPARISON”. Sociedad Mexicana de Materiales Cancun 2012.
13. Artículo enviado “Estudio Teórico Experimental de un Secador solar para frutas tropicales”. Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología. ISSN: 1405 – 7743.

14.VII Reunión Nacional de la Red Mexicana de Bioenergía A.C
“DESARROLLO, IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS
DE APROVECHAMIENTO DE RECURSOS BIOENERGÉTICOS
DISPONIBLES EN COMUNIDADES RURALES DEL ESTADO DE
CHIAPAS” Octubre 2010, Cuernavaca. Morelos.

15.International Materials Research Congress “DRYING KINETICS OF
CHIAPAS’S FRESH CHEESE UNDER CONTROLLED CONDITIONS”
Sociedad Mexicana de Materiales Cancun 2013.

