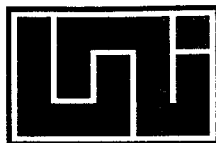


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**



**DISEÑO Y ESTIMACIÓN DE COSTOS DE
UN SECADOR HÍBRIDO PARA JENGIBRE.**

TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO POR:

Br: Julio César Rivas Osejo.

PARA OPTAR AL TÍTULO DE :

INGENIERO QUÍMICO

Tutor:

Ing. Rodolfo Espinosa M.

Asesor:

Dr. Joaquín Martínez.

**Managua, Nicaragua
Agosto 1999.**

Dedicatoria

A Swami Gúru Devanand Sarawasti Ji Majara; el maestro del presente. A quien le debo todo lo que soy.

*A mis amados señores **padres Barbara Osejo y Reynaldo Rivas**; quienes supieron sembrar en mi corazón la semilla de la caridad, fe y esperanza.*

" Sería mera presunción de mi parte tratar de eludir una fracción de las maravillas contenidas en las escrituras sagradas, de los eternos vedas, en las cuales, aunque transformáramos en papel todos los árboles y plantas del universo, y tornáramos en tinta las aguas de los océanos, asimismo, no serían suficiente para escribir al respecto de la grandeza, maravilla y glorias del Todopoderoso y su creación. Como una mina del más puro oro puede no ser encontrada en la superficie, sus venas más ricas solamente premiarán aquellos que tuvieran la paciencia de cargar por años la lámpara de la fe. no importa que a veces haya obscuridad, y conserven firmemente la llama de acceso a la verdad, hasta que de alguna forma o en algún lugar, por la gracia de algún Grande Gúru o Maestro, nuestra llama interior nos conduzca para el frente y para arriba hasta el creador mismo, lo que es revelado a algunos y ocultos a otro".

Agradecimiento

Seria mera presunción de mi parte tratar de escribir los nombres de cada una de las personas que me brindaron de forma espontánea y sincera su ayuda para la culminación de ésta investigación.

*Al **Ing Rodolfo Espinosa** por haberme brindado ese voto de confianza que necesitaba para llevar mis ideas y planteamientos a la práctica. Por enseñarme los caminos del campo investigativo.*

*A todos los miembros del proyecto **UNI-KTH** por todo el apoyo brindado para realizar la tesis.*

*A mi esposa **Karla Cristina Zamora** por tanta fuerza que me transmitió para finalizar la tesis. A mis queridos y apreciables hermanos en especial a **Reyna, Luz Marina, Yamilet, Marbelli y Yadira Rivas osejo** a quienes les debo tanto en esta vida.*

*A mis amigos **Sergio, José Francisco, Silvia, Helia, Eloina, Amalia, Thelma. Claudia y Dalia** a quienes les agradezco tantas cosas que no alcanzaria contar en tantos años que compartimos juntos.*

A todos ellos mis más sinceros e infinitos agradecimientos por tanta ayuda y apoyo para concluir con éxito la tarea encomendada. Mis mejores pensamientos para todos ellos.

OPINIÓN DEL CATEDRÁTICO GUÍA

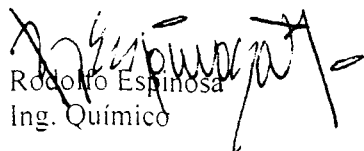
Aunque nuestro país goza de alta radiación solar durante la mayor parte del año, esta energía gratuita no es aprovechada. En Ingeniería Electrónica se estudia sobre energía solar, celdas solares y temas afines. Pero no se habla sobre este tema en Ingeniería Química, cuando se puede hacer uso de este recurso natural para operaciones unitarias tales como el secado. En nuestro país se seca “tendido al sol”: café, tabaco y pescado, entre otros. El tiempo de secado es prolongado y se tiene el riesgo de lluvias, contaminación y degradación del producto. Por estas razones el jengibre requiere de un secado en equipos. Además, se puede utilizar colectores solares para pre calentar el aire secante y disminuir el consumo de energía eléctrica, derivados del petróleo o biomasa, según sea el caso.

Para este trabajo de tesis: “Diseño y Estimación de Costos de un Secador Híbrido para Jengibre”, realizado por el Br. Julio Cesar Rivas Osejo, se seleccionó precisamente el jengibre por las dificultades que atraviesan actualmente los productores para exportar o vender internamente un alto porcentaje de su cosecha. El jengibre excedente que ahora significa una grave pérdida económica, podría usarse para obtener jengibre seco entero o en polvo, o bien aceite esencial u oleorresina. El primer paso es el secado y al utilizar un secador híbrido se pretende presentar una alternativa de bajo costo de procesamiento.

La mayoría de las tesis relacionadas con secado comprenden una de estas tres actividades: determinar curvas características; diseñar o ; evaluar el secador. Para esta tesis se decidió cubrir la determinación de las curvas características de secado para el jengibre y el diseño de un secador experimental. Otra tesis, realizada por estudiantes visitantes suecas, comprendió la evaluación del secador, para su posterior modificación y escalamiento.

Para la determinación de las curvas características se consideró el efecto de la deformación del jengibre durante su secado. Hasta ahora, este fenómeno había sido considerado despreciable en otras tesis. El Br. Rivas también debió adquirir nuevos conocimiento para el diseño del colector solar. Aunque no esta indicado en la tesis, el Br. Rivas también colaboró en la construcción del equipo y apoyo en parte de los experimentos de la tesis de evaluación. Participó en la III Feria Anual de Energía Renovable, realizada en UNI el 6 de marzo de este año, durante la cual expuso su trabajo y el funcionamiento del equipo. Posteriormente, en mayo impartió una charla como parte de actividades promovidas por TECNOSOLUCIÓN. Se ha comprobado que existen productores y organismos interesados en trabajar con equipos que aprovechen la energía solar. Quizá la primera razón que los lleva a esta opción es la conservación de recursos naturales y disminución del daño al medio ambiente. A largo plazo se impondrá el factor económico y de eficiencia, por lo cual resulta de interés continuar trabajando en construcción y mejoramiento de equipos.

Esta tesis, por tanto, es una primera guía para nuevos trabajos dentro del área de energía solar en relación con el secado de productos naturales. Agradezco al Br. Rivas el contribuir a este primer paso dentro del proyecto UNI-KTH. Considero que demostró gran capacidad técnica y de conocimientos en la realización de esta investigación. Solicito a los honorables miembros del jurado acepten esta tesis como último requisito de sus estudios y otorguen al Br. Julio Cesar Rivas Osejo el título de Ingeniero Químico.


Rodolfo Espinosa
Ing. Químico

22 de Abril de 1999

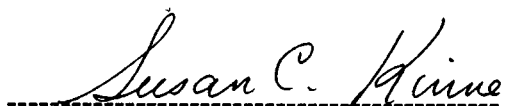
CARTA DE RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente el Grupo FENIX, que trabaja con TECNOSOLUCIONES en el área de Energía Renovable, queremos agradecer al Ing. Rodolfo Espinosa, responsable de investigación del proyecto UNI-KTH en el área de extracción y secado y al Ing. Inf. Julio César Rivas Osejo, tesista, ambos pertenecientes a la Facultad de Ingeniería Química, Por su participación en la Feria de ENERGÍA RENOVABLE realizada en el 6 de Marzo de 1999, en la Universidad Nacional de Ingeniería, con el proyecto de investigación: **"Secador Híbrido para Hojuelas de Jengibre"**.

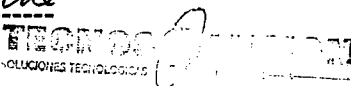
Como parte de su participación en la Feria el Ing. Inf. Julio César Rivas Osejo realizó la demostración y a la vez exposición del funcionamiento del prototipo de secador híbrido, que consta de un colector solar y de una cámara de resistencias.

También agradecemos por la participación de Rivas Osejo, en el ciclo de conferencias promocionadas por nuestro proyecto a los interesados en el tema de Energía Renovable.

Gracias por apoyar y fortalecer la misión pionera de nuestro proyecto en dar a conocer las diferentes formas de utilización de la energía solar y su fácil aplicación en las diferentes tareas productivas del país. Nuestro más apreciable reconocimiento a su trabajo investigativo y encomiable labor realizada para finalizar su proyecto.



Ing. Susan Kinne.
Directora del Grupo Fénix.
Encargada del Area de Energía Renovable
TECNOSOLUCIONES.



cc: Ing. Inf. Julio César Rivas Osejo.
Ing. Rodolfo Espinosa.
Ing. susan Kinne.

RESUMEN

El presente trabajo esta dirigido al diseño, construcción y análisis de costos de un secador híbrido para jengibre. Además se presenta un análisis de la influencia que tienen algunas variables de operación sobre el proceso de secado del jengibre.

El trabajo presenta, un estudio acerca de la influencia del encogimiento sobre la velocidad de secado del jengibre. Se presenta las curvas características de secado del jengibre utilizando aire seco y aire húmedo, incorporando el efecto del encogimiento. También se presenta un análisis del efecto de la temperatura del aire sobre la temperatura del sólido. Se establece la temperatura óptima para llevar a cabo el secado del jengibre en 60°C. Para realizar el secado del jengibre se hace necesario cortarlo en rodajas sin pelarlo con un grosor entre $3 - 5 \times 10^{-3}$ m.

El secador híbrido tiene la particularidad de operar inicialmente a una temperatura de 80°C y luego decender a una temperatura de 60°C, sin afectar la calidad del producto. El equipo consta de un colector solar (fuente principal de calor), cámara de resistencia (fuente auxiliar de calor) y la cámara de secado. El colector solar tiene un área de 2 m² y la cámara de secado 1.20 m², la cual consta de 5 bandejas ondulada triangulares distribuidas uniformemente.

Además, se presenta un análisis de costos de construcción del secador híbrido y de producción del jengibre en el equipo. El precio del equipo resulto de C\$ 16556.77 y el precio de producción del kilogramo del jengibre seco es de C\$ 17.73. Los resultados indican, que la alternativa de secar el jengibre rechazado en el secador híbrido resulta atractiva.

INDICE

Contenido	Página
Dedicatoria	i
Agradecimiento	ii
Opinión del Catedrático Guía	iii
Resumen	iv
Indice	v
Lista de Figuras y Tablas	vii
I. Introducción	1
II. Objetivos	3
III. Marco Teórico	
3.1 Generalidades de secado	4
3.2 Curva de característica de secado	5
3.3 Proceso de secado en la carta psicrométrica	8
3.4 Secado de jengibre	8
3.5 Secador híbrido	10
3.6 Colector solar	
3.6.1 Generalidades	11
3.6.2 Clasificación de los colectores solares	14
3.6.3 Diseño de colectores solares	15
3.7 Cámara de resistencias y de secado	19
IV. Material y Método	
4.1 Material	
4.1.1 Preparación del jengibre	21
4.1.2 Descripción de los equipos utilizados para la determinación de la relación área-volumen-humedad	21
4.1.3 Descripción del equipo para la determinación de las curvas características de secado	22
4.2 Método	
4.2.1 Determinación de la relación área-volumen-humedad	
4.2.1.1 Condiciones experimentales y descripción de los experimentos	23
4.2.1.2 Evaluación experimental	23
4.2.2 Determinación de las curvas características de secado	
4.2.2.1 Condiciones experimentales	23
4.2.2.2 Descripción de los experimentos	24

4.2.2.3 Evaluación experimental	25
4.2.3 Determinación de la carga másica de las bandejas del secador	25
4.2.4 Metodología de cálculo para el diseño del secador híbrido	
4.2.4.1 Parámetro de diseño del secador híbrido	26
4.2.4.2 Metodología para el diseño del secador híbrido	26
4.2.5 Estimación de costos del secador híbrido	29
4.2.6 Determinación del precio unitario del jengibre seco	31
V. Resultados y Discusión	
5.1 Determinación de la curva característica de secado	32
5.2 Secador híbrido	35
5.3 Análisis de costos del secador híbrido	39
VI. Conclusion	43
VII. Recomendaciones	44
VIII. Nomenclatura	45
IX. Bibliografía	47
X. Apéndices	51

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Figuras		Página
Fig. 3.1	Curva de velocidad de secado	6
Fig. 3.2	Esquema del proceso de secado en la carta psicrométrica	8
Fig. 3.3	Partes fundamentales del colector solar	11
Fig. 3.4	Trayectoria de la radiación incidente sobre un colector solar	12
Fig. 3.5	Disposición de la placa de absorción en el colector solar	14
Fig. 3.6	Variación de la declinación solar a través del año	16
Fig. 4.1	Porta Muestra	22
Fig. 4.2	Secador de túnel	23
Fig. 4.3	Disposición de la muestra de jengibre en la cámara de secado	23
Fig. 5.1	Distribución de temperatura en el colector solar y la cámara de secado utilizando únicamente el colector solar para calentar el aire	37
Fig. 5.2	Distribución de temperatura en el colector solar y la cámara de secado utilizando las dos fuentes de calor para calentar el aire	38
Fig. 5.3	Diagrama de los costos de mano de obra y de los materiales de construcción del secador híbrido	41
Fig 5.4	Diagrama de los costos involucrados en el procesamiento del jengibre en el secador híbrido	41
 Tabla		
Tabla 3.1	Comparación de los materiales utilizados para la construcción de la cubierta	12
Tabla 3.2	Comparación de los materiales utilizados para la construcción de la placa de absorción	13
Tabla 5.1	Costos de los materiales de construcción y de mano de obra del secador híbrido	39
Tabla 5.2	Costos involucrados en el procesamiento del jengibre en el secador híbrido	40

Apendice

Apéndice A	Curvas Experimentales de velocidad de secado, característica de secado y temperatura del sólido empleando aire seco y aire húmedo	1A
Apéndice B	Curvas experimentales de la variación volumétrica de las rodajas de jengibre empleando cortes transversales y longitudinal	1B
Apéndice C	Cálculos del Diseño del colector solar	1C
Apéndice D	Proceso de secado del jengibre en la carta psicrométrica	1D
Apéndice E	Tablas de la literatura empleada para el diseño del colector solar	1E
Apéndice F	Cálculos de costos del secador híbrido	1F
Apéndice G	Datos experimentales de la cinética de secado y de temperatura del sólido empleando aire seco y aire húmedo	1G
Apéndice H	Datos experimentalesde de la variación volumétrica de las rodajas de jengibre empleando cortes transversal y longitudinal	1H
Apéndice I	Datos experimentalesde de ensayos en el secador híbrido	1I
Apéndice J	Planos del secador híbrido	1J

I. INTRODUCCION

La producción nacional de jengibre actualmente se está viendo afectada por cuantiosas pérdidas posteriores a la cosecha. Se estima que un 60% de la producción nacional no cumple con las normas de calidad para exportación. Generalmente se emplea cerca de un 15% de la cosecha como semilla. El resto de la cosecha que no es producto exportable se le conoce como jengibre de rechazo. A nivel internacional el jengibre se comercializa en tres formas: verde (fresco), encurtido o en conserva, y seco. En el país únicamente se comercializa en forma fresca. El comercio del jengibre a nivel local resulta muy costoso debido a los altos costos de transporte desde los lugares de producción hacia los lugares de comercialización. Por esta razón, los productores optan por dejar que se pierda en el campo; donde al descomponerse origina enfermedades como hongos.

El jengibre (*Zingiber Officinale* Roscoe) es una planta herbácea formada por rizomas subterráneos. Es originario del Asia tropical y subtropical, así como del norte de Australia. Es una planta de cultivo anual, generalmente su cosecha se realiza en época de verano. Su valor comercial radica en las propiedades aromáticas y picantes que posee su rizoma. El jengibre se utiliza para cocinar, para bebidas y con fines medicinales por ejemplo como digestivo. Actualmente en el país se cultivan las variedades Jamaica (ocupa el mayor porcentaje de áreas sembradas), Criollo, Hawaiano, Gran Caimán y Sierra Leona. En el país se cultiva en diferentes zonas ecológicas como Matigüas, Pita del Carmen, Wasaka, Río Blanco, Waspán, Nueva Guinea y Rama. Sin embargo Eke (referencia personal), afirma que no hay una clara definición de variedades en Nicaragua; ya que a lo largo de los años se ha ido mezclando semillas y no puede afirmarse que el rizoma en uso sea de una variedad determinada.

Se ha propuesto la opción de secar y vender el jengibre de rechazo para su aprovechamiento. Este puede ser utilizado para la extracción de oleoresina y aceite volátil, o simplemente ser molido para ser usado como condimento. Las zonas de interés para tal fin son Nueva Guinea y San Carlos. Para secar el jengibre se requiere diseñar un secador convectivo utilizando la tecnología híbrida. La cual consiste de dos fuentes de generación de calor. Una fuente primaria que consta de un colector solar y una fuente auxiliar que utiliza energía eléctrica o biomasa para la generación del calor restante necesario a suministrar al aire de secado. Tal secador puede ser localizado en los centros de acopio del jengibre.

La tecnología híbrida ha empezado a tener auge en la actualidad como resultado de la creciente demanda energética y el aprovechamiento de las fuentes naturales de energía tales como: biomasa y solar. Generalmente esta tecnología ha sido aplicada a secadores del tipo bandejas teniendo conocimiento de sus exitosos resultados en países donde ha sido aplicada. Ejemplo de ello es Guatemala y Costa Rica (ICAITI, 1987), en los cuales ICAITI (Instituto Centroamericano de Tecnología e Investigación), desarrolló modelos para el secado de cacao. Se ha logrado un ahorro de energía considerable y un producto seco de buena calidad. Se concluyó que estos secadores son económicos y prácticos para su utilización en zonas rurales.

Con esta alternativa se pretende dar una solución al productor, que le permita obtener ingresos extras de su producción normal con una inversión de bajo costo y accesible a sus posibilidades. Además, se evitaría la contaminación que causa el jengibre de rechazo al ser botado en el campo. La implementación de esta tecnología híbrida se debe principalmente a las múltiples ventajas que esta presenta, es decir: No requiere una inversión inicial alta, no son difíciles de construir y operar, como es el caso de secadores convencionales, y los materiales para su construcción pueden ser adquiridos a nivel local. Además son capaces de secar en forma rápida y con contenidos finales de humedad adecuados.

Para la determinación y a la vez verificación de los datos de diseño del secador híbrido; se llevaron a efecto estudios de la cinética de secado del jengibre. Se analizó la influencia de la temperatura y la humedad del aire en el secado. Dichos experimentos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química (UNI). La evaluación del secador híbrido diseñado fué realizada por estudiantes suecas en la Universidad Nacional de Ingeniería y la zona de Nueva Guinea.

II. OBJETIVOS

2.1. GENERAL:

Diseñar y estimar los costos de un secador híbrido experimental para jengibre.

2.2. ESPECÍFICOS:

Determinar las curvas de característica de secado para jengibre.

Diseñar un secador híbrido experimental.

Estimar los costos de construcción del secador experimental y de producción del jengibre en el equipo.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 GENERALIDADES DE SECADO

El término secado se refiere a la eliminación de agua de los materiales de proceso y de otras sustancias. Se usa también con referencia a la eliminación de otros líquidos orgánicos, tales como benceno o disolventes orgánicos, de los materiales sólidos. Generalmente, en los procesos constituye la etapa final antes del empaque y permite que muchos materiales sean más adecuados para su manejo. Se utiliza también como técnica de preservación; debido a que los microorganismos que causan los cambios químicos en los alimentos y otros materiales biológicos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso. Otras ventajas son la preservación del sabor y valor nutritivo de los alimentos; así como su almacenamiento por largos períodos de tiempo (Treybal, 1988).

El método más común de secado es el convectivo, el cual consiste en exponer el material húmedo a una corriente de aire caliente y seco a una temperatura determinada. El secado puede ser acelerado por la velocidad, temperatura, humedad y dirección del aire de secado (Treybal, 1988).

Otro factor de importancia que afecta la velocidad de secado es el llamado encogimiento de la partícula. Generalmente este cambio ocurre cuando una pieza de tejido es secada en una corriente de aire. El encogimiento en las capas de la superficie pone las capas más profundas bajo compresión. Esto lleva al componente líquido del tejido a través de los poros, grietas y capilares hasta el flujo de masa exterior. Este movimiento depende de la proporción del flujo exterior y la habilidad del tejido de la pared celular para pasar o retener las sustancias disueltas que acompañan el líquido hacia afuera de la pieza. El encogimiento se da generalmente en alimentos fibrosos. Los cambios producidos por la deformación del volumen del material dependen de varios factores tales como: geometría de la muestra a secar, método de deshidratación y las condiciones de secado. Para reducir los efectos del encogimiento resulta aconsejable secar con aire húmedo (Góngora, 1988). La dureza es también un factor que afecta la velocidad de secado; ocurre cuando el secado se realiza a temperaturas muy altas lo que ocasiona que se forme en la superficie, una capa de celdillas contraídas que se adhieren unas a otras formando un sello. La formación de capas de dureza representan una barrera a la migración de humedad. Para evitar éste efecto el sólido se corta en rodajas muy delgadas con lo cual se considera despreciable (Sanchez, 1992).

3.2 CURVA CARACTERÍSTICAS DE SECADO

Van Meel sugirió que bajo cierto grupo de condiciones, un material húmedo puede presentar una curva de secado que le es característica y que es independiente de las condiciones externas del proceso de secado, la cual puede ser obtenida del comportamiento de una curva de velocidad de secado. Esa curva es denominada curva característica de secado (Meel, 1991).

El uso de este concepto es una forma simple de considerar el efecto del sólido independientemente del equipo y las condiciones del agente de secado, por lo que ha sido aplicado y extendido en los métodos de diseño de secadores discontinuos y continuos. Para determinar la curva característica es necesario que las muestras tengan igual contenido y humedad inicial, igual forma y tamaño (Sanchez, 1992).

En el diseño de secadores es fundamental conocer el tiempo de secado y las propiedades específicas del material. Para conocer estos parámetros es preciso determinar las curvas de velocidad de secado de forma experimental bajo condiciones constantes de temperatura y velocidad del aire. Para obtener dicha curva, se gráfica la velocidad de secado versus la humedad, a partir de los datos experimentales obtenidos. La velocidad de evaporación N_v , indica la transferencia de humedad que se da del sólido al medio y que es expresada como la cantidad de agua evaporada por unidad de superficie del sólido en una unidad de tiempo. El contenido de humedad de un sólido generalmente se expresa en base seca como kg de humedad por kg de sólido seco. La humedad del sólido se calculó a partir del peso del sólido húmedo a los distintos tiempos y el peso del sólido seco, por medio de la expresión:

$$X = \frac{W_t - W_s}{W_s} \quad 3.1$$

El secado de sólidos porosos es un proceso que involucra simultáneamente la transferencia de calor y masa, muchos de los modelos matemáticos de secado que emplean las ecuaciones de transferencia de calor y masa con condiciones iniciales y frontera adecuado, asumen el encogimiento como despreciable. En el caso de alimentos raramente el encogimiento es despreciable. Numerosos autores se han propuesto incorporar en los modelos de secado el efecto de ésta deformación. Moreira et al. (1998), realizaron un estudio para relacionar el encogimiento con el contenido de humedad de rodajas de manzanas considerando la geometría de las muestras, condiciones de secado y método de deshidratación. Para establecer la relación graficaron el cambio volumétrico contra el contenido de humedad de las muestras, encontrando una ecuación de $A_s = A_s(X)$ que describe el comportamiento de la deformación a lo largo del proceso de secado. La ecuación obtenida es válida solamente para las condiciones de secado a la cual fué determinada.

La ecuación de la velocidad de secado de un material, considerando el efecto del encogimiento viene dada por la expresión:

$$N_v = - \frac{W_s}{A_s(X)} \frac{dX}{dt} \quad 3.2$$

Siendo W_s la masa del sólido seco, dX/dt la variación del contenido de humedad promedio con respecto al tiempo y $A_s(X)$ el área de transferencia o de exposición con respecto a la humedad del sólido.

El análisis del secado de algunos materiales resulta complejo cuando se presenta el encogimiento en el material. Además de la variación de la humedad con respecto al tiempo también existirá la variación del área de exposición del sólido con respecto a la humedad. Por lo tanto, se hace necesario determinar de forma experimental una ecuación que describa el comportamiento del encogimiento a lo largo del proceso de secado.

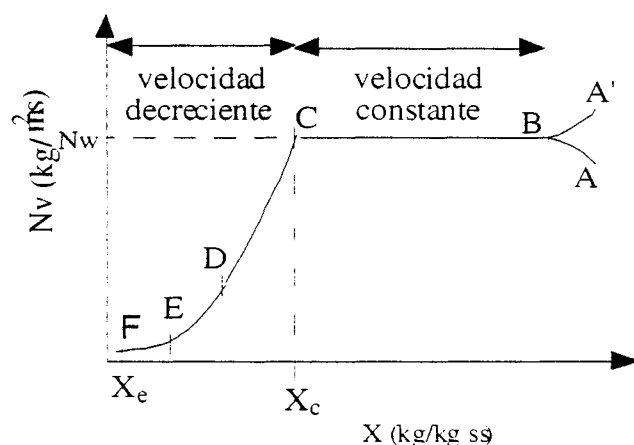


Figura 3.1. Curva de Velocidad de Secado.

Para analizar el mecanismo de secado de un sólido es necesario conocer el comportamiento de la velocidad de secado y los periodos en los cuales se produce el secado del sólido. La Figura 3.1 muestra la curva de velocidad de secado de un material higroscópico, para condiciones constantes. Empezando con un tiempo cero, el proceso se inicia con un lapso de calentamiento o enfriamiento que corresponde a la porción A-B y A'-B. Seguidamente la sección BC representa el periodo de velocidad constante N_w , donde la operación se desarrolla por difusión del vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa de aire estancado hasta el medio que lo rodea, lo cual constituye la etapa controlante. Cuando el contenido de humedad en el material decrece por debajo del valor crítico X_c , el movimiento de la humedad de la fase líquida en el material es debido principalmente a una fuerza capilar. La sección CD corresponde al primer periodo decreciente, el contenido de humedad en la superficie decrece significativamente.

La etapa continua hasta que la película de líquido en la superficie es totalmente evaporada. La cuarta etapa del secado lo constituye la sección DE, es un período de penetración a un frente bastante seco. La etapa controlante es la difusión de la humedad dentro del sólido como resultado de los gradientes de concentración entre las partes profundas y la superficie. En algunos casos no existe discontinuidad definida entre los dos períodos de velocidad decreciente, y el cambio de condiciones de secado de una superficie con humedad parcial a una completamente seca, es tan gradual que no se detecta punto de inflexión. El último período de secado corresponde a la sección EF se caracteriza por un rápido incremento de la temperatura del material, la cual tiende hacia la temperatura del gas de secado. En esta etapa se alcanza el equilibrio a un valor de humedad constante X_e (Geankoplis, 1982). El equilibrio de secado nos permite la elección de un agente de secado y las condiciones de almacenamiento del producto (Sanchez, 1992).

El contenido característico de humedad (Φ) y la velocidad característica de secado (f) son determinados como sigue:

Para cuerpos higroscópicos (alimentos, madera, textiles, arcilla):

$$\Phi = \frac{X - X_e}{X_c - X_e} \quad 3.3$$

La velocidad característica de secado viene dada por:

$$f = \frac{N_v}{N_w} \quad 3.4$$

El valor de la humedad crítica X_c , depende del material y de las condiciones del secado. En el caso de materiales que presentan únicamente el período de velocidad decreciente, el valor de la velocidad de secado máxima N_w , se considera como el punto máximo de la curva.

Al graficar f contra Φ a diferentes temperaturas se obtiene una curva única que se denomina curva característica de secado. Con esta curva es posible determinar el tiempo para secar entre niveles específicos de humedad para condiciones dadas de secado.

A partir de un despeje de la ecuación 3.2, es posible determinar una expresión para determinar el tiempo de secado.

$$t = W_s \int_{X_e}^{X_0} \frac{dX}{A_s(X) N_v} \quad 3.5$$

Donde X_0 es la humedad inicial del material y X es la humedad hasta la cual se desea secar el material.

3.3 PROCESO DE SECADO EN LA CARTA PSICROMÉTRICA

La Figura 3.2 representa el proceso de secado en la carta psicrométrica. Durante el proceso, la evaporación del agua es provocada por el aire caliente que se pone en contacto con el producto húmedo. La línea AB muestra el calentamiento del aire húmedo sin la adición o remoción de agua. La temperatura inicial del aire (T_A) aumenta progresivamente hasta la temperatura (T_B), con la disminución de la humedad relativa. En esta etapa la humedad absoluta del aire Y_B , permanece constante. La línea BC muestra el enfriamiento que experimenta el aire, al darse el proceso de evaporación en el sólido. En esta etapa la temperatura del aire disminuye desde la temperatura T_B hasta la temperatura de salida del aire T_C ; la humedad relativa aumenta y la entalpía permanece constante. La humedad de salida del aire es Y_C . El punto D muestra las condiciones de equilibrio del aire, cuando se encuentra saturado con una humedad de equilibrio Y_D (Mujumdar, 1987).

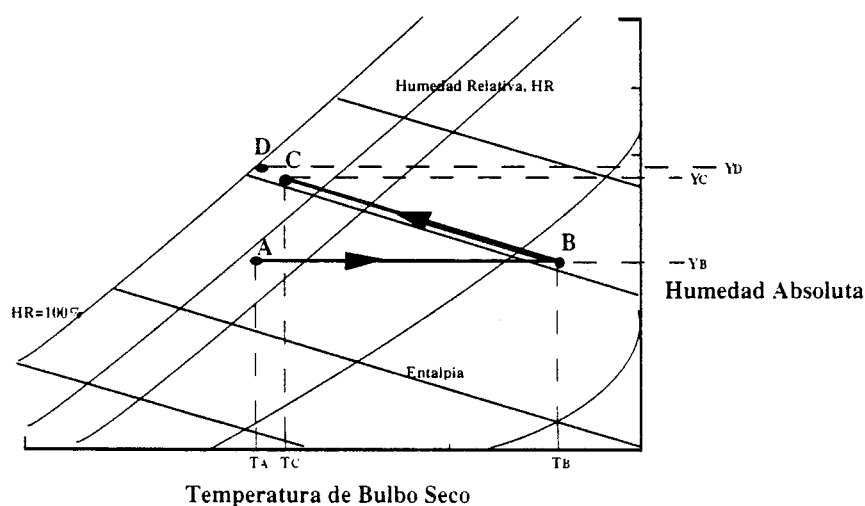


Figura 3.2. Esquema del Proceso de Secado en la Carta Psicrométrica.

3.4 SECADO DE JENGIBRE

La humedad del jengibre fresco es aproximadamente 90% en peso. Esta tiende a disminuir según el grado de deshidratación natural al cual se ha sometido el rizoma (Cipres, 1995). Los rizomas frescos deben secarse hasta lograr un contenido de humedad final de 6 a 10%. Contenidos de humedad superiores al 12% pueden causar problemas de moho y descomposición durante el almacenamiento. El jengibre fresco pierde del 75-90% de su peso original durante el proceso de secado (UNCTD/GATT, 1993).

El secado de jengibre puede llevarse a cabo de dos formas: por exposición al sol o artificialmente. La primera debe realizarse en los meses de verano, cuando la temperatura del aire se encuentra entre 24 y 28°C, a una humedad relativa de 20 a 30%. Las muestras de jengibre son cargadas en bandejas de malla y expuestas directamente al sol por varios días (aproximadamente dos semanas) hasta llegar a obtener una humedad de 12%. El rizoma puede ser colocado entero o en rodajas (Mathew,1973). Sin embargo el secado al sol presenta muchas limitaciones para efectuar el secado de grandes volúmenes de producción. Algunas de estas limitaciones son los altos costos de mano de obra, extensas áreas requeridas, carencia de un control del secado, degradación del producto y afectaciones de enfermedades. También se ve afectado cuando el clima es muy húmedo o hay largos períodos de lluvia.

El secado artificial de jengibre se lleva a cabo en secadores de bandejas. Estudios de laboratorio han sido realizados en un rango de temperatura de 50-80°C, usando diferentes tipos de secadores tales como tiro cruzado y flujo directo, llegándose a establecer la temperatura óptima de secado de jengibre en 60°C. El jengibre seco es una materia prima para saborizantes, la textura del producto seco no es una característica significativa de la calidad. Más importantes son las concentraciones de oleoresina, responsable del sabor picante y de aceite volátil, el cual da el olor característico a limón (Leverington, 1975). Govindajaran (1982). sugiere que la temperatura del jengibre no debe sobrepasar los 55°C porque de lo contrario se afecta la calidad del producto seco. Se obtiene máxima retención de aceite volátil al secar a las temperaturas menores del rango señalado, y por cortos períodos de secado. El tiempo de secado tiene una larga variación, desde 6 hasta 12 horas, dependiendo del secador.

El proceso de secado de jengibre es influenciado por diversos factores como son la humedad, temperatura y velocidad del aire de secado. Estas variables deben ser controladas dándole un seguimiento durante el secado para garantizar que el producto obtenido no sufra daños durante el procesamiento que puedan afectar su calidad.

Estudios de laboratorio e industriales, sugieren realizar el secado cortando mecánicamente los rizomas en rodajas elípticas de 3-5mm de espesor; lo que asegura un rápido secado y las pérdidas por volatilidad son mínimas. El rizoma es cortado con cáscara; debido que al darse el proceso de pelado se producen pérdidas de los componentes volátiles del aroma, ya que éstos se encuentran en las celdas del rizoma principalmente localizadas bajo los tejidos epidérmicos (Govindajaran,1982).

Govindajaran (1982). sugiere que el secado de las rodajas de jengibre se realice en bandejas planas que tengan un ángulo de inclinación de 30° dentro de la cámara de secado: con el fin de aumentar la transferencia de masa. La profundidad de las bandejas debe ser aproximadamente proporcional al espesor de las rodajas.

3.5 SECADOR HÍBRIDO

La tecnología híbrida es intermedia entre el secado convencional y el secado al sol. Se denomina así porque se hace uso de una combinación de fuentes de energía de las ya conocidas como: energía solar, eléctrica, combustión de derivados del petróleo o leña u otros materiales orgánicos. Su aplicación ha sido realizada en secadores de tipo bandeja. Estos constan de una fuente de calor principal y de una fuente de calor auxiliar. Con esta tecnología es posible lograr un secado eficiente y además un producto seco de alta calidad, con contenidos de humedad adecuados.

ICAITI (1986), establece de forma general las partes que componen un secador híbrido:

- Colector solar (Fuente de calor principal).
- Cámara de combustión o de resistencias (Fuente de calor auxiliar).
- Cámara de secado.

En la región Centroamericana, se tiene el conocimiento de la aplicación de esta tecnología por el ICAITI en secadores de bandeja utilizados para el secado de cacao, aunque estos también presentan la versatilidad de secar banano. ICAITI (1986), construyó un secador que consta de un colector solar, cámara de combustión de leña y cámara de secado. La cámara de combustión se encuentra localizada en la parte inferior de la cámara de secado; consta de un horno conectado a un tubo de hierro (intercambiador de calor de tubo), distribuido en forma de espiral en el fondo de la cámara de secado. Los gases de combustión producidos en el horno son pasados al tubo y luego expulsados a la atmósfera a través de una chimenea. El aire ambiente es calentado primeramente con el colector solar, y luego al ser introducido en la cámara de secado, con el calor recibido del tubo de hierro al darse la transferencia de calor. Stehli (1990), desarrolló un secador híbrido que consta de un colector solar, cámara de combustión de gas propano y cámara de secado. La cámara de combustión se encuentra localizada a continuación del colector solar; consta de un horno conectado a un tubo de acero (intercambiador de calor de tubo), distribuido en forma de espiral en una recámara conectada al colector solar. Los gases de combustión producidos en el horno son pasados al tubo y luego expulsados a la atmósfera a través de una chimenea. El aire ambiente es calentado primeramente con el colector solar, luego es pasado a la recámara donde incrementa su temperatura al darse la transferencia de calor con el tubo y posteriormente introducido en la cámara de secado.

Muchas variantes pueden presentar los secadores híbridos en cada uno de sus componentes de acuerdo a la utilidad que se quiera dar el equipo, materiales de construcción utilizados y diseños propios de cada modelo. Dentro de las posibles variantes a estos equipos se encuentran: el movimiento del aire dentro del colector puede ser inducido o por convección natural, modelo del colector solar, tipo de fuente auxiliar (derivados del petróleo, biomasa o energía eléctrica) y utilización de aire seco o húmedo.

3.6 COLECTOR SOLAR.

3.6.1 GENERALIDADES

Un colector solar es un dispositivo en forma de una caja que transforma la radiaciones solares en radiaciones caloríficas; transfiriéndolas de forma convectiva a un flujo de aire determinado. Un colector solar consta de tres partes fundamentales que son la cubierta, placa de absorción y la coraza, a como lo muestra la Figura 3.3.

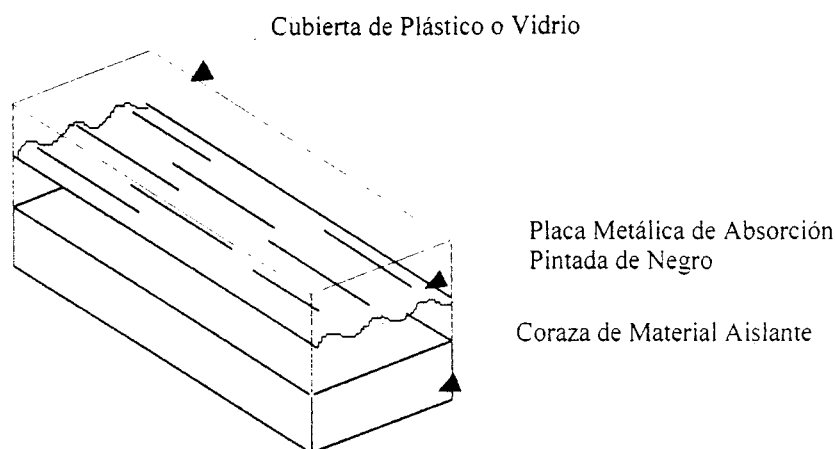


Figura 3.3. Partes Fundamentales del Colector Solar.

Según literatura un 30% de la energía solar incidente no se logra aprovechar, producto de las pérdidas por radiación ocasionadas en la cubierta. El producto transmitancia- absorbancia determina la cantidad de energía solar incidente aprovechada por el colector solar para ser transformada en energía útil que caliente el aire. Otro porcentaje de pérdidas que se dan en el colector, lo representan las pérdidas por transferencia de calor de la coraza con los alrededores, siendo aproximadamente de un 10% en dependencia del material que se construya la coraza (Mujumdar, 1987).

3.6.1.1 Cubierta

La función de la cubierta es formar un ambiente cerrado del cual no salga el aire calentado, pero que permita la transmisividad de las radiaciones solares hacia el absorbedor. La elección del material de la cubierta depende de muchos factores relacionados con las propiedades del material y el costo, a como se muestra en la Tabla 3.1. Los materiales utilizados para la construcción de la cubierta generalmente son el vidrio y plástico transparente. De estos materiales, el vidrio presenta las mejores cualidades para construir la cubierta del colector, debido a la alta transmitancia a los rayos solares y menor precio. El espesor recomendado para la cubierta del colector es de 3 a 5×10^{-3} m. Para realizar la selección del espesor del material se deben de tomar en cuenta las siguientes consideraciones: a mayor grosor se reduce la transmitancia de los rayos solares a la placa de absorción, se

reducen las pérdidas de calor en la cubierta y se incrementan los costos del material empleado. Existen algunos modelos de colectores solares que emplean dos cubiertas, con una separación de 2×10^{-2} m entre sí. La ventaja de colocar dos cubiertas se debe fundamentalmente al incremento del aislamiento y la disminución de las pérdidas por reflexión. Cuando se colocan dos cubiertas, es recomendable emplear un espesor de la cubierta de 3×10^{-3} m; en el caso de usar solamente una cubierta se debe emplear un grosor de 5×10^{-3} m. Scalin et al. (1999), concluyen que una cubierta basta, debido a que la diferencia de temperatura entre un colector que emplea dos cubierta y otro que emplea únicamente una es de 4°C .

Material	Ventajas	Desventajas	Costos
Vidrio	Resistencia al clima Alta transmitancia Pocas pérdidas de calor Disponibilidad local Bajo costo	Pesado Frágil	C\$ 13 [3mm]/ m ² C\$ 20 [5mm]/ m ²
Plástico	Resistencia al clima Liviano Fácil de instalar Disponibilidad local	Baja transmitancia Poco aislante	\$ 98 [3mm]/ m ² \$ 150 [5mm]/ m ²

Tabla 3.1. Comparación de los materiales utilizados para la construcción de la cubierta.

La Figura 3.4 muestra la trayectoria seguida por la radiación incidente sobre un colector solar. Una parte de la radiación incidente que capta un colector solar es reflejada por la cubierta hacia el ambiente, otra parte es absorbida por ésta y otra parte es transmitida a la placa de absorción. En el caso de tener dos cubiertas se tiene la ventaja de que los rayos solares reflejados por la placa de absorción son retenidos por la segunda cubierta. Una parte de éstos rayos son reflejados nuevamente a la placa de absorción, otra parte es absorbida por las cubiertas, otra parte de los rayos son reflejados a la atmósfera.

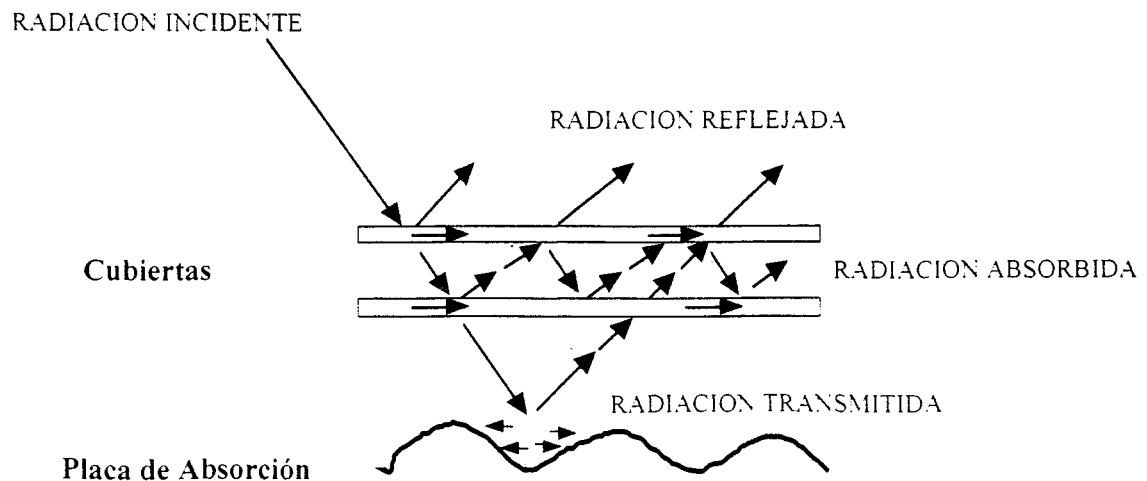


Figura 3.4. Trayectoria de la radiación incidente sobre un colector solar.

3.6.1.2 Placa de Absorción

La placa de absorción, consiste en una superficie de metal pintada de negro en la cara superior, que absorbe la energía solar incidente y la cede en forma de radiaciones caloríficas al aire circundante (ICAITI,1986). La placa de absorción puede ser plana u ondulada. Las placas planas presentan una alta pérdida por reflexión y una deficiente transferencia de calor. Las onduladas presentan baja pérdida por reflexión y una buena transferencia de calor. Komp (referencia personal), sugiere utilizar láminas onduladas de cinc viejo (deformes y con orificios), debido a que reducen los costos y aumentan la transferencia de calor. Las ondulaciones reducen la cantidad de irradiación incidente en la placa de absorción que se pierde por reflexión, debido a que los rayos quedan rebotando en las ondulaciones (Figura 3.4). La placa de absorción es pintada de color negro con el propósito que ésta actúe como un cuerpo negro; es decir que tenga la propiedad de absorber toda la energía que incida sobre él (Welty, 1992).

Para realizar la selección del material de la placa de absorción es necesario que posean las características que se presentan en la Tabla 3.2. Las láminas cinc presentan las mejores características para construir la placa de absorción.

Material	Conductividad térmica (W/ s-m°C)	Características
Cobre	385.9238	Costo alto Buen conductor
Aluminio	228.4392	Costo alto Buen conductor
Cinc	112.489	Costo bajo Buen conductor Disponibilidad local

Tabla 3.2. Comparación de los materiales utilizados para la construcción de la placa de absorción.

La disposición de la placa de absorción dentro del colector puede ser al fondo o al centro, a como se muestra en la Figura 3.5. Con la disposición al fondo (Figura 3.5.a) se producen muchas pérdidas de calor por el fondo del colector. En cambio con la disposición al centro del colector (Figura 3.5.b) se reducen las pérdidas de calor, haciendo pasar una corriente de aire por el fondo que arrastra el calor que la placa de absorción emana por el fondo; con lo que se aumenta la eficiencia del colector.

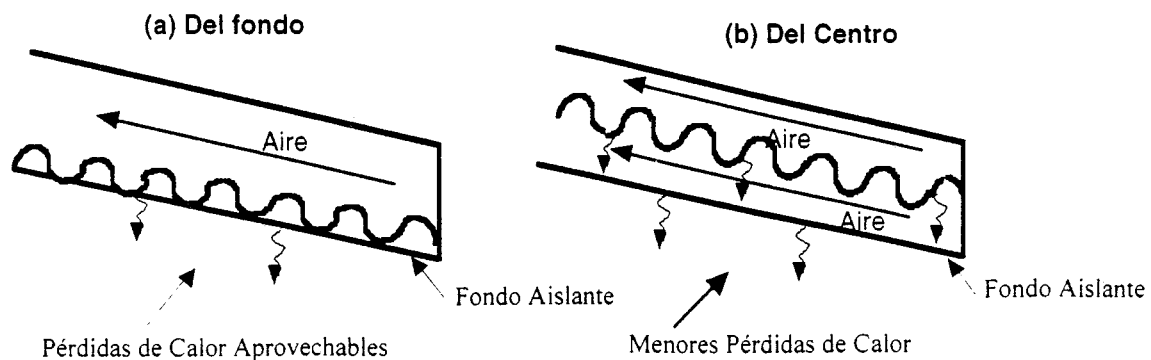


Figura 3.5 Disposición de la placa de absorción en el colector solar.

3.6.1.3 Coraza

El último elemento es la coraza cuya función es formar junto con la cubierta un ambiente aislado térmicamente, para evitar las pérdidas de calor al ambiente. Otra función de la coraza es de servir como soporte a la cubierta y a la placa de absorción. La coraza se construye generalmente de madera sólida, pycem, materiales refractarios (ladrillo de barro), plywood y cualquier otro material que sirva como aislante (Manrique, 1984). Los materiales refractarios se emplean para construir colectores estacionarios, es decir no pueden ser transportados. El pycem presenta las mejores características para construir la coraza del colector, porque es resistente al ambiente y tiene una buena acción aislante.

3.6.2 CLASIFICACION DE LOS COLECTORES SOLARES

Los colectores solares básicamente se clasifican en dos categorías que son los colectores con un absorbedor no poroso y los colectores con un absorbedor poroso. En el primer tipo la corriente de aire fluye por encima del absorbedor. En algunos casos como anteriormente se señaló, la corriente de aire fluye por arriba y debajo del absorbedor. En el segundo tipo el aire fluye a través de un lecho de materiales porosos.

3.6.2.1 Colector no Poroso

Son el tipo más simple de colectores: consiste de una placa metálica pintada en la parte de arriba. Algunos modelos están compuestos de dos placas de absorción, distribuidas una arriba y la otra abajo formando ductos dentro del colector por donde circula el aire. La primera está pintada de negro para captar la irradiación solar, y la otra no está pintada. La corriente de aire que penetra al colector, absorbe calor al pasar por cada una de las placas. Cada ducto constituye un paso por donde atraviesa el aire. La principal desventaja en los colectores no porosos son las grandes pérdidas al ambiente debido a la convección y la radiación. Las pérdidas por convección se reducen colocando más cubiertas sobre el absorbedor. Otra

desventaja es la baja transferencia de calor entre el aire y la placa de absorción, lo cual se puede solucionar utilizando placa metálica corrugadas para la construcción del absorbedor.

3.6.2.2 Colector Poroso

Los modelos más simples están constituidos por un lecho de algún material poroso (por ejemplo piedra volcánica), a través del cual el aire circula absorbiendo el calor contenido en estos. La principal desventaja que se presenta es la alta caída de presión a consecuencia del lecho de material, lo cual demanda la existencia de un ventilador de mayor potencia. Existen otros tipos de modelos que emplean mallas metálicas (Cobre o aluminio), pintadas de negro colocadas de forma diagonal dentro del canal del colector por donde pasa el flujo de aire. La ventaja de éste modelo es que evita la caída de presión en el colector, bajo costo y mejora la eficiencia del colector solar (Mujumdar 1987).

3.6.3 DISEÑO DE LOS COLECTORES SOLARES

3.6.3.1 Orientación e Inclinación del colector

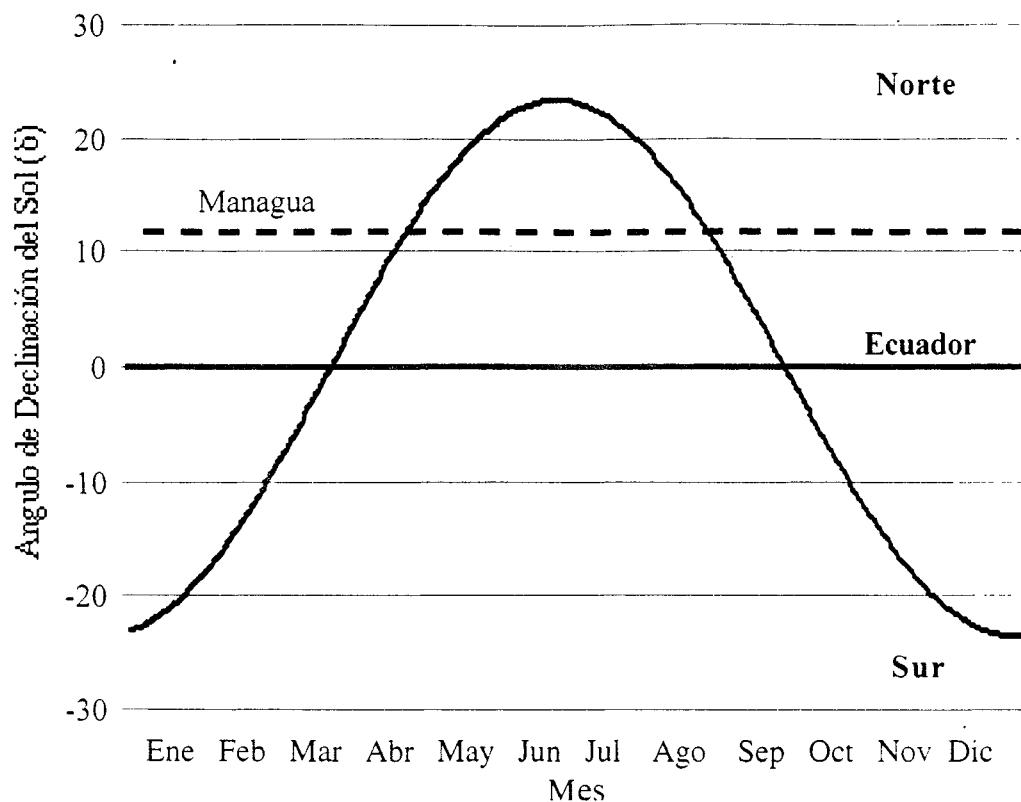
Los parámetros de importancia para el diseño de los colectores solares son la orientación, inclinación, tamaño y eficiencia. Durante el año, al girar la tierra alrededor del sol, el ángulo de inclinación del planeta varía y por tanto varía el ángulo de la incidencia de los rayos solares sobre los diversos lugares sobre la tierra. La orientación del colector depende de la posición geográfica del lugar donde se va a instalar con relación a la línea del ecuador.

Los rayos solares inciden más perpendicularmente sobre las regiones ecuatoriales. La incidencia de los rayos solares varía de acuerdo con la hora del día, puesto que la rotación de la tierra hace levantar al sol por la mañana y descender por la tarde. La oblicuidad de los rayos solares varía con la época o estación del año, a causa del movimiento de la tierra alrededor del sol. El sol se desplaza entre los trópicos de Cáncer y Capricornio, cruzando dos veces al año el Ecuador. Nicaragua está situado entre el ecuador y el trópico de Cáncer, en el Hemisferio Norte, precisamente entre los 11° y los 15° de latitud (Incer, 1995).

La declinación es un índice de alejamiento que experimenta el sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador. Manrique (1984), emplea la ecuación 3.6 para el cálculo del ángulo de declinación del sol a lo largo del año:

$$\delta = 23.45 * \sin \left[360 * \frac{(284 + n)}{365} \right] \quad 3.6$$

donde δ es la declinación del sol y n es el día del año.



3.6. Variación de la declinación solar a través del año.

Con ayuda de la ecuación 3.6 se construye la Figura 3.4, la cual muestra la declinación del sol a través del año para cualquier punto en la tierra. Debido a la proximidad de Nicaragua con la línea del ecuador, el sol culmina en el cenit dos veces al año, incidiendo en un ángulo de 90° al mediodía (Incer, 1995). Con el propósito de brindar un análisis específico del recorrido del sol en el lugar donde se instalará el colector, se refleja la localización de la ciudad de Managua, cuya latitud es de 12° norte. La gráfica destaca la orientación que se debe dar al colector durante el año con respecto al recorrido del sol desde el trópico de capricornio hasta el trópico de cáncer. Así tenemos que la orientación del colector instalado en la ciudad de Managua, en los meses comprendidos entre el final de Agosto y mediados de Abril es en dirección al sur verdadero y la orientación en los meses comprendidos entre mediados de Abril y Agosto es en dirección al norte. Es importante destacar además que en el periodo comprendido entre los meses de Abril y Mayo, en que la declinación del sol se aproxima a la latitud de Managua es cuando se registra la mayor cantidad de insolación, debido a que el sol

se encuentra en el cénit, por lo que los rayos inciden con más perpendicularidad sobre Managua.

La inclinación del colector, permite captar de forma más eficiente los rayos solares incidente sobre la superficie del colector. Doña y Canales (1992), sugieren que para las zonas de 0° a 20° de latitud norte, el ángulo de inclinación oscila entre 5° y 7° adicional a la latitud del lugar. La inclinación del colector para Managua es de 17° a 19°.

3.6.3.2 Area y eficiencia del colector solar

El área del colector depende de la cantidad de calor que se desee generar con éste. La eficiencia del colector esta en dependencia de la cantidad de energía incidente que el colector capta y las pérdidas de calor que se producen en éste.

En el diseño colectores es importante conocer la cantidad de energía incidente aprovechada por el colector; para lo cual es necesario conocer el grado de transmitancia de la cubierta y de absorbancia de la placa de absorción. La transmitancia se define como la fracción de energía incidente en una superficie que se transmite a través del cuerpo con poco cambio de su naturaleza. La absorbancia se define como la fracción de energía incidente en una superficie que se absorbe (Welty, 1992). En la Tabla E-5 se puede leer el valor del producto transmitancia- absorbancia ($\tau\alpha$) para una cubierta colocada en el colector, siendo éste de 0.88.

-Balance de masa en la rodaja de jengibre

Planteando un balance de masa total en una rodaja de jengibre, se obtiene:

$$W = WX_o + WX_f \quad 3.7$$

O bien

$$W = W_w + W_s \quad 3.8$$

Siendo

$$W_w = WX_o \quad 3.9$$

Donde:

W : es la masa de jengibre jengibre húmedo en kg.

X_o : es la humedad inicial del jengibre en kg de humedad/ kg de ss.

X_f : es la humedad final del jengibre en kg de humedad/ kg de ss.

W_w = es la masa de agua contenida en jengibre en kg.

W_s = es la masa de jengibre seco en kg.

-Balance de Energía en el Colector Solar.

Manrique (1984), empleó la ecuación 3.10. para el balance de energía en el colector. Indica que la cantidad total de energía incidente en el colector es igual a la cantidad de calor útil que es transportado hacia el fluido de trabajo Q_u y la cantidad de calor que se pierde del colector producto de la conducción, convección y re-radiación. Q_p :

$$H_T A_c (\tau\alpha) = Q_u + Q_p \quad 3.10$$

Donde:

H_T : es la irradiación solar en kW/m^2 .

A_c : es el área del colector solar en m^2 .

$(\tau\alpha)$: es el producto transmitancia- absortancia.

Q_u : es el calor útil generado por el colector en kW.

Q_p : es el calor perdido en el colector en kW.

Considerando que la energía requerida para evaporar la humedad contenida en el jengibre es igual a la energía suministrada por el aire caliente que se entra en contacto con el jengibre. se plantea:

$$\dot{m}_a C_{p_a} (T_f - T_o) = \dot{m}_u \lambda \quad 3.11$$

Despejando el flujo másico de aire de la ecuacion 3.11. se obtiene:

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{m}_u \lambda}{C_{p_a} (T_f - T_o)} \quad 3.12$$

La ecuación 3.13. calcula el calor útil generado por el colector:

$$Q_u = \dot{m}_a C_{p_a} (T_f - T_o) \quad 3.13$$

Donde:

\dot{m}_a : es el flujo másico de aire en el colector en kg/s .

C_{p_a} : es la capacidad calorífica del aire en $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$.

T_f : es la temperatura de salida del colector solar en $^\circ\text{C}$.

T_o : es la temperatura ambiente o de entrada al colector en $^\circ\text{C}$.

La eficiencia del colector se define como la fracción de la radiación solar incidente sobre su superficie que puede ser aprovechada como calor útil. Manrique (1984), empleó la ecuación 3.14 para el cálculo de la eficiencia.

$$\eta = \frac{Q_u}{H_T A_c} \quad 3.14$$

Se ha reportado que la eficiencia de los colectores solares varían entre el 64-84 % y que el tiempo de secado en curso es casi el 58 % menor que el tiempo requerido por el secado tradicional al sol (Mujumdar, 1987).

Doña y Canales (1992), emplearon para el cálculo del área teórica del colector un balance de energía entre el colector solar y la primera bandeja del secador que se pone en contacto con el aire de secado.

$$H_T A_c \eta t = W_w \lambda \quad 3.15$$

Donde:

η : es la eficiencia teórica del colector solar.

t_{sec} : es el tiempo de secado en horas (h).

W_w : es la cantidad de agua evaporada en kg.

λ : es el calor de vaporización en kJ/kg.

t : es el tiempo de secado en h.

A partir de un despeje de la ecuación 3.15, se obtiene el área teórica del colector.

$$A_c = \frac{W_w \lambda}{H_T \eta t} \quad 3.16$$

3.7 CÁMARA DE RESISTENCIA Y CÁMARA DE SECADO.

La cámara de resistencias se instala generalmente a continuación del colector solar. Está compuesta por la coraza y las resistencias conectadas a un controlador. La coraza es construida de lámina de metal (acero o hierro), en forma rectangular y constituye el cuerpo de la cámara. Las resistencias pueden ser en forma de espiral, cuya capacidad estará en dependencia de la cantidad de calor a suministrar. Es conveniente aislar la cámara para evitar pérdidas de calor.

La cámara de secado es una caseta en forma rectangular; en su interior se encuentran las bandejas que contienen el producto a secar. Las paredes son generalmente construidas de materiales como: madera, ladrillo común, bloque, pycem. En general la elección del material a utilizarse en las paredes, depende de la disponibilidad económica del propietario, la existencia local de materiales y la habilidad de actuar como aislante. La superficie de la pared debe ser lisa para mejor circulación de aire. Es conveniente sellar con silicona las uniones entre las paredes de la cámara. Para ayudar al aislamiento térmico, se forran las paredes con fibra de vidrio (ICAITI, 1986).

Las bandejas se encuentran soportadas por rieles de hierro; los que permiten que se puedan meter y sacar del secador con facilidad. Las bandejas cubren gran parte del espacio disponible dentro de la cámara de secado. Sólo se dejan las separaciones entre cada una de ellas, para permitir la libre circulación del aire (Govindajaran,1982). Doña y Canales (1992) emplearon bandejas de 1 m de ancho y 0.5 m de fondo; es decir de 1 m² de área transversal. Las bandejas están hechas en su totalidad de cedazo o malla de bajo calibre. Diversos modelos de secadores de cabina desarrollados por Stehli (1990), Ezeike (1986) y Doña y Canales (1992) emplean una distancia de separación entre bandejas en un rango entre 0.20 m y 0.30 m. Estudios especializados acerca de la disposición de una placa plana con un ángulo de inclinación respecto a la corriente de aire, han sido realizados con el fin de analizar el comportamiento del coeficiente de transferencia de masa. Se encontró que al disminuir el ángulo de inclinación de la placa, en el lado vuelto hacia la corriente de aire el coeficiente de transferencia de masa aumenta y alcanza su máximo valor cuando el ángulo de inclinación es 90°; por el contrario cuando se aumenta el ángulo de inclinación, en el lado opuesto de la placa el aumento del coeficiente de transferencia de masa es mucho más rápido para ángulos menores a 70°. El estudio concluye que al inclinar la placa en un ángulo de inclinación aproximado a 70°, se logra alcanzar un aumento proporcional del coeficiente de transferencia de masa en ambas caras (Kneule, 1966).

La cámara además contiene ventiladores cuya función principal es la de hacer circular el aire caliente, y a la vez expulsar el aire húmedo al ambiente. El tamaño de éstos depende del volumen de aire que circula dentro del secador. Un sustituto de los ventiladores son los extractores de aire los cuales tienen forma circular y van acoplados en el techo del secador. El extractor posee una serie de hendiduras las que permiten la extracción del aire contenido en la cámara de secado, al girar éste por efecto de la velocidad del viento. Generalmente son contruidos de hojas de latón (ICAITI,1986).

El diseño de los secadores de bandeja es simple y de bajo costo. Este es recomendado para el secado de pequeñas cantidades de productos (10-20 kg). Los productos secados en estos equipos son productos agrícolas. Generalmente son empleadas en países tropicales. Usualmente tienen un tamaño de área de secado de 1-2 m² (Mujumdar, 1987).

IV. MATERIAL Y MÉTODO

La parte experimental está constituida de dos tipos de experimentos; uno en que se requería determinar la relación área – volumen - humedad y otro la determinación de la curva característica de secado del jengibre.

4.1. MATERIAL

4.1.1. PREPARACIÓN DEL JENGIBRE

Para la realización de los experimentos se requería de jengibre de rechazo, pero como no se pudo obtener se utilizó jengibre de exportación de la variedad Jamaica, adquirido a través de CIPRES (Centro de Investigación y Promoción) y cultivado en la zona de San Carlos. Con ayuda de un procesador de alimento se cortó el jengibre fresco en rodajas de $3 \text{ a } 5 \times 10^{-3} \text{ m}$ de espesor; con el fin de obtener un mayor contacto con el medio de calentamiento y reducir la distancia de recorrido de la humedad a la superficie. En los experimentos para la determinación de la relación área – volumen - humedad, el jengibre se cortó tanto de forma longitudinal como transversal y en los experimentos para la determinación de la curva característica de secado, se cortó únicamente de forma transversal. Las rodajas fueron humedecidas por un lapso de 2 días con el objetivo de saturarlas con agua. Posteriormente las rodajas se cortaron en rectángulos de aproximadamente de $4 \text{ y } 3 \times 10^{-2} \text{ m}$ de largo y ancho, respectivamente. Según sugiere Jarquín (1996), los laterales de la rodaja rectangular se cubrieron con pintura de esmalte antes de cada experimento; para obtener transporte de humedad sólo en ambas caras de la rodaja.

4.1.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RELACION AREA – VOLUMEN - HUMEDAD.

Para llevar a cabo la determinación, primeramente se colocó a las muestras un alambre en forma de garfio en uno de sus extremos. Posteriormente se colocaron en un soporte de cedazo, a como se muestra en la Figura 4.1. Para realizar el experimento de encogimiento las muestras colocadas en el soporte de cedazo, eran secadas en un horno Fisher Scientific de precisión $\pm 1^\circ\text{C}$.

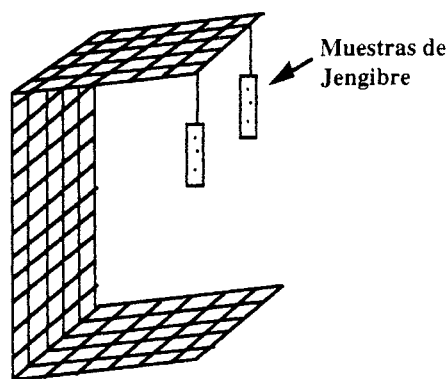


Figura. 4.1 Portamuestra

4.1.3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CURVA CARACTERISTICA DE SECADO.

Los experimentos para la determinación de las curva característica de secado se realizaron en el secador de túnel mostrado en la Figura 4.2, el cual también fué empleado por Góngora (1988), Sánchez (1992), Jarquín (1996) y Cubillo (1998). Para llevar a cabo la determinación se procedió a registrar la pérdidas de peso en función del tiempo, provocada por la evaporación de la humedad contenida en una muestra en contacto con una corriente de aire caliente bajo condiciones de temperatura y velocidad constantes.

Se realizaron dos tipos de experimentos, uno con aire seco y el otro con aire húmedo. Para obtener el aire seco se tomó aire del laboratorio con ayuda de un ventilador (B), haciendolo pasar por una válvula (V1) y luego por una torre de deshumidificación (TD), que contenía un lecho de sílica gel; con el propósito de eliminar la humedad del aire antes de entrar en contacto con la muestra. En cambio el aire húmedo se tomó del ambiente exterior, sin hacerse pasar por la torre de deshumidificación.

En ambos tipos de aire, la temperatura fue aumentada con ayuda de un sistema de calentamiento de diversas resistencias eléctricas (R), conectadas a reguladores de potencia (RP) los cuales a su vez estaban conectados a un controlador electrónico (CE). La muestra se colocó dentro de una cámara de secado (CS), ensartada a un alambre vertical y unido a una base circular que descansaba sobre la balanza analítica (BA) de precisión 0.1×10^{-6} kg colocada debajo del túnel; a como se muestra en la Figura 4.3. La balanza analítica estaba conectada a una computadora (CO), que almacenaba los datos de tiempo y peso del sólido a lo largo del experimento. Se emplearon termocuplas (T), para medir la temperatura del aire antes y después de su contacto con el sólido. Además se registró la temperatura del sólido. La computadora contaba con el programa WorkBench de medición y registro de datos. El aire agotado fue retirado del laboratorio por medio de una tubería conectada a un extractor de aire.

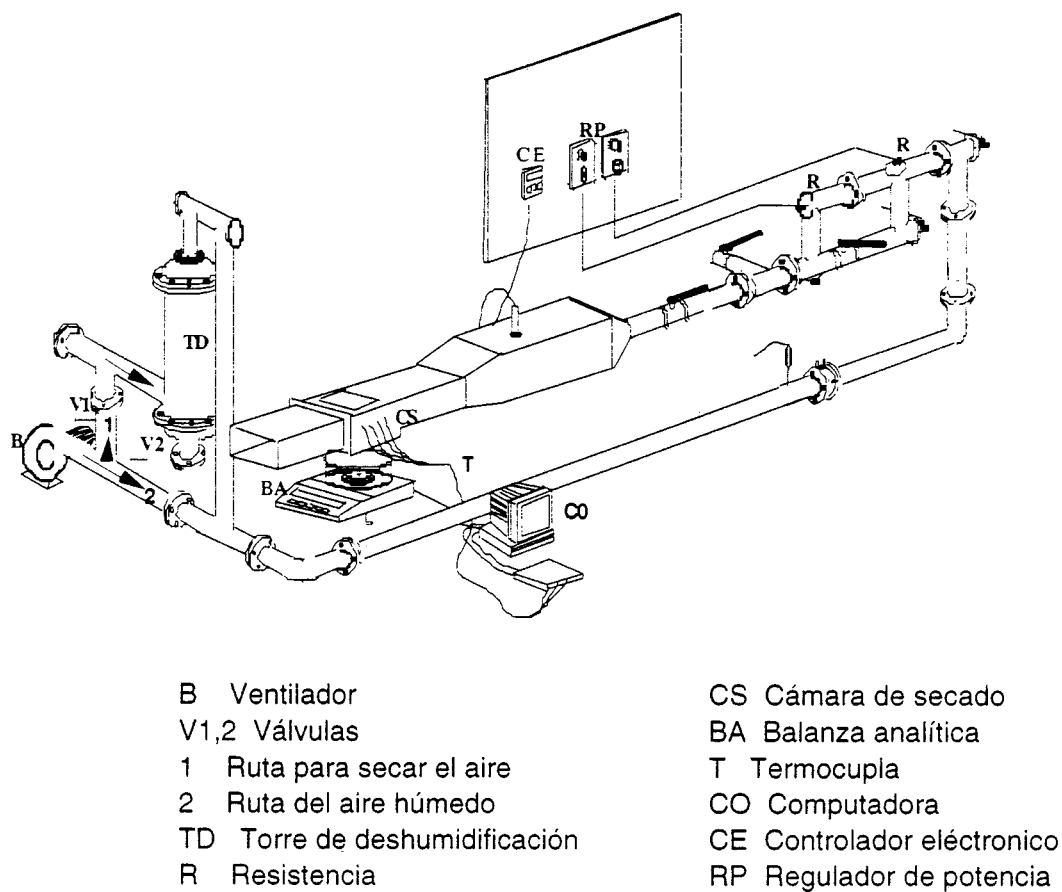


Figura. 4.2 Secador de túnel.

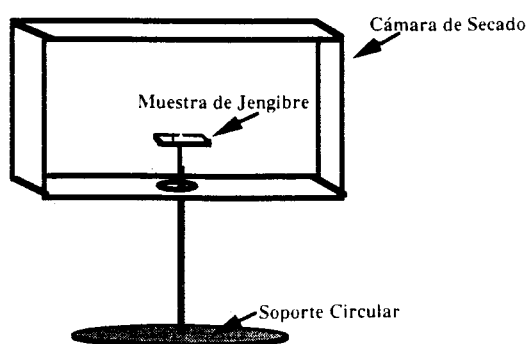


Figura. 4.3 Disposición de la muestra de jengibre en la cámara de secado

4.2. MÉTODO

4.2.1. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÁREA – VOLUMEN - HUMEDAD.

4.2.1.1 Condiciones Experimentales y Descripción de Experimentos

Para llevar a cabo la determinación de la relación área – volumen - humedad, en cada experimento se utilizó un par de muestras de corte longitudinal y transversal, con humedad y tamaño similares. Inicialmente se pintó los contornos de las muestras con pintura de esmalte, se les colocó el alambre en forma de garfio y luego se procedió a registrar la longitud, ancho, grosor y peso de cada muestra. Una vez que se realizó éste procedimiento, se colocaron en un soporte de cedazo y se introdujeron al horno para realizar el secado a la temperatura deseada. Los experimentos se llevaron a cabo a tres niveles de temperatura: 40, 60, 80 °C. Las muestras eran introducidas al horno hasta que este alcanzaba condiciones estables. Las muestras eran sacadas del horno para tomar los datos cada media hora durante las 2 primeras horas de secado, debido a que al comienzo el proceso de evaporación es más rápido. En el tiempo restante la toma de datos se llevó a cabo cada una hora hasta alcanzar un peso constante.

4.2.1.2 Evaluacion Experimental

Los datos obtenidos de cada corrida experimental fueron representados en una gráfica adimensional de A_s/A_o contra X/X_o para cada temperatura. Esto se hizo para determinar la ecuación del área con respecto a la humedad, $A_s = A_s(X)$, a partir de una curva de ajuste de datos.

4.2.2 DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERISTICA DE SECADO

4.2.2.1 Condiciones Experimentales

Las condiciones experimentales bajo las cuales se llevó a cabo el secado convectivo se fijaron considerando la sensibilidad térmica del material y algunos parámetros de importancia para el diseño. Se trabajó con aire seco y aire húmedo. Para éste último la humedad era variable a lo largo de los experimentos. Mairena (1994), sugiere trabajar con una velocidad constante de 1 m/s. El parámetro de temperatura fue evaluado a tres niveles 40, 60, 80°C. Para estos experimentos se utilizaron muestras de corte transversal.

4.2.2.2. Descripción de los Experimentos

Previamente se pesó las rodajas de jengibre en una balanza analítica y se midió la longitud, ancho y grosor de las muestras. Una vez alcanzada la temperatura estable del sistema, la corriente de aire se desvió para colocar la muestra en la cámara de prueba. Las muestras eran colocadas en el alambre conectado al soporte de la balanza, tratando de que

estas quedaran centradas. Las muestra quedaban colocada al centro de la cámara de secado quedando expuesta ambas caras a la corriente de aire caliente. Seguidamente se hecho a andar el programa Workbench y se hizo pasar el flujo de aire. Una vez iniciado el experimento el programa registró los datos de tiempo, temperatura y peso hasta obtener un peso constante o fluctuaciones mínimas en el peso, lo cual se tomó como el parámetro que determinaba el equilibrio entre el aire y la muestra. Workbench desde el inicio del experimento llevó el registro de la temperatura cada 20 s y del peso cada 12 s. Una vez finalizado el experimento se procedió a pesar y a medir la longitud, ancho y grosor de la muestra. Seguidamente la muestra fué introducida en un horno por 18 horas a 60 °C para determinar la masa de sólido seco.

4.2.2.3 Evaluación Experimental

Para cada corrida del proceso de secado se registró el peso del sólido húmedo (W_t) a través del tiempo (t), el peso del sólido seco (W_s), y las dimensiones (grosor, ancho y largo) de la muestra. La humedad se calculó utilizando la ecuación 3.1.

Para realizar el cálculo de la velocidad de secado se hizo uso de la ecuación 3.2. Se utilizo la ecuación de ajuste para A_s como función de X , determinada tal como se indicó en la sección 4.2.1.2. Para cada tipo de aire se graficó las curvas de velocidad de secado a las tres temperaturas analizadas. Para construir las curvas características de secado se empleo las ecuaciones 3.3 y 3.4, haciendo uso de los valores obtenidos en la curva de velocidad de secado para cada temperatura.

4.2.3. DETERMINACIÓN DE LA CARGA MÁSCICA DE LAS BANDEJAS DEL SECADOR

Para llevar acabo la determinación de la carga másica de las bandejas del secador se realizaron pruebas de laboratorio, para lo cual se empleo una malla de cedazo para construir una bandeja plana; la cual se colocó con una cierta inclinación dentro del horno para efectuar el secado de una carga de rodajas de jengibre conocida. Se observo que al secarse las rodajas de jengibre se resbalaron hacia la parte baja de la bandeja. Posteriormente se realizaron algunas pruebas variando el ángulo de inclinación de la bandeja, pero el resultado fué el mismo. Debido a la dificultad de la inclinación de la bandeja y la escasa capacidad de carga de la bandeja plana; se decidió diseñar una bandeja con ondulaciones triangulares y sin inclinación en la cámara de secado. La bandeja permite eliminar el escurrimiento de las rodajas y aumentar significativamente la carga másica por unidad de área.

Una vez que se diseñó la bandeja, se realizaron los experimentos de determinación de la carga másica. Para ello el jengibre se corto en rodajas en un procesador de alimentos, tanto de forma transversal como longitudinal con un grosor de entre 3 a 5 x 10⁻³ m. Debido a la carencia de una balanza con capacidad para pesar la bandeja, se decidió pesar la carga de rodajas de jengibre húmedo antes de colocarse en la bandeja. Las rodajas se colocaron en cada uno de los canales de la bandeja y se introdujeron en el horno a una temperatura de 60°C, por

un lapso de tiempo de 6 h hasta obtener un peso constante. El secado se realizó para constatar el comportamiento de las rodajas durante el secado.

4.2.4 METODOLOGÍA DE CÁLCULO PARA EL DISEÑO DEL SECADOR HÍBRIDO

4.2.4.1 Parámetros de Diseño del Secador Híbrido

Para la realización del diseño, fué preciso fijar las condiciones de operación del secador, carga másica, contenidos de humedad del jengibre, cinética de secado y las condiciones ambientales.

Se considera que el secador trabajará con aire húmedo, es decir aire ambiente. El proceso de secado se pretende llevar a cabo en dos etapas, basado en la cinética de secado del jengibre. En la primera el secador trabajará a una temperatura de 80°, con el fin de retirar la mayor cantidad posible de humedad del sólido, aprovechando que al inicio el proceso de evaporación es más rápido y el producto no sufre daño en su calidad. En esta etapa la temperatura del sólido no debe exceder los 55°C, a como se detalla en el sección 3.4;. Posteriormente se decrece la temperatura de secado hasta 60°C, ya que es la temperatura óptima recomendada en el sección 3.4.

4.2.4.2 Metodología para el Diseño del Secador Híbrido

4.2.4.2.1 Colector Solar

La presente metodología esta referida para condiciones de aire húmedo y también todas las consideraciones citadas anteriormente.

1. Variables requeridas para el diseño

Propiedades del aire: T_o , T_f , C_{p_a} , ρ_a , \dot{m}_a

Jengibre: W , W_w , W_s , \dot{m}_w , X_o , X , t , ecuaciones de N_v y $As(X)$ a las condiciones de operación.

Irradiación solar: H_T , $(\tau\alpha)$.

2. Cálculo del área teórica del colector, se empleó la ecuación 3.16.

- 2.1 El cálculo de la masa evaporada se realizó a partir de la ecuación 3.9. se consideró un secado eficiente del 90% de humedad retirada del material fresco.

- 2.2 Determinar el valor de T_s promedio, para cada temperatura de operación en el gráfico de curva experimentales de temperatura del sólido para aire húmedo
 - 2.3 Leer λ en la tabla de vapor saturado, a T_s para cada temperatura de operación.
 - 2.4 Determinar H_T promedio a lo largo del año en la tabla de radiación incidente sobre Nicaragua; para el lugar donde se instaló el colector solar.
 - 2.5 Fijar una η teórica para el diseño del colector
 - 2.6 Fijar un valor de T_f
 - 2.7 El cálculo del tiempo de secado se realizó a partir de la ecuación 3.6 para las temperaturas de 80°C y 60°C. Los valores W_s , X_{cr} , las correspondientes ecuaciones para N_v y $A(X)$; se leen en las tablas experimentales de la cinética de secado para aire húmedo.
3. Cálculo del flujo másico de aire

El cálculo del flujo másico de aire se llevó a cabo haciendo uso de la ecuación 3.12.

3.1 Cálculo del flujo másico de agua evaporada

La ecuación 4.1, se utilizó para realizar el cálculo del flujo másico de agua evaporada en el jengibre; basado en la temperatura de operación del secado, la cual determinó el tiempo de secado.

$$\dot{m}_w = \frac{W_w}{t} \quad 4.1$$

- 3.2 Calcular la temperatura promedio (T_{prom}), entre T_f y T_o .
 - 3.3 Determinar C_{pa} y p_a en la tabla de propiedades del aire, a T_{prom} .
4. Cálculo energéticos en el secador.

4.1 Calcular la cantidad de calor requerido para evaporar el agua del material a las temperaturas de 80°C y 60°C.

$$Q_v = \dot{m}_w \lambda \quad 4.2$$

4.2 Calcular la cantidad de calor generado por el colector solar, se utilizó la ecuación 3.13. Se consideró $Q_u=Q_c$. Se utilizó el flujo másico de aire a la temperatura de 60°C.

4.3 Calcular la cantidad de calor generado por la cámara de resistencia. Se debe tener en cuenta que el Q_v , utilizado en este cálculo es el correspondiente a la temperatura de operación de 80°C.

$$Q_R = Q_v - Q_c \quad 4.3$$

4.4 Calcular las pérdidas de calor en el colector solar, a partir de un despeje de la ecuación 3.10 (Manrique, 1984), se obtuvo la ecuación 4.4.

$$Q_p = H_T A_c (\tau\alpha) - Q_u \quad 4.4$$

5 Calcular la eficiencia del colector, haciendo uso de la ecuación 3.14.

6 Calcular la velocidad del aire con convección natural.

A partir de la ecuación 4.5, se obtuvo la velocidad del aire (v_a), dentro del colector solar, operando con convección natural (sin la utilización del extractor de aire).

$$v_a = \frac{v_a}{A_{t_{cs}}} \quad 4.5$$

6.1.1 A partir de la ecuación 4.6, se determinó el flujo volumétrico de aire promedio (v_a), que se atraviesa el secador híbrido. Se promedió el flujo másico de aire entre las temperaturas de operación del secador

$$v_a = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a} \quad 4.6$$

6.1.2 Leer la densidad del aire a la temperatura promedio de operación del equipo (ρ_a).

6.1.3 Fijar un valor de área transversal de la cámara de secado ($A_{t_{cs}}$).

4.2.4.2.2 Cámaras de Resistencia y Secado

El diseño de las cámaras de resistencia y de secado, se fundamentó en consideraciones teóricas y a la vez prácticas empleadas en modelos de secadores híbridos recabados en el trabajo: para el diseño se hizo uso también de consideraciones prácticas recabadas con entendidos en el diseño de equipos de esta naturaleza. La altura y ancho de la cámara de resistencia se definió en base a la abertura de salida del colector solar. El área transversal de la cámara de secado se definió con relación a las dimensiones correspondientes a las bandejas seleccionadas para ser utilizadas en el secador híbrido y a la teoría referida a ésta, descrita en 3.7. Las dimensiones de las bandejas empleadas corresponden a las utilizadas en otros modelos descritos en el acápite 3.7. El diseño propio de la bandeja esta referido a consideraciones hechas para llevar a cabo el secado de jengibre, a como se detalla en las secciones 3.4, 3.7 y 4.2.3.

4.2.5 ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL SECADOR HÍBRIDO

La estimación de costos se realizó en dos etapas. La primera estuvo referida a los costos de construcción del equipo y la segunda etapa que correspondió a la estimación de costos para el procesamiento del jengibre en el secador experimental operando en la ciudad de Managua.

4.2.5.1 Costos de Construcción

Para determinar el costo de construcción del secador híbrido, se hizo necesario realizar en detalle una estimación de los costos de cada uno de los materiales empleados en la construcción. Debido a que el equipo se dió a construir, se carece de la cantidad precisa de cada material empleado para la construcción de cada parte del equipo.

4.2.5.2 Costos de Producción del Jengibre Seco por Lote de Secado

Para realizar la determinación de los costos de producción, se tomó como base de cálculo el costo de producir el jengibre seco en el secador híbrido por lote de secado en base a la carga másica del jengibre húmedo y al tiempo de secado. El análisis se hizo considerando que el secador se encuentra ubicado en la ciudad de Managua.

4.2.5.2.1 Costo de Materia Prima

Para realizar la determinación del costo de materia prima, se consideró que la materia prima esta constituida por el costo del kilogramo de jengibre fresco (C\$/kg), en dependencia de la carga másica de jengibre en el secador por lote de secado (Unidad consumida (kg)/lote).

$$\text{Costo de materia prima (CMP)} = \frac{\text{Unidad consumida (kg)}}{\text{lote}} * \frac{\text{C\$}}{\text{kg}} \quad 4.7$$

4.2.5.2.2 Costo de Transporte

El costo de transporte se consideró, porque la materia prima es transportada desde las zonas donde se cultiva hasta la ciudad de Managua donde se lleva a cabo el secado. Para realizar la determinación del costo de transporte se consideró que corresponde a un 5% del costo de la materia prima (CMP) (Ramírez, 1996).

$$\text{Costo de transporte (CT)} = 5\% * \text{CMP} \quad 4.8$$

4.2.5.2.3 Depreciación Lineal

Se consideró la depreciación del equipo como lineal, basado en el precio(PE) y vida útil (VU) del equipo en dependencia del tiempo que se tarda en secar el lote (t).

$$DL = \frac{PE}{VU} * t \quad 4.9$$

Donde:

DL: es la depreciación del equipo en C\$/h

PE: es el precio del equipo en C\$.

VU: es la vida útil del equipo en hora (h).

t: es el tiempo de secado en hora (h).

4.2.5.2.4 Costo de Mano de Obra

Para realizar la determinación del costo de mano de obra, se hizo uso de la tarifa salarial correspondiente a un obrero (C\$/h) y el tiempo que tarda en secarse el lote (t). Se consideró que es necesario constar con una persona que sea la encargada de cargar y operar el equipo, también de almacenar el jengibre seco.

$$\text{Costo de mano de obra (CMO)} = \text{C\$ / h} * t \quad 4.10$$

4.2.5.2.5 Costo de Consumo de Electricidad

Considerando que el secador utiliza energía eléctrica para calentar el aire por un lapso de tiempo determinado, se debió realizar un análisis del costo de consumo de electricidad. El consumo de energía eléctrica en el secador híbrido lo representa la cámara de resistencia.

$$CE = CER * TE \quad 4.11$$

Donde:

CE= es el costo de electricidad en C\$/lote.

TE= es la tarifa de electricidad en C\$/kW.

CER= es el consumo de energía eléctrica de la cámara de resistencia en kWh/lote.

Siendo:

$$CER= P*t \quad 4.12$$

Donde:

P= es la potencia de la resistencias en kW.

t= es el tiempo de consumo de electricidad en hora (h).

4.2.6 DETERMINACIÓN DEL PRECIO UNITARIO DEL JENGIBRE SECO

Para llevar a cabo la estimación del precio unitario del jengibre seco (PUI), se consideró el costo total de producción (CTP) y la masa de jengibre seco producida por el secador híbrido (JS). El costo total de producción representa la sumatoria de todos los costos en que se incurre para producir el jengibre seco en el secador.

$$PUJ= \frac{CTP}{JS} \quad 4.13$$

Donde:

PUJ: es el precio unitario del jengibre seco en C\$/kg.

CTP: es el costo total de producción en C\$.

JS: es la masa de jengibre seco producida. en kg.

V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 DETERMINACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE SECADO

5.1.1 DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ÁREA- VOLUMEN- HUMEDAD

A consecuencia de la pérdida de humedad el jengibre tiende a encogerse. Al secar las rodajas de jengibre, se observó que el encogimiento no fue uniforme, porque las piezas de los vegetales no tienen una elasticidad perfecta y la humedad contenida en su seno no se elimina uniformemente a través de la pieza a medida que ésta se seca. En las muestras secadas se observó que el encogimiento fue progresivo hacia el centro haciendo que las muestras adoptaran forma cóncava. Para describir su comportamiento durante el secado, fué preciso determinar una ecuación que relacionara el cambio del área en función de la pérdida de humedad, para lo cual se realizaron experimentos de variación de volumen a diferentes temperaturas (40, 60 y 80 °C), y tipos de cortes transversal y longitudinal en el sólido en un horno. Se observó un comportamiento de la variación del volumen lineal respecto a la humedad (Figuras B-1.a y B-2.a del apéndice B). Se encontró también que el encogimiento presenta dos períodos durante el secado; el primero corresponde a un período decreciente del área y el segundo a un período en que el área permanece constante (Figuras B-1.b y B-2.b). En las ecuaciones obtenidas para cada temperatura se consideró únicamente el período de variación del área, es decir, el período decreciente del área que corresponde a valores de humedad mayores que 0.10 kg de humedad/ kg de sólido seco. En las Figuras B-1.b y B-2.b se observó un comportamiento lineal al igual que la variación del volumen, tanto en el período decreciente como en el período constante. Los resultados demuestran que la variación del área permanece constante, la variación del volumen continua, debido a que el sólido sigue perdiendo humedad lo que es apreciable por la disminución del grosor de la muestra (Tablas H-1, H-2, H-3, H-4, H-5, H-6 del apéndice H). Se observó que la deformación en la rodaja de jengibre con el tipo de corte transversal es mayor con respecto a la rodaja de corte longitudinal; debido a que las fibras internas son cortadas quedando espacios vacíos en la rodaja entre fibra y fibra, por donde penetra el aire caliente. Lo que ocasiona una pérdida de humedad mayor que la rodaja con corte longitudinal.

La serie de datos correspondientes al período decreciente del área, se le aplicó regresión lineal suponiendo un comportamiento lineal de los datos. A partir de las Figuras B-1.a y B-2.a, se obtuvo ecuaciones lineales que describen el comportamiento a cada temperatura y tipo de corte. Las ecuaciones obtenidas relacionan la variación del área en función de la pérdida de humedad $A_s = A_s(X)$. La ecuación siguiente representa el comportamiento del encogimiento en la rodaja de jengibre:

$$\left(\frac{As(X)}{As_o} \right) = a * \left(\frac{X}{X_o} \right) + b \quad 5.1$$

Despejando la ecuación (5.1), se obtiene la expresión para el cálculo del área de exposición:

$$As(X) = \frac{aAs_o}{X_o} X + As_o b \quad 5.2$$

Siendo a y b la pendiente y el intercepto respectivamente obtenidos para cada gráfica; As_o y X_o son el área y la humedad inicial de la muestra y $As(X)$ representa la variación del área con respecto a la pérdida de humedad. Los valores de a y b obtenidos para cada temperatura y tipo de corte son válidos únicamente para estas condiciones.

Las ecuación 5.2, representa el comportamiento general del encogimiento del jengibre, para cualquier temperatura y área inicial de la rodaja de jengibre. Introduciendo los valores correspondientes de a y b obtenidos para cada temperatura y tipo de corte en la ecuación 5.1, es posible obtener ecuaciones específicas, que describan el comportamiento del encogimiento de la rodaja de jengibre a las diferentes temperaturas y cortes hechos en el jengibre entero; a como se muestran en la Figura B-1.

Los resultados experimentales, demuestran que el encogimiento no depende de la temperatura, sino más bien del contenido de humedad en el material. debido a que se observo que el comportamiento a las tres temperaturas en que se analizó su efecto presentan el mismo comportamiento, a como se muestra en las Figuras B-1.a y B-2.a. Lo que evidencia que el encogimiento no depende de la temperatura, sino del contenido de humedad del material. Además se determino que el encogimiento depende significativamente del tipo y geometría del material. Se comprobó que el grosor de la rodaja sugerido en la literatura, evita el efecto de la dureza.

5.1.2 CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO

Las figuras que indican el comportamiento de la velocidad de secado (Figuras A-1.a y A-3.a), muestran la inexistencia del período de velocidad constante presentando únicamente un período de velocidad decreciente. Esto indica que en todo momento el secado se efectúa con resistencia del sólido. A humedades altas es posible apreciar un rápido aumento de la velocidad de secado hasta alcanzar una velocidad máxima a partir de la cual empieza a decrecer; lo que evidencia un calentamiento rápido del sólido al inicio del proceso de secado a como lo muestran las Figuras A-2 y A-4. Al final del proceso se observo que la temperatura del sólido tiende a igualar a la temperatura del aire, por consiguiente al existir mayor temperatura en el aire circundante el incremento en la temperatura del sólido es más rápido. Las velocidades de secado máximas alcanzadas por el aire húmedo y aire seco son similares,

de lo cual se deduce que el secado de jengibre se ve poco influenciado por la humedad del aire.

Para la determinación de las curvas de velocidad de secado se consideró la influencia del encogimiento. Para incorporar este análisis, se hizo uso de las ecuaciones obtenidas para encogimiento a cada temperatura y tipo de corte transversal. se sustituyo los valores de humedad y área inicial específicos para cada temperatura y corte transversal determinados en los experimentos de curva característica de secado; a partir de lo cual se representa el encogimiento a las condiciones dadas. Las ecuaciones obtenida (Figuras A-1 y A-3), se sustituyeron en la ecuación 3.2, para realizar la determinación de la curva de velocidad de secado. Con éste estudio se garantiza que las curvas de velocidad de secado obtenidas experimentalmente reflejen implícitamente la influencia del encogimiento sobre la velocidad de secado. En cualquier estudio de determinación de curva característica de secado de alimentos es fundamental realizar el análisis del encogimiento, porque es un factor que influye significativamente en la velocidad de secado y por ende en el diseño del secador a utilizar; con lo cual se garantice un producto seco de calidad.

Las Figuras A-1.a y A-3.a, demuestran que la influencia de la temperatura sobre la velocidad de secado, se observo que a mayor temperatura se incrementa la velocidad de secado. Debido a que la humedad contenida en el sólido es retirada más rápidamente al existir una mayor temperatura dentro del sólido. Lo anterior queda evidenciado al comparar el tiempo de secado para cada temperatura de trabajo (Tablas G-4, G-5 y G-6). Se observo que para la temperatura de 80°C el tiempo de secado consumido es de aproximadamente 2 hora en comparación a las 7 hora consumidas a la temperatura de 40°C. En la práctica se observo que a mayor temperatura existe una deformación más rápida y pronunciada en el sólido. En cuanto al color que presentaron estas muestras es oscuro, siendo más claro en las muestras secadas a 40°C. El olor característico a limón es similar en todas las muestras secas obtenidas para cada temperatura. En base a los resultados obtenidos las condiciones óptimas de secado, se presentaron al realizar el secado a la temperatura de 60°C.

5.1.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE SECADO

Las Figuras A-1.b y A-3.b muestran las curvas características de secado para el jengibre, utilizando aire seco y humedo respectivamente.

Para aire seco, los puntos experimentales a 40 °C y 80 °C siguen un comportamiento similar. Los datos de 60 °C no siguen el mismo comportamiento a partir de Φ igual a 0.10. Sin embargo para obtener la curva característica se utilizó los datos de las tres temperaturas. Las variaciones en los datos pueden deberse a errores experimentales, tales como errores de medición en el peso.

Para aire húmedo, los puntos experimentales a 40 °C y 80 °C siguen un comportamiento similar. Los datos a 60 °C no siguen el mismo comportamiento en el rango de Φ de 0.10 a

0.60. Sin embargo para obtener la curva característica se emplearon los datos de las tres temperaturas. Las variaciones en los datos pueden deberse a errores experimentales, tales como errores de medición en el peso.

Se observó un descenso más brusco en la curva de aire seco como era de esperarse, ya que éste presenta una menor resistencia al paso de la humedad del sólido a su seno. Para el ajuste de los puntos experimentales, se seleccionó el polinomio que satisface más el comportamiento asintótico de los puntos.

5.2 SECADOR HÍBRIDO

Los planos referidos a la construcción del equipo se detalla en el apéndice J.

La metodología empleada para el diseño del secador híbrido, utilizó los principios básicos de secado. Se incorporó al estudio el efecto del encogimiento sobre la velocidad de secado, para realizar el cálculo del tiempo de secado y posterior dimensionamiento del equipo. Se hizo un análisis energético en el secador híbrido y cálculo del flujo de aire dentro del mismo. La evaluación del equipo corresponde a un posterior trabajo monográfico realizado por estudiantes suecos, que lleva por nombre “Evaluación de un Secador Híbrido para Jengibre en Nicaragua” (Bergqvist y Lindström, 1999), con lo cual se completa la investigación.

El secador híbrido diseñado consta de tres partes fundamentales que son el colector solar, la cámara de resistencias y la cámara de secado. El colector solar actúa como la fuente de generación de calor principal y la cámara de resistencias como una fuente de calor auxiliar. La operación del secado se lleva a cabo inicialmente a la temperatura de 80 °C y luego descender a una temperatura de 60 °C para finalizar el secado. En la Figura A-4, se observó que durante la operación a 80 °C la temperatura del sólido alcanza un valor de 52 °C al consumir una hora de secado utilizando aire húmedo. Esto es muy importante porque Govindajaran (1982), sugiere que la temperatura del jengibre no debe sobrepasar los 55 °C porque de lo contrario se afectaría la estructura interna. Lo anterior expuesto, es la consideración que permitió realizar el secado del jengibre a 80 °C, durante una hora sin causar daño alguno en la calidad del producto.

El colector solar consta de una cubierta de vidrio de 5×10^{-3} m de espesor que garantiza un alto índice de transmitancia y un bajo porcentaje de pérdidas de calor por convección y radiación. Consta también de una placa de absorción compuesta de una lámina de cinc ondulada pintada en la cara superior con pintura negra mate, que proporciona un alto índice de absorbancia. La coraza del colector está constituida de plycem de 1.1×10^{-2} m de espesor. La superficie total del colector expuesta al sol es de 2 m². El colector descansa sobre una estructura de metal. La dirección del colector es hacia el sur verdadero, con un ángulo de inclinación de 17°. La placa de absorción está colocada al centro y permite el paso del aire tanto por encima y debajo de ella. Las aberturas fueron introducidas en este modelo con el propósito de crear zonas de mezclados entre ambas corrientes, para obtener una temperatura uniforme a la salida

del colector. Todas las uniones interiores de la coraza estan selladas con silicona para evitar fugas de aire caliente. Se dispone de un sistema de dos baffles que dividen al colector en 3 ductos por donde pasa el aire.

La cámara de resistencia esta unida al colector solar y la cámara de secado, tiene un área transversal de 0.1 m^2 . Consiste de una coraza rectangular de hierro de $1.20 \times 10^{-2} \text{ m}$ de espesor, la parte interior esta forrada con plycem que actua como aislante, aunque la parte exterior esta forrada totalmente con fibra de vidrio para evitar pérdidas de calor en esa zona. El otro elemento que compone la cámara es la resistencia eléctrica, con capacidad de 1.2 kW y tiene forma de una espiral. Se encuentra dispuesta de forma perpendicular al flujo de aire. La resistencia esta incorporada a la coraza. Para un mejor suministro voltaje requerido estan conectadas a un controlador de temperatura.

La cámara de secado esta compuesta de la coraza y las bandejas. Posee un área de 1.2 m^2 . La coraza esta construida de diversos materiales. El techo y las caras este y oeste estan hechas de lámina de cinc pintada de negro en su parte interior, la cara sur esta construida de una lámina esmerilada transparente y la cara norte esta constituida de una puerta. La cara sur esta construida de lámina corrugada transparente. La cara norte esta constituida por una puerta y una pequeña ventana. La puerta esta hecha de plycem de $6 \times 10^{-3} \text{ m}$ de espesor, pintada de negro en su parte interior y la ventana esta construida de vidrio de $5 \times 10^{-3} \text{ m}$ de espesor; que permite observar el proceso de secado sin necesidad de abrir la puerta. La puerta cuenta además de una banda imantada que la fija al borde de la cámara de secado, con el fin de evitar fugas de aire. La cámara en su interior posee una serie de rieles donde descansan las bandejas en total la cámara consta de 5 bandejas distribuidas uniformemente. Las bandejas son onduladas triangulares y estan hechas de mallas de $2.28 \times 10^{-3} \text{ m}$ de espesor pintada de negro. Las bandejas ocupan todo el ancho de la cámara y estan separadas entre sí 0.25 m . Las ondulaciones permiten una mejor circulacion del aire dentro de la cámara y un mejor ángulo de incidencia de las rodajas respecto a la corriente de aire. La otra parte de la cámara, es el extractor de aire, tiene forma esférica y posee una serie de hendiduras a su alrededor que permiten extraer el aire del interior de la cámara con ayuda del viento; esta contruido de lámina de latón. La cámara de secado descansa sobre una estructura de metal.

La eficiencia teóricamente calculada del colector es de 83%, lo que refleja un resultado satisfactorio al compararlo con la eficiencia de colectores descrita en el acápite 3.6. Algunos ensayos realizados por estudiantes suecos para evaluar las temperaturas alcanzadas por el secador utilizando una y dos fuentes de calor, se presentan en las Figuras 5.1 y 5.2. Se observa que las temperaturas máximas alcanzadas por el colector se encuentran un rango entre 50 a 70°C ; en las horas cercanas al medio día (hora de mayor insolación). Esto evidencia una buena captación de la energía solar incidente sobre la superficie del colector. De lo anterior se desprende que a mayor irradiación solar el incremento de la temperatura del aire dentro del colector es mayor, a como lo muestran las fluctuaciones de temperatura en las Figuras 5.1 y 5.2. Estas fluctuaciones de temperatura se deben de reducir en la cámara de secado, porque de lo contrario provoca un secado no uniforme. La cámara de resistencia cumple con la función

de controlar el proceso de secado al inicio, que es cuando el proceso necesita una temperatura estable para retirar la humedad de forma uniforme del producto. Debido a esto la cámara de resistencia consta de un controlador de temperatura, en el caso que la insolación baje, el controlador estabiliza la temperatura. Un análisis detallado acerca del funcionamiento del equipo se encuentra en el trabajo monográfico, de estudiantes suecos que realizaron la evaluación del equipo, en Managua y Nueva Guinea (Bergqvist y Lindström, 1999). En un día despejado el tiempo de insolación útil corresponde a un total de entre 8 a 11 horas en Nicaragua. El colector presenta la ventaja que conserva una cierta cantidad de calor por la noche, de la acumulada durante el día. En la Figura 5.2 se observa las temperaturas de salida del aire de la cámara de secado alcanzadas por el secador, siendo estas bastante satisfactorias aunque en estos ensayos no se controló la temperatura del aire dentro de la cámara de secado.

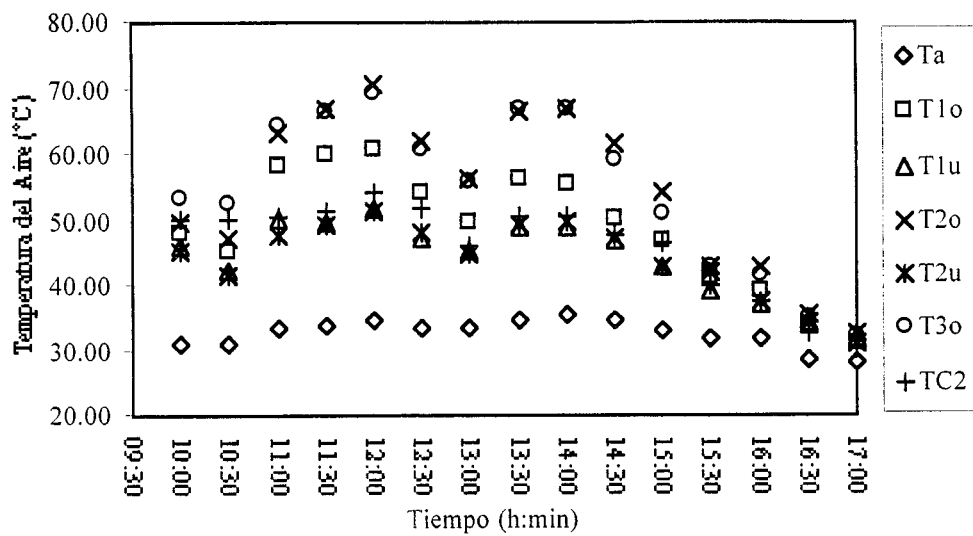


Figura 5.1. Distribución de Temperatura en el Colector Solar y la Cámara de Secado utilizando únicamente el Colector Solar para Calentar el Aire.

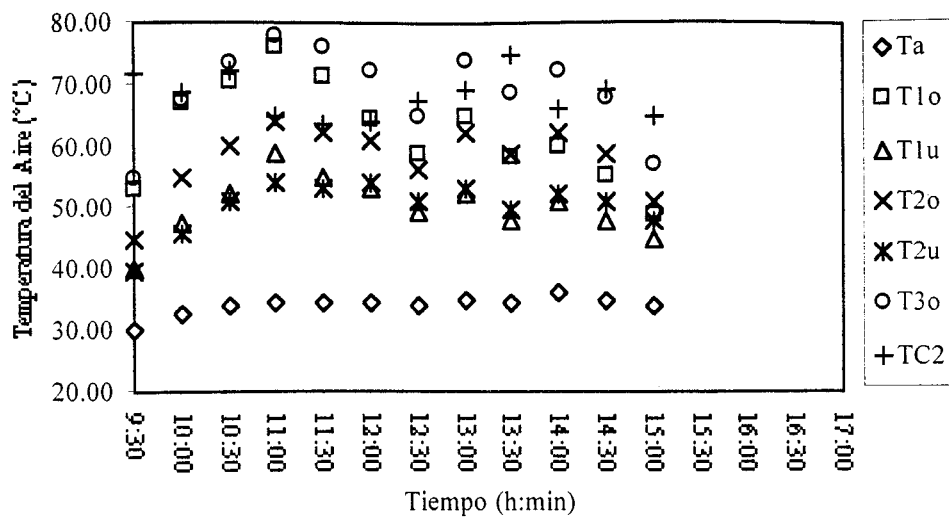


Figura 5.2. Distribución de Temperatura en el Colector Solar y la Cámara de Secado utilizando las dos Fuentes de Calor para Calentar el Aire.

5.3 ANALISIS DE COSTOS DEL SECADOR HIBRIDO

El análisis de costos se realizó en base a la estimación de costos de construcción del secador híbrido y producción del jengibre en el equipo. Los costos de los materiales empleados en la construcción del secador y el costo de mano de obra, aparecen detallados en la Tabla 5.1. El costo total de construcción fue de C\$ 16556.74. La Tabla 5.2 muestra los costos involucrados en la producción del jengibre por lote de secado. El precio de producción por kilogramo de jengibre seco producido es de C\$ 17.73.

MATERIALES DE CONSTRUCCION	CANTIDAD	C\$/UNIDAD	TOTAL C\$
Angulares (1/8 x 3/4 x 20 m)	1		32.75
Angulares (1 x 1/8 x 6 m)	4	39.87	159.48
Accesorios Varios			709.85
Empaques y Cinta Magnética	31 ft		532.05
Extractor de Aire	1	600.00	600.00
Lámina de Zinc Liso (calibre 26)	4	79.44	317.76
Lámina de Hierro (4 X 20 X 1,20 mm)	1	241.34	241.34
Lámina Plástica Corrugada (1 X 1,2 m)	1		690.00
Lámina de Zinc Corrugado (8 x 28mm)	2	47.51	95.02
Lámina de Plycem (4 x 8 x 6mm)	2	93.25	186.50
Lámina de Plycem (4 x 8 x 11mm)	1		187.97
Malla de Bandejas (4 X 8 X 2,28 mm)	2	490.1	980.20
Mano de Obra			8,850.00
Perlines (1 1/2 X 3 X 1/16 pulg)	2	81.31	162.62
Pegamento	1/2 gln		71.70
Pinturas y Diluyentes	1 1/2 gln		300.31
Platinas (3/4 x 1/8 pulg)	4	20.4	81.60
Platinas (1/2 x 1/8 pulg)	3	14.2	42.60
Resistencias y Controladores de Temperatura			1,106.77
Transporte			500.00
Tubos Cuadrados (1 1/2 pulg)	2	64.91	129.82
Vidrio Liso (5 mm)			450.00
Visagras de Presión	2	17.35	34.97
Costo Total			16556.77

Tabla 5.1. Costos de los Materiales de Construcción y de Mano de Obra del Secador Híbrido.

MATERIA PRIMA	C\$/Unidad	CONSUMO/Lote	TOTAL C\$/Lote
Jengibre Fresco (kg)	0.5291	10.00	5.291
Costo de Mano de Obra	C\$/h útil	h útil/lote	
	1.8750	2.00	3.750
Costo de Electricidad	C\$/kWh	kWh/lote	
	1.391	1.33	1.855
Costo de Transporte			
(5% costo de materia prima)			0.265
Depreciación Lineal	C\$/h útil	h útil/lote	
	0.657	10.00	6.570
Total		C\$	17.730

Tabla 5.2. Costos Involucrados en la Producción del Jengibre Seco en el Secador Híbrido.

El precio del secador híbrido resulta alto, debido a que los materiales empleados para su construcción resultaron bastante elevados así como la mano de obra. La utilización de estos materiales se debió meramente a propósitos relacionados a la investigación; lo que no significa que el secador únicamente se pueda construir con estos materiales. Se puede asegurar que un 70% de los materiales utilizados en el secador pueden ser sustituidos por materiales de menor costo. Esto vendría a disminuir significativamente los costos de construcción del equipo.

La Figuras 5.3 muestran en porcentaje los costos de cada una de los componentes del secador híbrido y el costo de mano de obra. Encontrándose que éste último representa el 50% del costo total de construcción; debido a que en Managua el costo de mano de obra resulta bastante caro, es posible que al construirse el secador en los departamentos el costo de mano obra se disminuya significativamente. El componente más caro del secador es la cámara de secado, debido fundamentalmente al elevado costo que representa el extractor de aire y la lámina plástica. Sin embargo, el extractor de aire puede ser sustituido por un pequeño ventilador conectado a una celda fotovoltaica que genere la energía necesaria para moverlo, aprovechando de esta manera las radiaciones solares. La lámina plástica puede ser sustituida por una lámina de plexiglas que tiene un valor inferior. El costo del colector resultó de un bajo costo, aun con los materiales empleados y el elevado costo de mano de obra, lo cual indica que la utilización de esta fuente de calor es ventajosa. Otro factor abverso en el costo de construcción es que la estructura del secador híbrido es casi en su totalidad de metal, lo que significa un factor importante en los costos totales de construcción.

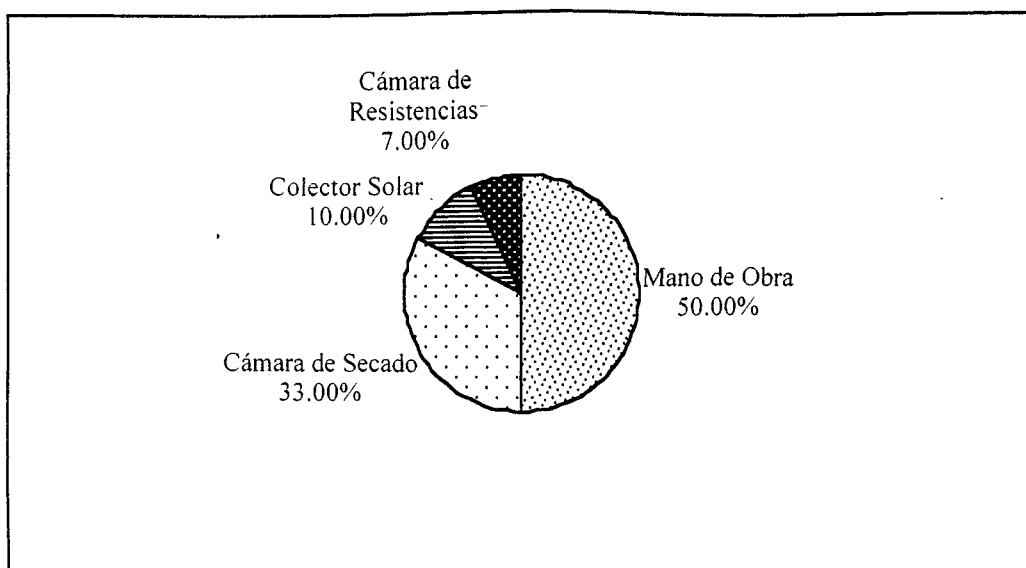


Figura 5.3. Diagrama de los Costos de Mano de Obra y de los Materiales de Construcción del Secador Híbrido.

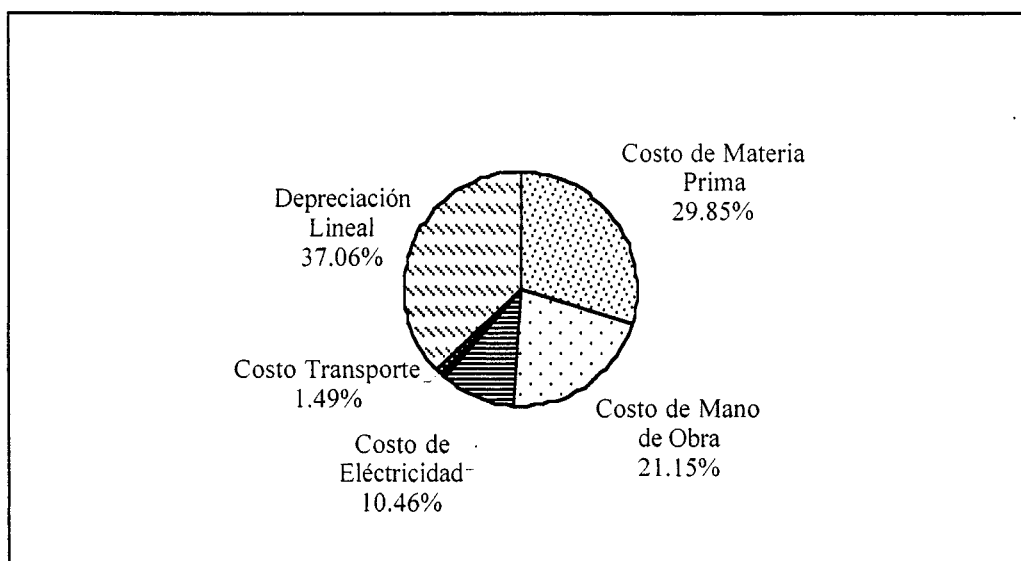


Figura 5.4. Diagrama de los Costos involucrados en el Producción del Jengibre en el Secador Híbrido.

La Figura 5.4 muestra en porcentajes los costos involucrados en la producción del jengibre en el secador híbrido. Se encontró que la depreciación del equipo representa el mayor costo en que se incurre en la producción del jengibre en éste, debido al elevado costo de construcción del equipo. Por tal razón se establece una proporcionalidad entre el costo de construcción y el costo por depreciación del equipo; si el costo del equipo baja entonces se disminuirán significativamente los costos totales de producción del jengibre lo que vendría a hacer más atractiva la idea de secar el jengibre con el equipo y de esta manera solucionar el problema que el jengibre de rechazo causa en sus cultivos, obteniendo a la vez un ingreso extra en su producción anual.

Otro factor que se debe tomar en cuenta es el costo de materia prima; hay que señalar que en el caso de la investigación se consideró como un costo porque el producto se compró, sin embargo si el producto es secado por el productor éste costo desaparecería o se podría considerar con un valor muy por debajo del utilizado en la investigación. El costo de mano de obra es un costo significativo que puede disminuir, si se considera que en el campo la mano de obra es más barata que en la ciudad. Algo muy significativo que se observa en la Figura 5.4, es el bajo costo de electricidad en que se incurre al procesar el jengibre en el secador híbrido, lográndose un ahorro significativo en consumo de energía eléctrica y abaratando los costos de producción. También se reflejan las ventajas que se obtienen al secar el producto; los costos de transporte del producto seco se disminuyen notablemente y se hace más fácil su transportación del campo a la ciudad.

El precio producción del kilogramo de jengibre seco coincide con el costo total de producción, que aparece en la Tabla 5.2; lo que refleja un elevado costo de producción del jengibre en el secador híbrido. Se aprecia además que aun con el elevado costo de producción, si se eleva la producción de jengibre seco en el equipo el precio producción tendería a disminuir y de esta forma hacerlo más competitivo en el mercado internacional y obtener mejores ganancias. Si embargo lo ideal es disminuir el costo de producción y aumentar la producción del equipo. Se debe tomar en cuenta que el precio de producción calculado corresponde a un valor de investigación hecho en base a un lote de secado (10 kg) en el secador híbrido, por lo que no es un valor determinante. Es necesario hacer más estudios, debido a que no se consideró en el análisis la comercialización del producto seco.

VI. CONCLUSIONES

La velocidad de secado depende de la temperatura y del aire de secado y se ve influenciado por el efecto del encogimiento. Se comprobó que la velocidad de secado se ve poco influenciado por la humedad del aire de secado y por el tipo de corte de la rodaja de jengibre. la variación de volumen depende del contenido de humedad, tipo y geometría del material. El encogimiento no depende de la temperatura y se ve poco influenciado por el tipo de corte y aire de secado. Las ecuaciones de ajuste de las curvas características de secado utilizando aire seco y aire húmedo, son las siguientes. Válidas entre el rango de temperatura de 40- 80 °C.

Para aire seco:

$$f = -8.8163\Phi^4 + 20.0166\Phi^3 - 15.4952\Phi^2 + 5.2620\Phi + 0.0072$$

Para aire húmedo:

$$f = -8.4839\Phi^4 + 19.7043\Phi^3 - 16.1636\Phi^2 + 5.9145\Phi + 0.0075$$

Las condiciones óptimas de secado se llevan a cabo a la temperatura de 60°C, rodajas de jengibre entre 3 a 5 x 10⁻³ m y una temperatura del sólido que no sobre pase los 55°C. Con ésta se garantiza un producto seco de buena calidad con relación a la textura, color, olor y pocas pérdidas por volatilidad de aceite volátil y oleoresina.

El secador híbrido diseñado cumple con los parámetros de diseño teóricamente calculados. Se comprobó el funcionamiento del colector solar, llegando a alcanzar temperaturas de entre 50 y 70 °C en las horas de mayor insolación. El consumo de energía eléctrica en el equipo es bajo.

El equipo es desmontable en sus partes fundamentales, lo que facilita su transporte a cualquier lugar. Es un equipo versátil en cuanto a la variedad de productos que se pueden secar en él, siempre que estos no desprendan componentes volátiles que puedan quedar impregnados en la cámara de secado.

El costo del secador híbrido resultó un tanto alto, debido fundamentalmente a los elevados costos de mano de obra y materiales empleados para su construcción. Los costos de producción del jengibre en el secador híbrido están relacionados con los costos de construcción del equipo, si se disminuye el costo del equipo, los costos totales de producción se disminuirán. El precio unitario del jengibre seco resulta atractivo para tomar la idea de secar el jengibre de rechazo en el secador híbrido a una escala mayor; si se disminuyen los costos de producción y aumentando el volumen de producción de jengibre seco.

VII. RECOMENDACIONES

Komp (referencia personal), sugiere que para mejorar la eficiencia del colector se deben hacer cortes en los baffles, uno a la entrada del aire y el otro a la salida con el fin de mejorar el mezclado del aire. También recomienda usar lámina de cinc oxidadas, con el objetivo de aumentar la fricción del aire que atraviesa el colector que garantice un mejor aprovechamiento del calor. El interior del colector hay que pintarlo de un color claro que permita una mayor retención de los rayos solares en el interior del colector.

Sustituir todos aquellos materiales de alto costo, para bajar el costo total de construcción. King (referencia personal), recomienda remplazar el extractor de aire por un pequeño ventilador de baja potencia conectado una celda fotovoltaica que aproveche las radiaciones solares. También reemplazar la lámina plástica con una lámina de plexiglas y las láminas de cinc liso de las paredes de la cámara de secado con plycem.

Emplear resistencias de menor costo en la cámara de resistencias que garanticen la energía requerida por el secador y puedan ser distribuidas en el interior de la cámara de resistencias. Construir la cámara con materiales de baja conductividad térmica como por ejemplo plycem.

Para llevar a cabo el secado de jengibre a gran escala se hará preciso construir una cortadora mecánica, que corte el jengibre en rodajas con un grosor sugerido entre 3×10^{-3} y 5×10^{-3} m.

VIII. NOMENCLATURA

Simbolo	Definición	Unidades
a	Pendiente	
A_c	Area del colector	m^2
A_s	Area superficial expuesta al secado	m^2
b	Intercepto	
CE	Costo de electricidad	C\$/lote
CER	Consumo de energía eléctrica	kWh/lote
CMP	Costo de materia prima	C\$/lote
CMO	Costo de mano de obra	C\$/lote
C_p	Capacidad calorífica	$kJ/kg^{\circ}C$
CT	Costo de Transporte	C\$/lote
CTP	Costo total de procesamiento	C\$
DL	Depreciación lineal	C\$/h
f	Velocidad relativa de secado	adim.
H_T	Irradiación solar	W/m^2
HR	Humedad relativa	%
m	masa	kg
\dot{m}	Flujo másico	kg/s
n	Día del año	día
N_v	Velocidad de secado	kg/m^2s
N_w	Velocidad de pérdida de la humedad	kg/m^2s
P	Potencia de la resistencia	kW
PE	Precio del equipo	C\$
PUJ	Precio unitario del jengibre seco	C\$/kg
Q	Flujo de calor	kW
s	Angulo de inclinación del colector	grados[°]
t	Tiempo de secado	s
T	Temperatura	K
TE	Tarifa eléctrica	C\$/kW
v	Velocidad aire	m/s
V	Volumen	m^3
VU	Vida útil del secador híbrido	h
W_s	Masa del sólido seco	kg
W_t	Masa del sólido en función del tiempo	kg
X	Contenido de humedad promedio del sólido	kg/kg
Y	Humedad absoluta	kg humedad/kg as

Letras Griegas

α	Absorbancia	
δ	Angulo de declinación del sol	
η	Eficiencia teórica del del colector	%
ϕ	Latitud geográfica	grados [°]
λ	Calor de vaporización	kJ/kg
ν	Flujo volumétrico	m ³ /s
ρ	Densidad	kg/m ³
τ	Transmitancia	
Φ	Contenido característico de humedad	

Subíndices

a	Aire. ambiente
c	Colector, crítica
cs	Cámara de secado
R	Cámara de resistencias
e	Valor de equilibrio
sc	Salida del colector
p	Pérdido
s	Saturación
T	Total
u	Util
v	Humedad evaporada
w	Agua
o	Inicial
f	Final

IX. BIBLIOGRAFIA

- APENN**, " Jengibre" en Revista del Exportador, Managua. Nicaragua. (1997).
- Batty, J. C y Folkman S. L**, Fundamentos de la Ingeniería de los Alimentos, Cap 15. Editorial CECSA. Mexico. (1990).
- Bergqvist. K y Lindström. C**, "Evaluation of a Hybrid Dryer for Ginger in Nicaragua", Trabajo de Tesis, Department of Chemical Engineering and Technology Division of Transport Phenomena, Royal Institute of Technology. Estocolmo. (1999).
- Bertin. J**, Mecánica de Fluido para Ingenieros, Cap 6. Editorial Prentice-Hall-Hispanoamericana, S.A. Mexico. (1986).
- Carrillo, M**, " Determinación de Parámetros para el Diseño de un Sistema de Secado de Lecho Deslizante para el Secado de Nim", Trabajo de Tesis, Facultad de Ingeniería Química, UNI. Managua. Nicaragua. (1996).
- Centro de Comercio Internacional (UNCTAD/ GATT)**, Jengibre, Pág 8, 9, 10, 19. Ginebra. (1993).
- CIPRES**, Producción, Empaque y Comercialización de Quequisque y Jengibre En Rio San Juan. Pág 13, 17, 28. Managua. (1995).
- CIPRES**, Mercado con Sabor a Jengibre, Revista del Campo, Pág 29-33. Managua. (1996).
- Clair. By Steven. F**, Fundamento de la ingeniería de los alimentos. Editorial Continental S.A, Cap 11 y 12. México. (1990).
- Cubillo A. L**, Estudio Preliminar para la Recuperación de Solventes en la Producción del Insecticida Nim. Managua, Nicaragua. (1998).
- Delagneau B. V y Osorno F. P**, Análisis, Diseño y Factibilidad de Semáforos Fotovoltaicos para la Ciudad de Managua, Trabajo de Tesis, Facultad de Ingeniería Electrónica, UNI. Cap 3 , pág 29. Managua. Nicaragua.. (1996).
- Doña. H y Canales. J**, " Secado de Productos Perecederos con Energía Solar" , Primer Caso: Pescado. Trabajo de investigación DINOT. UNI- RUPAP. Managua. Pág 29. (1992).

Espinosa. R, " Obtaining of Ginger Oleoresin in Nicaraguan", Annual Report To SAREC, Facultad de Ingeniería Química. UNI. Managua. Nicaragua.. (1989).

Ezeike G. O, I, "Development and Performance of a Triple- Pass Solar Collector and Dryer System" en Energy in Agriculture, Vol.5. A.S Mujumdar, Pág 1-20. (1986).

Geankoplis. Ch, Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, Secado de Materiales de Proceso. Cap 7. Ed Continental S.A. México. (1986).

Góngora R. M, Deshidratación de la Cebolla Criolla por Convección. Trabajo de Tesis, Facultad de Ingeniería Química, UNI. Pág 8. Managua. Nicaragua. (1988).

Govindajaran. V, S, Ginger-Chemistry, Technology and Quality Evaluation, CRC Crit. Rev. in Food Sci and Nutrition. Vol.17. Cap.1. (1982).

Guenther. E, The Essential Oils, Vol 5, pág 111. D. Van Nostrand Company Inc. New York. (1952).

Gutiérrez J. C, Diseño General de una Maquina Secadora de la Semilla de Tempate. Trabajo de Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, UNI. Managua. Nicaragua. (1994).

ICAITI, Secador para Cacao y granos Solar-Combustión. (1987).

Incer B. J, Geografía Dinámica de Nicaragua (Tomo I). Ed Hispamer. Nicaragua. 1991.

Jarquín. M, Determinación de las Curvas Características de Secado de Algunas Especies de Arboles Maderables de Nicaragua. Trabajo de Tesis, Facultad de Ingeniería Química, UNI. Managua. Nicaragua.. (1996).

Lawrence B. M, et al, Major tropical Spices-Ginger (Zingiber Officinale Rosc.), Perfumer & Flavorist, Vol.9, Cap.5. North Carolina. (1984).

Leverington R. E, Ginger Technology, Food Technology In Australia. Aifst Convention Paper' 74, Vol.27, Cap.8. (1975).

Lopéz. R, Diseño y Construcción de un Colector Solar Experimental. Trabajo de investigación. Universidad Autonoma Metropolitana- Azcapotzalco. Mexico. (1986).

Manrique. J, A, Energía Solar, Fundamentos y Aplicaciones Fototérmicas, Cap 4 y 5. Ed Harla S.A de C.V. México. (1990).

Meel D. A, V, Cinética de Secado para Materiales Higróscopicos. Ed Ratti C y Crapiste G.H. 6^{to} Congreso Interamericano de Ingeniería Química. Argentina (1991).

Moreira. R, Villate. J, E y Sereno. A, Shrinkage of Apple Slice During Drying by Warm Air Convection and Freeze Drying, Proceedings of 11th International Drying Symposium (IDS' 98) Halkidiki, Greece, August 19-22, 1998, vol B, pp. 1108-1114.

Mujumdar. A, S, Advances in Drying, Vol 4, Cap 6. Ed Hemisphere Publishing Corporation. United States of America. (1987).

Mujumdar. A, S, Handbook of Industrial Drying, Cap 11. Ed Marcel Dekker. United States of America. (1987).

Natarajan. C, P, et al, Chemical Composition of Ginger Varieties and Dehydration Studies on Ginger, Journal Of Food Science And Technology, Vol.9, Cap 10. (1972).

Nonhebel. G, El Secado de Sólidos en la Industria Química. Ed Reverté. Pág 13-31. España. (1979).

Ramírez. W, "Lixiviación a Contracorriente en un Extractor por Lotes, para Obtener Aceite e Insecticida de Nim a Escala Piloto". Trabajo de Tesis. Facultad De Ingeniería Química. UNI. Managua. Nicaragua, pp 18-21. (1996).

Sanchez. L, "Determinación de Curva Característica de Secado de Algunos Vegetales de Importancia Comercial". Trabajo de Tesis. Facultad De Ingeniería Química. UNI. Managua. Nicaragua, pp. 1, 6, 11, 13, 19, 21, 25, 26. (1992).

Scanlin. D, Renner. M, Domermuth. D y Moody. H, "Improving Solar Food Dryers" en Homepower #69 (February/ March 1999).

Sonntag. R, Borgnakke. C y Van. W, G, Fundamentals of Thermodynamics. Ed John Wiley & Sons, Inc. U.S.A. (1998).

Stehli. D y Escher. F, "Design and Continuous Operation of a Solar Convection Dryer with an Auxiliary Heating System" en Drying Technology, Vol.8, N° 2. A.S Mujumdar, Pág 241-260. (1990).

Strumillo. C y Kudra. T, Drying: Principles Applications And Design, Vol.3, Cap.1 y 5. Ed Gordon & Breach. (1986).

Treybal. R, Operaciones de transferencia de masa 2/e. McGraw-Hill/Interamericana de México, S.A. de C.V. (1988).

Welty. J, Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería. Cap 6. Ed LIMUSA. México. (1992).

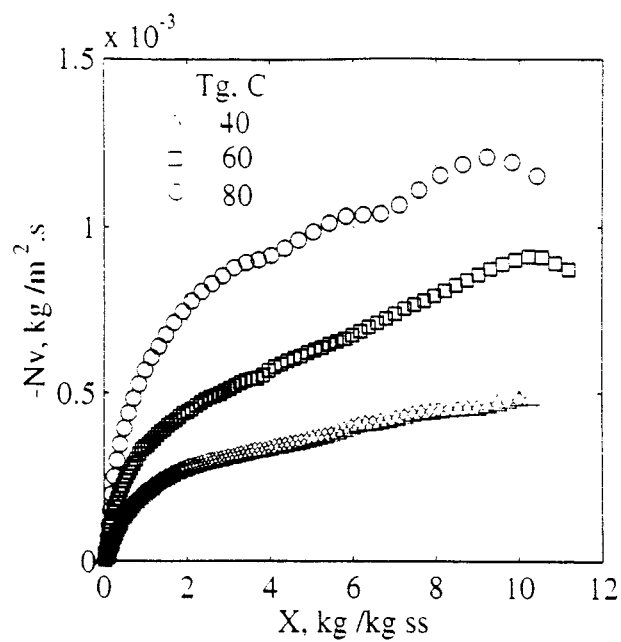
Referencias Personales

- [Eke] Ing. Janja Eke. Asociación de Raíces y tubérculos de Matagalpa, Nicaragua.
- [Kinne] Ing. Susan Kinne. Tecnosolución (Proyecto Fénix), UNI, Nicaragua.
- [Komp] Dr. Richard Komp. Maine Solar Energy Association, Maine, Estados Unidos.

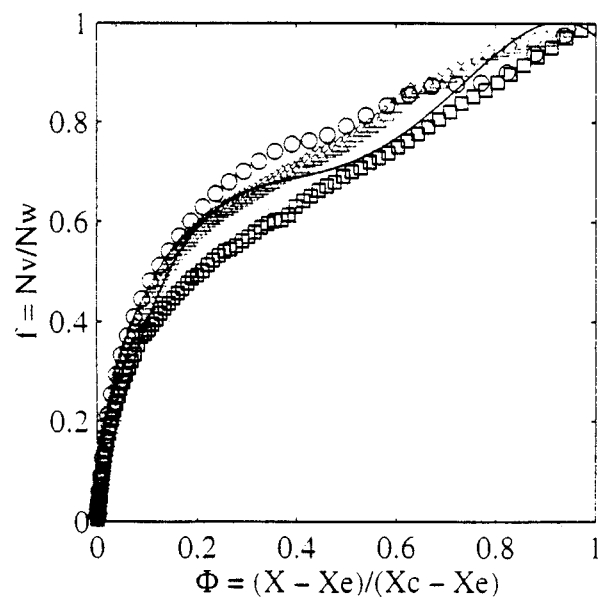
X. APENDICES

APENDICE A

**Curvas Experimentales de Velocidad Secado,
Característica de Secado y Temperatura del
Sólido Empleando Aire Seco y Aire Húmedo.**



(a)



(b)

Fig. A-1. Resultados Experimentales de la Cinética de Secado del Sistema Agua-Jengibre Utilizando Aire Seco.

(a) Curva de velocidad de secado. (b) Curva característica de secado.

— Ajuste de la curva característica de secado

$$f = -8.8163\Phi^4 + 20.0166\Phi^3 - 15.4952\Phi^2 + 5.2620\Phi - 0.0072$$

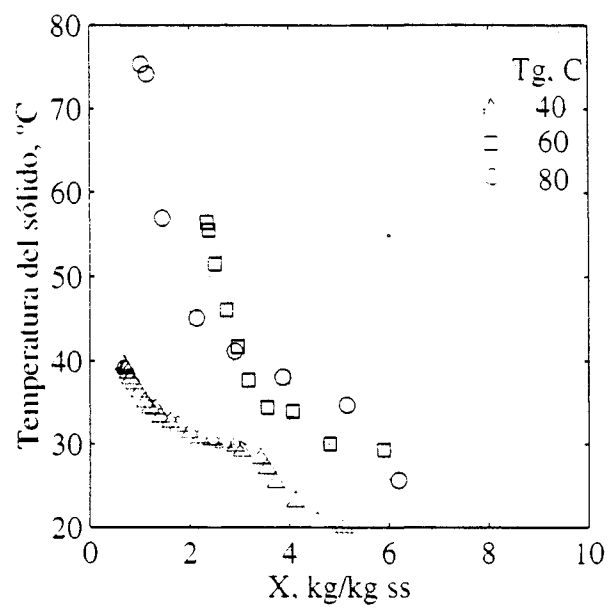
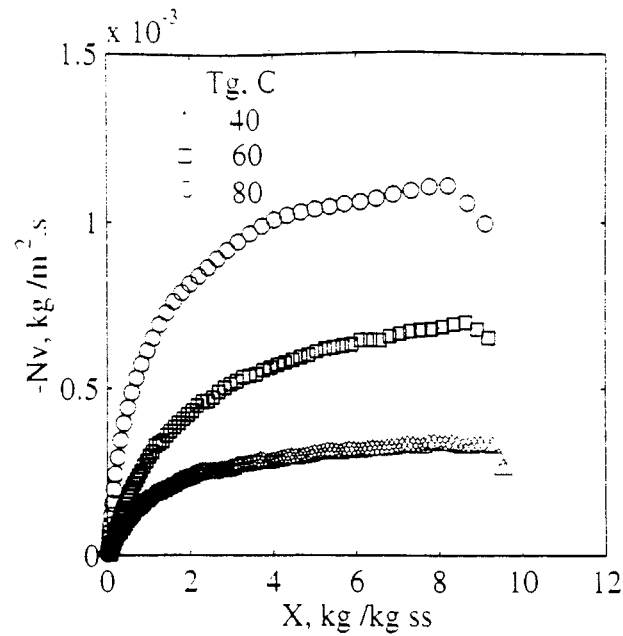
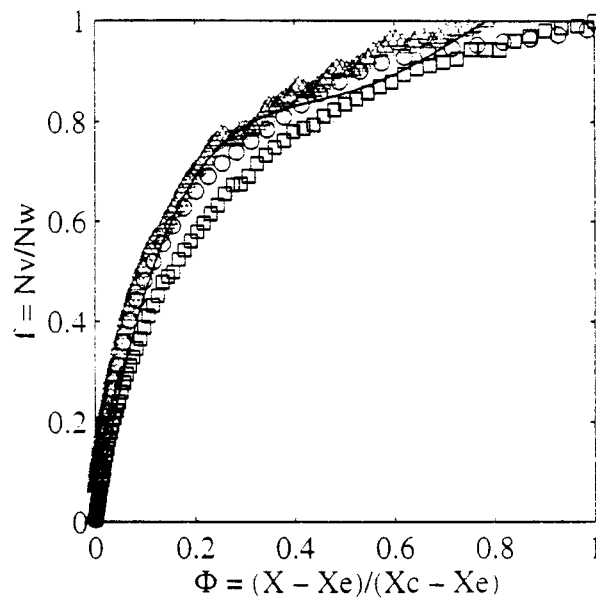


Fig. A-2. Resultados Experimentales de la Variación de la Temperatura del Sólido Utilizando Aire Seco.



(a)



(b)

Fig. A-3. Resultados Experimentales de la Cinética de Secado del Sistema Agua-Jengibre Utilizando Aire Húmedo.

(a) Curva de velocidad de secado. (b) Curva característica de secado.

Temperatura del aire, °C

Ecuación de la curva (a)

40°C	$-4.81 \times 10^{-5} X^4 + 2.74 \times 10^{-4} X^3 - 8.10 \times 10^{-4} X^2 - 1.26 \times 10^{-3} X - 9.43 \times 10^{-6}$
60°C	$-1.38 \times 10^{-5} X^4 + 8.03 \times 10^{-5} X^3 - 2.60 \times 10^{-4} X^2 - 5.24 \times 10^{-4} X - 3.31 \times 10^{-5}$
80°C	$-7.50 \times 10^{-6} X^4 + 4.39 \times 10^{-5} X^3 - 1.42 \times 10^{-4} X^2 - 2.70 \times 10^{-4} X + 5.98 \times 10^{-6}$

— Ajuste de la curva característica de secado

$$f = -8.4839\Phi^4 + 19.7043\Phi^3 - 16.1636\Phi^2 + 5.9145\Phi - 0.0075$$

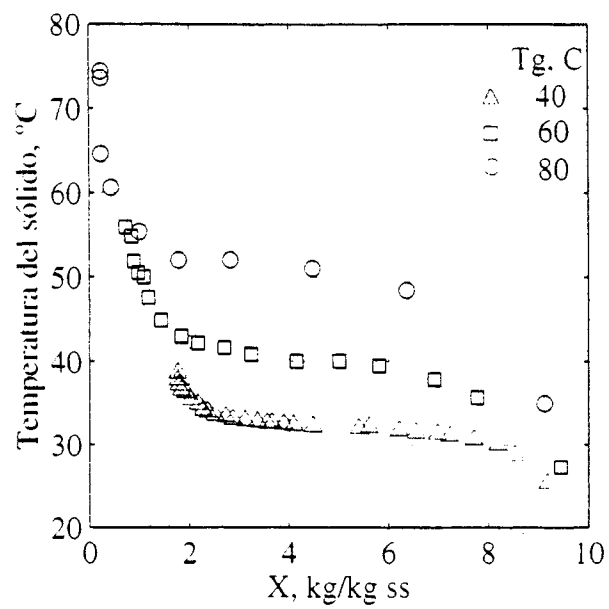
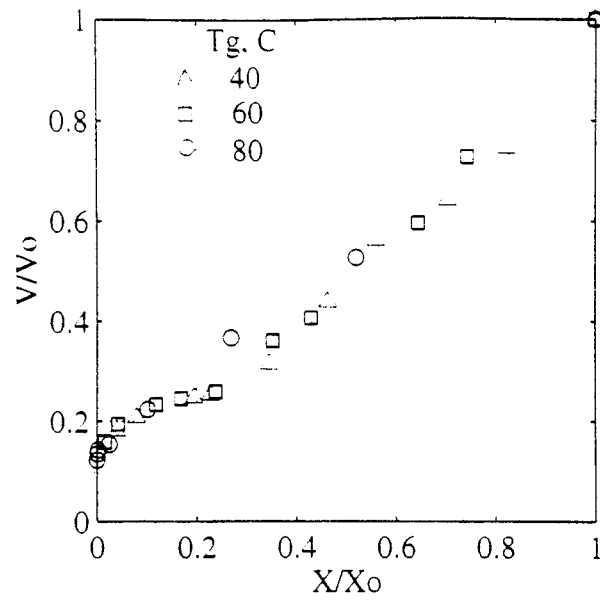


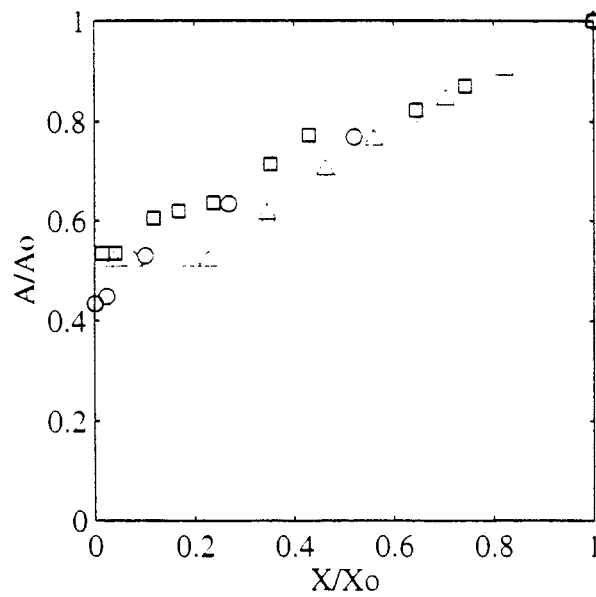
Fig. A-4. Resultados Experimentales de la Variación de la Temperatura del Sólido Utilizando Aire Húmedo.

APENDICE B

**Curvas Experimentales de la Variación Volumétrica
de las Rodajas de Jengibre Empleando Cortes
Transversal y Longitudinal.**



(a)



(b)

Fig. B-1. Resultados Experimentales de la Variación Volumétrica de las Rodajas de Jengibre. Tipo de Corte de la Rodaja: Transversal.

(a) Curva de la variación de volumen, (b) Curva de la variación del área.

Temperatura del aire, °C

40°C

60°C

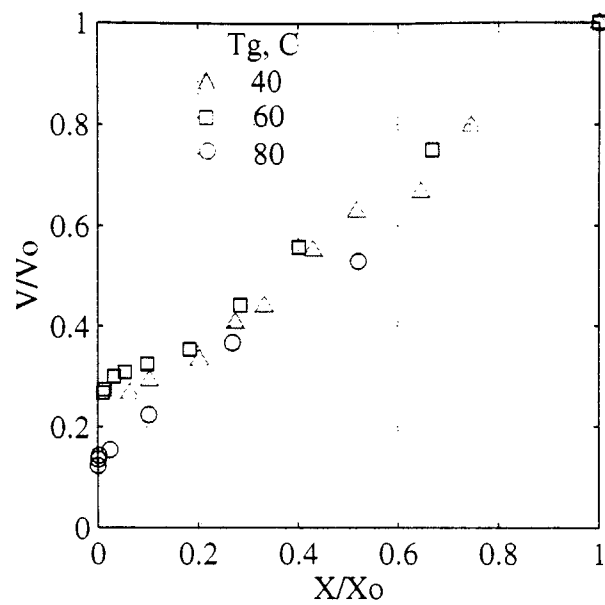
80°C

Ecuación de la curva (b)

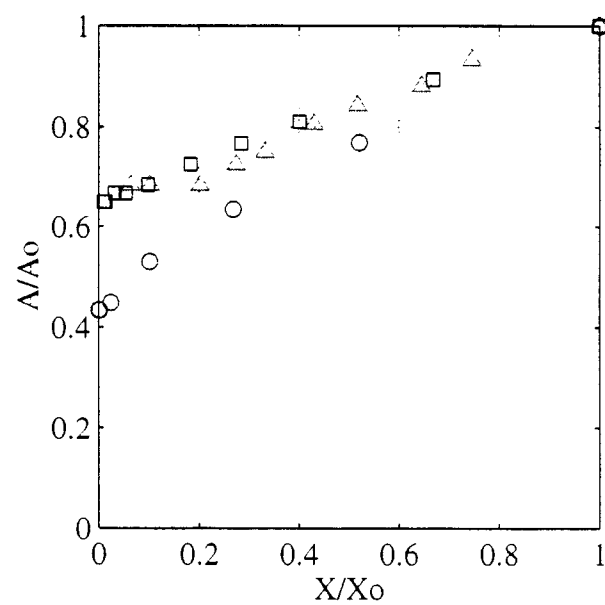
$A_s = 0.611 (A_{s0}/X_0) X + 0.405 A_{s0}$

$A_s = 0.468 (A_{s0}/X_0) X + 0.542 A_{s0}$

$A_s = 0.562 (A_{s0}/X_0) X + 0.457 A_{s0}$



(a)



(b)

Fig. B-2. Resultados Experimentales de la Variación Volumétrica de las Rodajas de Jengibre. Tipo de Corte de la Rodaja: Longitudinal.
(a) Curva de la variación de volumen, (b) Curva de la variación del área.

APENDICE C

Cálculos del Diseño del Colector Solar

1. VARIABLES DE DISEÑO REQUERIDAS

Las condiciones del aire de secado para cada temperatura de operación se resumen en la Tabla F.1.

Tabla F.1. Propiedades del aire de secado a 60°C y 80°C.

Propiedades del Aire	Temperatura de Operación (°C)		Temperatura Promedio (°C)	
	80	60	48	70
T_s (°C)	38	42	—	—
T_{oc} (°C)	60	60	—	—
T_{prom} (°C)	49	51	—	—
λ_a (kJ/kg)	2411.5	2406.6	—	—
C_{p_a} (kJ/kg °C)	1.0070	1.0072	1.0071	—
ρ_a (kg/m ³)	1.0985	1.0949	—	1.0231

2. CÁLCULO DEL ÁREA TEÓRICA DEL COLECTOR SOLAR

Para realizar el cálculo del área teórica del colector, fué necesario calcular la cantidad de agua que se debía evaporar del sólido, propiedades del aire de secado, irradiación total incidente en el colector por unidad de área y las temperaturas de entrada y salida del colector solar. El cálculo de la masa de agua evaporada (W_w), se realizó con la ecuación 3.9; desde una humedad inicial de 90% hasta una humedad final de 10%. Según resultados experimentales de determinación de carga másica de jengibre por bandeja detallado en la sección 4.2.3, se determinó que la carga másica de jengibre en cada bandeja del secador es 2 kg.

$$W_w = 2\text{kg} * 0.90$$

$$W_w = 1.8 \text{ kg}$$

Para la determinación del calor latente de vaporización (λ), se determinó la temperatura de saturación para cada temperatura de operación del equipo, haciendo uso de los gráficos de curva experimentales de temperatura del sólido para aire húmedo. La temperatura de saturación correspondiente a las temperaturas de 60°C y 80°C. A partir de lo cual se determinó el calor latente de vaporización para cada temperatura de saturación a como aparecen detallados en la Tabla F.1.

El valor de la radiación incidente total por unidad de área en el colector solar, se determino en la Tabla E-3, para la ciudad de Managua. El valor determinado corresponde al promedio a lo largo del año, siendo éste de 863.1063 kJ/m²h. La eficiencia teórica, para el diseño del colector se asumió de 70%, según rango de valores teóricos detallados en la sección 3.6.3.2. Por tal razón, en el cálculo del calor útil no se consideran las pérdidas de calor al ambiente. Se fijó un valor de temperatura de 60°C, a la salida del colector. Ya que se

considero que la energía requerida por el secador, a la temperatura de operación de 60°C, la suministra el colector solar. La temperatura inicial a la cual entra el aire al colector solar se determinó a partir de la Tabla E-4.

El cálculo del tiempo de secado, se realizó para una rodaja de jengibre con corte transversal en un secador de túnel para líquido a escala laboratorio; para las temperaturas de operación del equipo de 60°C y 80°C. Con un flujo de aire húmedo perpendicular a la muestra de material. Utilizando la ecuación 3.5 y siguiendo la metodología detallada en el sección 4.2.4.2. Los valores de W_s , X_c y las correspondientes ecuaciones para N_v y $A(X)$, aparecen detallados en las Tablas experimentales de cinética de secado para aire húmedo G-5 y G-6. Los valores de tiempo de secado son de 2h y 4h respectivamente.

$$t =$$

$$3.778 \times 10^{-4} \int_{0.10}^9 \frac{dx}{(1.20 \times 10^{-4} X + 8.89 \times 10^{-4})(-7.5 \times 10^{-6} X^4 + 4.39 \times 10^{-5} X^3 - 1.42 \times 10^{-4} X + 5.98 \times 10^{-6})}$$

$$t = 2h$$

El área teórica del colector solar diseñado corresponde al valor de 2 m²:

$$A_c = \frac{1.8 \text{ kg} * 2406.6 \text{ kJ/kg}}{863.1063 \text{ kJ/m}^2\text{h} * 0.7 * 4h}$$

$$A_c = 2 \text{ m}^2$$

3. CÁLCULO DEL FLUJO MÁSICO DE AIRE

Se realizó el cálculo del flujo másico de agua evaporada del jengibre, basado en las temperaturas de operación del secador; para lo cual se utilizó la ecuación 4.1. Los valores obtenidos corresponden a $5.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ y $1.67 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ respectivamente.

$$m_a = \frac{1.8 \text{ kg}}{1 \text{ h}}$$

$$m_a = 1.8 \text{ kg/h} = 5.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

Los valores correspondientes a C_{p_a} y ρ_a , aparecen detallados en la Tabla F.1. El cálculo del flujo másico del aire de secado, se realizó a partir de la ecuación 3.12. Se obtuvo los valores de $3.7416 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$ y $1.2471 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$, para las temperaturas de 60°C y 80°C respectivamente.

$$\dot{m}_a = \frac{5.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s} * 2411.5 \text{ kJ/kg}}{1.0070 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} * (60 - 28) ^{\circ}\text{C}}$$

$$\dot{m}_a = 3.7416 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$$

4. CÁLCULOS ENERGETICOS EN EL SECADOR HÍBRIDO

4.1 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA REQUERIDA PARA EVAPORAR LA HUMEDAD DEL MATERIAL, A LAS TEMPERATURAS DE 60°C Y 80°C.

Utilizando la ecuación 4.2, se obtienen el calor requerido para evaporar el agua del material desde una humedad inicial de 90% hasta una humedad final de 10%. Se obtuvo los valores de 1.20 kW y 0.40 kW respectivamente.

$$Q_v = 5.0 \times 10^{-4} \text{ kg/s} * 2411.3 \text{ kJ/kg}$$

$$Q_v = 1.2 \text{ kW}$$

4.2 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALOR GENERADO POR EL COLECTOR SOLAR (CALOR ÚTIL)

Para cálculo del calor útil generado por el colector solar, se utilizo la ecuación 3.13., se obtuvo el calor generado por el colector solar:

$$Q_u = 1.2471 \times 10^{-2} \text{ kg/s} * 1.0072 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C} * (60 - 28) ^{\circ}\text{C}$$

$$Q_u = 0.40 \text{ kW}$$

4.3 CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALOR GENERADO POR LA CÁMARA DE RESISTENCIAS

Para cálculo del calor generado por la resistencia, se utilizo la ecuación 4.3. Se obtuvo la cantidad de calor generado por la resistencia:

$$Q_R = 1.20 \text{ kW} - 0.40 \text{ kW}$$

$$Q_R = 0.80 \text{ kW}$$

4.4 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR EN EL COLECTOR SOLAR

Para cálculo de las pérdidas de calor en el colector solar, se utilizó la ecuación 4.4. Se obtuvo el calor perdido en el colector, lo cual incluye tanto las pérdidas de calor debido a la cubierta, placa de absorción y coraza. El valor del producto transmitancia-absortancia se determinó a partir de la Tabla E-5.

$$Q_p = [239.7517 \text{ W/m}^2 * 2 \text{ m}^2 * (0.88)] - 400 \text{ W}$$

$$Q_p = 21 \text{ W} = 0.21 \text{ kW}$$

5. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR

Para el cálculo de la eficiencia del colector solar que se diseñó, se hizo uso de la ecuación 3.14. Se obtuvo la eficiencia del colector solar.

$$\eta = \frac{400 \text{ W}}{239.75 \text{ W/m}^2 * 2 \text{ m}^2}$$

$$\eta = 83 \%$$

6. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL AIRE CON CONVECCIÓN NATURAL

Para el cálculo de la velocidad del aire, se utilizó la ecuación 4.5. Se requirió realizar el cálculo del flujo volumétrico y establecer un área transversal de la cámara de secado. El cálculo del flujo volumétrico se realizó a partir de la ecuación 4.6, con lo cual se obtuvo un flujo volumétrico promedio. Debido a que el equipo trabaja con dos temperaturas, se promedió el flujo másico de aire obtenido para ambas temperaturas, siendo de $2.4944 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$. Se determinó la densidad del aire a la temperatura promedio de operación del equipo, a como aparece en la Tabla F.1.

$$v_a = \frac{2.4944 \times 10^{-2} \text{ kg/s}}{1.0231 \text{ kg/m}^3}$$

$$v_a = 2.4380 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

Se fijó un valor de 0.66 m^2 de área transversal de la cámara de secado, para el cálculo de la velocidad del aire que atraviesa la cámara de secado.

$$v_a = \frac{2.4380 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}}{0.66 \text{ m}^2}$$

$$v_a = 0.040 \text{ m/s}$$

APENDICE D

**Proceso de Secado del Jengibre en la Carta
Psicrométrica.**

Para comprender el proceso de secado del jengibre que se lleva a cabo en el secador híbrido, se hace necesario representarlo en la carta psicrométrica. La representación se hace basada en aspectos teóricos expuestos en la sección 3.3, referidos al proceso de secado.

El esquema del proceso de secado de jengibre en la carta psicrométrica, es mostrado en la Figura D.1. En el punto A tenemos las condiciones iniciales del proceso o condiciones de entrada del aire al colector solar. En la línea A-B el aire húmedo es calentado sin la adición o remoción de agua, desde una temperatura de inicial (T_A) hasta la temperatura T_B ; con las dos fuentes de calor del secador híbrido operando. La humedad relativa decrece y la humedad Y_B permanece constante; éste calentamiento del aire es usado para remover la humedad así como en aumentar la temperatura del sólido. La línea B-C muestra el enfriamiento del aire, debido a la transferencia de masa y calor con el sólido, a una temperatura de bulbo húmedo y entalpía constante. La temperatura del aire de salida es T_C . La línea B-D muestra el enfriamiento que se produce en el proceso, al descender la temperatura del aire de secado desde una temperatura T_B hasta la temperatura T_D . Debido que el secador híbrido entra en una segunda etapa de calentamiento con una temperatura T_D ; operación que se lleva a cabo únicamente con el colector solar. La humedad se mantiene constante (Y_B) y la humedad relativa aumenta. Aunque se produce un enfriamiento en ésta etapa del proceso, es más conveniente considerarla como una segunda etapa de calentamiento a una menor temperatura. El proceso de evaporación continua sólo que a menor velocidad que en la etapa inicial. La cual puede ser seguida en la línea D-E a temperatura de bulbo húmedo y entalpía constante. La temperatura de salida del aire de secado en esta etapa decrece hasta la temperatura T_E y la humedad del aire es Y_E .

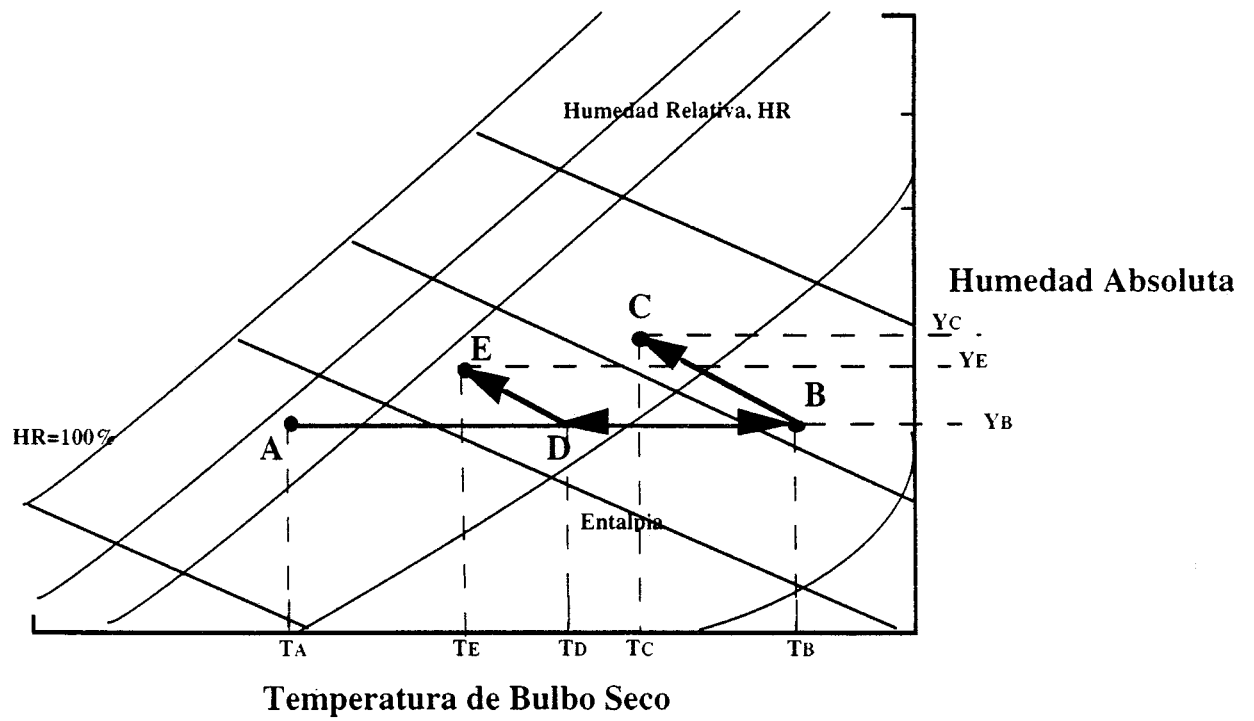


Figura D-1. Esquema del proceso de secado del jengibre en el secador híbrido.

APENDICE E

**Tablas de la Literatura Empleada para el Diseño del
Colector Solar.**

Tabla E-1 Propiedades del vapor saturado: Tabla de temperatura (Unidades SI).
Tomado (Sonntag et al, 1998).

<i>Saturated Water</i>							
Temp.	Press.	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg K		
C <i>T</i>	kPa <i>P</i>	Sat. Liquid <i>h_f</i>	Evap. <i>h_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>h_g</i>	Sat. Liquid <i>s_f</i>	Evap. <i>s_{fg}</i>	Sat. Vapor <i>s_g</i>
0.01	0.6113	0.00	2501.35	2501.35	0	9.1562	9.1562
5	0.8721	20.98	2489.57	2510.54	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	41.99	2477.75	2519.74	0.1510	8.7498	8.9007
15	1.705	62.98	2465.93	2528.91	0.2245	8.5569	8.7813
20	2.339	83.94	2454.12	2538.06	0.2966	8.3706	8.6671
25	3.169	104.87	2442.30	2547.17	0.3673	8.1905	8.5579
30	4.246	125.77	2430.48	2556.25	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	146.66	2418.62	2565.28	0.5052	7.8478	8.3530
40	7.384	167.54	2406.72	2574.26	0.5724	7.6845	8.2569
45	9.593	188.42	2394.77	2583.19	0.6386	7.5261	8.1647
50	12.350	209.31	2382.75	2592.06	0.7037	7.3725	8.0762
55	15.758	230.20	2370.66	2600.86	0.7679	7.2234	7.9912
60	19.941	251.11	2358.48	2609.59	0.8311	7.0784	7.9095
65	25.03	272.03	2346.21	2618.24	0.8934	6.9375	7.8309
70	31.19	292.96	2333.85	2626.80	0.9548	6.8004	7.7552
75	38.58	313.91	2321.37	2635.28	1.0154	6.6670	7.6824
80	47.39	334.88	2308.77	2643.66	1.0752	6.5369	7.6121
85	57.83	355.88	2296.05	2651.93	1.1342	6.4102	7.5444
90	70.14	376.90	2283.19	2660.09	1.1924	6.2866	7.4790
95	84.55	397.94	2270.19	2668.13	1.2500	6.1659	7.4158
100	101.3	419.02	2257.03	2676.05	1.3068	6.0480	7.3548
105	120.8	440.13	2243.70	2683.83	1.3629	5.9328	7.2958
110	143.3	461.27	2230.20	2691.47	1.4184	5.8202	7.2386
115	169.1	482.46	2216.50	2698.96	1.4733	5.7100	7.1832
120	198.5	503.69	2202.61	2706.30	1.5275	5.6020	7.1295
125	232.1	524.96	2188.50	2713.46	1.5812	5.4962	7.0774
130	270.1	546.29	2174.16	2720.46	1.6343	5.3925	7.0269
135	313.0	567.67	2159.59	2727.26	1.6869	5.2907	6.9777
140	361.3	589.11	2144.75	2733.87	1.7390	5.1908	6.9298
145	415.4	610.61	2129.65	2740.26	1.7906	5.0926	6.8832
150	475.9	632.18	2114.26	2746.44	1.8417	4.9960	6.8378
155	543.1	653.82	2098.56	2752.39	1.8924	4.9010	6.7934
160	617.8	675.53	2082.55	2758.09	1.9426	4.8075	6.7501
165	700.5	697.32	2066.20	2763.53	1.9924	4.7153	6.7078
170	791.7	719.20	2049.50	2768.70	2.0418	4.6244	6.6663
175	892.0	741.16	2032.42	2773.58	2.0909	4.5347	6.6256
180	1002.2	763.21	2014.96	2778.16	2.1395	4.4461	6.5857
185	1122.7	785.36	1997.07	2782.43	2.1878	4.3586	6.5464
190	1254.4	807.61	1978.76	2786.37	2.2358	4.2720	6.5078

Tabla E-2. Propiedades útiles del aire para la transferencia de calor por convección
Tomado (Batty y Folkman, 1990).

$T, ^\circ K$	ρ kg/m^3	C_p $kJ/kg \cdot ^\circ C$	μ $kg/m \cdot s \times 10^4$	ν $m^2/s \times 10^6$	k $W/m \cdot ^\circ C$	α $m^2/s \times 10^4$	Pr
100	3.6010	1.0266	0.6924	1.923	0.009246	0.02501	0.770
150	2.3675	1.0099	1.0283	4.343	0.013735	0.05745	0.753
200	1.7684	1.0061	1.3289	7.490	0.01809	0.10165	0.739
250	1.4128	1.0053	1.488	9.49	0.02227	0.13161	0.722
300	1.1774	1.0057	1.983	15.68	0.02624	0.22160	0.708
350	0.9980	1.0090	2.075	20.76	0.03003	0.2983	0.697
400	0.8826	1.0140	2.286	25.90	0.03365	0.3760	0.689
450	0.7833	1.0207	2.484	28.86	0.03707	0.4222	0.683
500	0.7048	1.0295	2.671	37.90	0.04038	0.5564	0.680
550	0.6423	1.0392	2.848	44.34	0.04360	0.6532	0.680
600	0.5879	1.0551	3.018	51.34	0.04659	0.7512	0.680
650	0.5430	1.0635	3.177	58.51	0.04953	0.8578	0.682
700	0.5030	1.0752	3.332	66.25	0.05230	0.9672	0.684
750	0.4709	1.0856	3.481	73.91	0.05509	1.0774	0.686
800	0.4405	1.0978	3.625	82.29	0.05779	1.1951	0.689
850	0.4149	1.1095	3.765	90.75	0.06028	1.3097	0.692
900	0.3925	1.1212	3.899	99.3	0.06279	1.4271	0.696
950	0.3716	1.1321	4.023	108.2	0.06525	1.5510	0.699
1000	0.3524	1.1417	4.152	117.8	0.06752	1.6779	0.702
1100	0.3204	1.160	4.44	138.6	0.0732	1.969	0.704
1200	0.2947	1.179	4.69	159.1	0.0782	2.251	0.707
1300	0.2707	1.197	4.93	182.1	0.0837	2.583	0.705
1400	0.2515	1.214	5.17	205.5	0.0891	2.920	0.705
1500	0.2355	1.230	5.40	229.1	0.0946	3.262	0.705
1600	0.2211	1.248	5.63	254.5	0.100	3.609	0.705
1700	0.2082	1.267	5.85	280.5	0.105	3.977	0.705
1800	0.1970	1.287	6.07	308.1	0.111	4.379	0.704
1900	0.1858	1.309	6.29	338.5	0.117	4.811	0.704
2000	0.1762	1.338	6.50	369.0	0.124	5.260	0.702
2100	0.1682	1.372	6.72	399.6	0.131	5.715	0.700
2200	0.1602	1.419	6.93	432.6	0.139	6.120	0.707
2300	0.1538	1.482	7.14	464.0	0.149	6.540	0.710
2400	0.1458	1.574	7.35	504.0	0.161	7.020	0.718
2500	0.1394	1.688	7.57	543.5	0.175	7.441	0.730

Tabla E-3. Energía en kWh que incide por m² de superficie horizontal en un día medio del mes en Nicaragua. (Delagneau y Osorno, 1996).

	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
1 San Carlos	4.3	4.95	5.7	5.5	4.975	4.3	3.85	4.2	4.4	4.3	4.1	3.8	4.53
2 El Rama	4.0	4.95	5.7	5.7	4.975	4.4	3.85	4.2	4.4	4.3	4.1	3.8	4.53
3 Villa Sandino	4.0	4.95	5.7	5.85	5.05	4.5	3.85	4.2	4.8	4.7	4.5	4.1	4.72
4 Jucaltepe	4.9	5.25	6.0	5.85	5.2	4.7	4.55	4.8	5.0	4.9	4.7	4.4	5.02
5 Rivas	5.5	6.15	6.6	6.15	5.35	4.8	4.9	5.0	5.0	4.9	4.7	4.7	5.31
6 Mesetape	5.5	5.85	6.3	6.15	5.35	5.0	4.9	5.2	5.2	4.9	4.7	4.7	5.31
7 Managua	5.2	5.85	6.3	6.15	5.425	5.0	4.9	5.4	5.2	4.9	4.7	4.7	5.31
8 Nacatofo	5.2	5.85	6.3	6.0	5.35	5.1	5.25	5.4	5.0	4.9	4.7	4.7	5.31
9 Chinandega	5.2	5.05	6.3	5.85	5.35	5.1	5.26	5.4	4.8	5.0	4.7	4.7	5.29
10 Ocotitlan	4.6	5.25	5.7	5.85	5.275	5.2	4.9	6.4	5.2	4.9	4.5	4.4	5.1
11 Jinotega	4.9	5.25	6.0	5.85	5.275	5.0	4.9	5.4	5.2	4.9	4.7	4.7	5.17
12 Muy Muy	4.6	5.25	6.0	5.7	5.125	4.7	4.55	5.0	5.0	4.7	4.5	4.4	4.96
13 Soto	4.0	4.65	5.1	5.4	4.975	4.4	3.85	4.2	4.2	4.1	3.9	3.8	4.38
14 Pto. Cabeza	3.7	4.65	5.1	5.55	4.9	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.9	3.8	4.43
15 Bluefield	4.0	4.95	5.7	5.85	5.05	4.4	4.2	4.4	4.4	4.3	4.1	3.8	4.6
16 Granada	5.2	5.85	6.3	6.15	5.35	4.8	4.9	5.2	5.2	4.9	4.7	4.7	5.27
17 Matagalpa	4.9	5.55	6.3	6.0	5.35	4.8	4.9	5.2	5.2	4.9	4.7	4.7	5.21
18 Morito	4.6	5.25	6.0	5.85	5.2	4.5	4.2	4.4	4.8	4.7	4.5	4.1	4.84
19 Cardenas	5.2	5.85	6.3	6.15	5.275	4.7	4.9	4.8	4.8	4.7	4.5	4.7	5.16
20 Punta Corda	4.0	4.85	5.7	5.85	5.05	4.3	4.2	4.4	4.4	4.3	4.1	3.8	4.59
21 Marshall Point	4.0	4.95	5.7	5.7	5.05	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.9	3.8	4.55
22 Pto. Isabel	4.0	4.65	5.4	5.55	5.05	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.9	3.8	4.49
23 Sunday Bay	3.7	4.05	5.1	5.55	4.975	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.9	3.8	4.43
24 Atlantico Interior	4.0	4.65	5.4	5.55	5.05	4.4	3.85	4.2	4.2	4.1	3.9	3.8	4.43
25 Tungle	4.0	4.65	5.4	5.55	5.05	4.4	3.85	4.2	4.2	4.1	3.9	3.8	4.43
26 Tasbe Raye	3.7	4.65	5.1	5.55	4.975	4.4	4.2	4.4	4.4	4.1	3.7	3.8	4.42

Tabla E-4 Condiciones climatológicas de la ciudad de Managua para los años 1997-1998.
Tomado (INETER).

Meses	1997				1998			
	Temp.prom (°C)	Humedad Rel.(%)	Veloc.del Aire(m/s)	Temp.prom (°C)	Humedad Rel.(%)	Veloc.del Aire(m/s)	Temp.prom (°C)	Humedad Rel.(%)
Enero	25,70	70,00	1,30	27,40	66,50	3,05	27,40	66,50
Febrero	26,70	65,00	1,20	28,00	63,00	2,90	28,00	63,00
Marzo	27,60	61,00	2,00	28,80	60,00	3,10	28,80	60,00
Abril	28,70	62,00	2,00	30,30	55,00	1,70	30,30	55,00
Mayo	29,80	58,00	1,50	30,00	64,00	1,20	30,00	64,00
Junio	26,70	81,00	2,00	28,30	75,00	1,00	28,30	75,00
Julio	27,77	76,00	1,30	27,50	76,00	0,90	27,50	76,00
Agosto	27,70	76,00	1,20	27,80	78,00	1,00	27,80	78,00
Septiembre	27,70	78,00	1,00					
Octubre	26,10	80,00	0,70					
Noviembre	26,80	79,00	0,90					
Diciembre	26,80	68,00	1,40					

Tabla E-5. Parámetros típicos de colectores solares para diferentes números de cubiertas.
Tomado (Mujumdar, 1987).

Curve number	Solar transmittance at normal incidence	Effective transmittance absorptivity product at normal incidence	Heat loss coefficient U_L''	Efficiency factor F_r	Overall heat transfer coefficient	Flow factor F''	Heat removal efficiency $F_R = F_r F''$
a) No cover	1	0.90	3.9	0.506	1.975	0.2742	0.873
b) Single glass K = 0.2/inch	0.95	0.88	1.23	0.765	0.941	0.1306	0.935
c) K = 0.6/inch	0.86	0.83	1.23	0.765	0.941	0.1306	0.935
d) Single Tedlar	0.92	0.82	1.43	0.736	1.052	0.1461	0.929
e) Two glass K = 0.2/inch	0.81	0.78	0.781	0.837	0.654	0.0908	0.799
f) K = 0.6/inch	0.74	0.74	0.781	0.837	0.654	0.0908	0.799
g) One glass (K = 0.2/inch) over one Tedlar	0.83	0.79	0.924	0.812	0.750	0.1032	0.770
h) Two Tedlar	0.85	0.81	0.957	0.807	0.772	0.1072	0.764
i) Three glass K = 0.2/inch	0.74	0.73	0.572	0.874	0.50	0.0695	0.844
j) K = 0.6/inch	0.65	0.68	0.572	0.874	0.50	0.0695	0.844
k) One glass (K = 0.2/inch) over two Tedlar	0.77	0.74	0.638	0.862	0.55	0.0764	0.829

APENDICE F

Cálculos de Costos del Secador Híbrido.

COSTOS DE PRODUCCIÓN DEL JENGIBRE SECO POR LOTE DE SECADO EN EL SECADOR HIBRIDO.

1. COSTO DE MATERIA PRIMA

Según Eke (Referencia personal), el costo del kilogramo de jengibre fresco de exportación es de C\$ 1.7637; considerando que el costo del jengibre de rechazo es un tercio al de exportación sería igual a C\$ 0.5291. La carga másica del secador híbrido por lote de secado es de 10 kg. Se hizo uso de la ecuación 4.7, para el cálculo del costo de materia prima:

$$CMP = 10 \text{ kg/ lote} * \text{C\$ } 0.5291/\text{kg}$$

$$CMP = \text{C\$ } 5.291/\text{ lote}$$

2. COSTOS DE TRANSPORTE

Se determino de acuerdo a un porcentaje del costo total de la materia prima. se utilizo la ecuación 4.8, para el cálculo del costo de transporte (Ramirez, 1996):

$$CT = 0.05 * \text{C\$ } 5.291/\text{ lds}$$

$$CT = \text{C\$ } 0.2646/\text{ lote}$$

3. DEPRECIACIÓN LINEAL

Conociendo el precio del equipo que es C\$ 16556.77 (ver Tabla 5.19 y la vida útil promedio 7 años (Mujumdar, 1987). Las horas útil del secador híbrido es de 25200 hora. Se hizo uso de la ecuación 4.9, se obtuvo la depreciación lineal por lote de secado:

$$DL = (\text{C\$ } 16556.77 / 25200 \text{ h}) * 10 \text{ h/ lote}$$

$$DL = \text{C\$ } 6.570/\text{ lote}$$

4. COSTO DE MANO DE OBRA

Suponiendo que el operador trabajará 2h/ lote. El salario mínimo promedio para obreros en Nicaragua es de C\$ 450/ mes (MITRAB, Boletín de 1999). Utilizando la ecuación 4.10, se obtiene el costo de mano de obra por lote de secado:

$$CMO = \text{C\$ } 1.875/\text{ h} * 2 \text{ h útiles/ lote}$$

$$CMO = \text{C\$ } 3.75/\text{ lote}$$

5. COSTO DE CONSUMO DE ELÉCTRICIDAD POR LOTE DE SECADO

La cantidad de energía requerida por la resistencia para efectuar la operación de secado, durante un período de una hora es de 2.5002 kW (ver cálculos de diseño). Se utilizó la ecuación 4.12, para el cálculo del consumo de energía eléctrica (CER). Se consideró además que el secador trabaja el resto del tiempo con un tercio de la capacidad de la resistencia; se obtuvo el consumo de energía de la resistencia por lote de secado:

$$\text{CER} = 0.80 \text{ kW} * 1\text{h} + (1/3 * 0.80 \text{ kW}) * 2\text{h}$$

$$\text{CER} = 1.3333 \text{ kWh}$$

Según tabla de tarifas del servicio eléctrico de ENEL [Empresa Nicaraguense de Electricidad]. Para comercio menor es de C\$ 1.392/ kWh. Se hizo uso de la ecuación 4.11, se obtiene el costo de consumo de electricidad por lote de secado:

$$\text{CE} = 1.3333 \text{ kWh} * \text{C\$ } 1.392 / \text{ kWh}$$

$$\text{CE} = \text{C\$ } 1.856$$

6. DETERMINACIÓN DEL PRECIO PRODUCCIÓN DEL JENGIBRE SECO

Los costos totales de producción son de aproximadamente C\$ 17.73 (ver Tabla 5.2). La masa de jengibre seco producida por lote de secado en el secador híbrido en la ciudad de Managua es de aproximadamente 1 kg.

$$\text{PUI} = \frac{\text{C\$ } 17.73}{1\text{kg}}$$

$$\text{PUI} = \text{C\$ } 17.73 / \text{ kg}$$

APENDICE G

**Datos Experimentales de la Cinética de Secado
y de Temperatura del Sólido Empleando Aire Seco
y Aire Húmedo.**

Cinetica de Secado

Tiempo (min)	Masa (kg x 10 ³)	X (kg/kg ss)
0	3.8582	10.2813
1	3.8270	10.1900
2	3.7962	10.1000
3	3.7645	10.0073
4	3.7344	9.9194
5	3.7043	9.8314
6	3.6743	9.7435
7	3.6450	9.6580
8	3.6174	9.5773
9	3.5866	9.4871
10	3.5583	9.4043
11	3.5299	9.3214
12	3.5016	9.2386
15	3.4192	8.9978
18	3.3389	8.7628
21	3.2599	8.5319
24	3.1822	8.3047
27	3.1062	8.0826
30	3.0319	7.8652
33	2.9590	7.6521
36	2.8879	7.4441
39	2.8186	7.2416
42	2.7513	7.0446
45	2.6856	6.8527
48	2.6217	6.6659
51	2.5595	6.4840
54	2.4983	6.3050
57	2.4384	6.1299
60	2.3797	5.9583

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
65	2.2866	5.6860
70	2.1981	5.4271
75	2.1131	5.1786
80	2.0318	4.9408
85	1.9535	4.7121
90	1.8780	4.4912
95	1.8051	4.2781
100	1.7345	4.0716
105	1.6666	3.8730
110	1.6007	3.6805
115	1.5243	3.4570
120	1.4751	3.3131
130	1.3577	2.9700
140	1.2475	2.6478
150	1.1439	2.3446
160	1.0469	2.0612
170	0.9480	1.7718
180	0.8650	1.5292
195	0.7538	1.2040
210	0.6584	0.9252
225	0.5780	0.6902
240	0.5122	0.4977
255	0.5049	0.4762
270	0.4212	0.2316
285	0.3946	0.1537
300	0.3771	0.1026
315	0.3663	0.0711
330	0.3604	0.0538
345	0.3581	0.0470

W_s (kg x 10 ⁴)	X_o (kg/ kg ss)	X_c (kg/ kg ss)	X_e (kg/ kg ss)	$-Nw \times 10^{-4}$ (kg/m ² s)
3.4200	10.2813	9.7254	0.0471	5.0000

Tabla G-1 Datos Experimentales del Secado del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire
 Seco. T=40°C. Velocidad del aire= 1m/s. $A_{s0}=1.0892 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.
 $A_s= 1.2946 \times 10^{-4} X + 8.8225 \times 10^{-4}$

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
0	3.5274	11.1972
1	3.4819	11.0399
2	3.4359	10.8808
3	3.3895	10.7202
4	3.3430	10.5596
5	3.2966	10.3991
6	3.2502	10.2387
7	3.2047	10.0814
8	3.1592	9.9241
9	3.1150	9.7712
10	3.0708	9.6184
11	3.0278	9.4696
12	2.9848	9.3209
15	2.8612	8.8934
18	2.7426	8.4834
21	2.7427	8.4839
24	2.6304	8.0953
27	2.5224	7.7221
30	2.4196	7.3666
33	2.3204	7.0234
36	2.2262	6.6978
39	2.1356	6.3845
42	2.1363	6.3870
45	1.9656	5.7967
48	1.8856	5.5201

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
51	1.8079	5.2515
54	1.7331	4.9928
57	1.6605	4.7418
60	1.5908	4.5006
65	1.5230	4.2663
70	1.4157	3.8953
75	1.3157	3.5494
80	1.2199	3.2181
85	1.1292	2.9046
90	1.1328	2.9169
95	0.9621	2.3268
100	0.8858	2.0628
105	0.8136	1.8133
110	0.7464	1.5810
115	0.6837	1.3640
120	0.6255	1.1628
130	0.5719	0.9777
140	0.4778	0.6520
150	0.4052	0.4012
160	0.3531	0.2209
170	0.3218	0.1126
180	0.3068	0.0607
190	0.3009	0.0403
200	0.2982	0.0312
210	0.2968	0.0262

W_s (kg x 10 ⁴)	X_o (kg/ kg ss)	X_c (kg/ kg ss)	X_e (kg/ kg ss)	$-Nw \times 10^{-4}$ (kg/m ² s)
2.8920	11.1972	9.9018	0.0239	9.0000

Tabla G-2 Datos Experimentales del Secado del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Seco. T=60°C. Velocidad del aire= 1m/s. $A_{s0}=8.8000 \times 10^{-4} \text{m}^2$.
 $A_s = 7.3561 \times 10^{-5} X + 9.5392 \times 10^{-4}$

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
0	3.7261	10.4369
1	3.6610	10.2370
2	3.5959	10.0371
3	3.5308	9.8372
4	3.4652	9.6360
5	3.3997	9.4348
6	3.3341	9.2337
7	3.2716	9.0418
8	3.2091	8.8500
9	3.1466	8.6581
10	3.0874	8.4765
11	3.0282	8.2948
12	2.9688	8.1123
15	2.8026	7.6022
18	2.6482	7.1282
21	2.5033	6.6837
24	2.3641	6.2564
27	2.2281	5.8388
30	2.0977	5.4385
33	1.9741	5.0593
36	1.8568	4.6991

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
39	1.7453	4.3570
42	1.6395	4.0323
45	1.5384	3.7219
48	1.4406	3.4216
51	1.3460	3.1314
54	1.2562	2.8557
57	1.1709	2.5939
60	1.0899	2.3452
65	0.9648	1.9613
70	0.8518	1.6146
75	0.7507	1.3041
80	0.6617	1.0310
85	0.5837	0.7915
90	0.5169	0.5865
95	0.4626	0.4200
100	0.4192	0.2868
105	0.3868	0.1873
110	0.3668	0.1257
115	0.3553	0.0904
120	0.3497	0.0733
130	0.3464	0.0631

W_s (kg x 10 ⁴)	X_o (kg/ kg ss)	X_c (kg/ kg ss)	X_e (kg/ kg ss)	$-Nw$ x 10 ⁻³ (kg/m ² s)
3.2580	10.4369	8.6675	0.0629	1.2000

Tabla G-3 Datos Experimentales del Secado del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Seco. T=80°C. Velocidad del aire= 1m/s. $A_{s_0}=8.9518 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.
 $A_s = 9.6406 \times 10^{-5} X + 8.1822 \times 10^{-4}$

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
0	3.8483	9.5434
1	3.8340	9.5041
2	3.8197	9.4649
3	3.8054	9.4257
4	3.7878	9.3774
5	3.7701	9.3291
6	3.7525	9.2809
7	3.7172	9.1842
8	3.7349	9.2325
9	3.6996	9.1358
10	3.6819	9.0874
11	3.6642	9.0390
12	3.6466	8.9906
15	3.5945	8.8479
18	3.5431	8.7071
21	3.4926	8.5688
24	3.4424	8.4311
27	3.3915	8.2919
30	3.3410	8.1535
33	3.2417	7.8813
36	3.1919	7.7450
39	3.1437	7.613
42	3.0972	7.4854
45	3.0504	7.3573
48	3.0037	7.2293
51	2.9574	7.1025
54	2.9119	6.9779
57	2.8677	6.8568
60	2.8241	6.7373
65	2.7493	6.5324
70	2.7351	6.4933
75	2.6131	6.1591

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
80	2.5391	5.9564
85	2.4988	5.8459
90	2.4149	5.6163
95	2.3501	5.4387
100	2.2945	5.2863
105	2.2272	5.1018
110	2.1638	4.9281
115	2.1189	4.8051
120	2.0531	4.6249
130	1.9436	4.3249
140	1.8492	4.0662
150	1.7400	3.7670
160	1.6434	3.5026
170	1.5253	3.1788
180	1.4644	3.0120
195	1.3428	2.6790
210	1.2962	2.5511
225	1.1762	2.2225
240	1.0717	1.9362
255	0.9767	1.6759
270	0.8910	1.4411
285	0.8137	1.2292
300	0.7431	1.0359
315	0.6801	0.8632
330	0.6245	0.7109
345	0.5791	0.5866
360	0.5229	0.4325
375	0.4808	0.3172
390	0.4483	0.2282
405	0.4232	0.1594
420	0.4049	0.1092
435	0.3930	0.0768

W_s (kg x 10 ⁻⁴)	X_o (kg/ kg ss)	X_c (kg/ kg ss)	X_e (kg/ kg ss)	$-Nw \times 10^{-4}$ (kg/m ² s)
3.6500	9.5434	8.8438	0.0737	3.0000

Tabla G-4 Datos Experimentales del Secado del sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Húmedo. $T=40^{\circ}\text{C}$. Velocidad del aire= 1 m/s . $A_{s0}=9.0816 \times 10^{-4}\text{ m}^2$.
 $A_s = 1.1629 \times 10^{-4} X + 7.3560 \times 10^{-4}$

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
0	4.2177	9.1876
1	4.1804	9.0975
2	4.1431	9.0075
3	4.1058	8.9174
4	4.0666	8.8227
5	4.0274	8.7281
6	3.9883	8.6335
7	3.9498	8.5405
8	3.9113	8.4475
9	3.8728	8.3546
10	3.8353	8.2640
11	3.7978	8.1734
12	3.7603	8.0828
15	3.6507	7.8180
18	3.5432	7.5584
21	3.4374	7.3028
24	3.3341	7.0533
27	3.2333	6.8099
30	3.1348	6.5720
33	3.0403	6.3438
36	2.9442	6.1115
39	2.8522	5.8894
42	2.7621	5.6717
45	2.6738	5.4585
48	2.5873	5.2495
51	2.5023	5.0441
54	2.4202	4.8458
57	2.3399	4.6519
60	2.2616	4.4627

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
65	2.0508	3.9537
70	1.9387	3.6829
80	1.7195	3.1535
85	1.6286	2.9339
90	1.5230	2.6787
95	1.4262	2.4450
100	1.3489	2.2581
105	1.2607	2.0451
110	1.1369	1.7462
115	1.1111	1.6838
120	1.0415	1.5157
130	0.9192	1.2202
140	0.8222	0.9860
150	0.7244	0.7498
160	0.6525	0.5762
170	0.5849	0.4127
180	0.5498	0.3279
190	0.5161	0.2467
200	0.4930	0.1908
210	0.4911	0.1862
220	0.4747	0.1466
230	0.4656	0.1246
240	0.4594	0.1096
250	0.4551	0.0992
260	0.4522	0.0922
270	0.4490	0.0845
280	0.4476	0.0811
290	0.4472	0.0802

W_s (kg x 10 ⁴)	X_0 (kg/ kg ss)	X_c (kg/ kg ss)	X_e (kg/ kg ss)	$-Nw \times 10^{-4}$ (kg/m ² s)
4.1400 ✓	9.1876 ✓	8.3678	0.0804	7.0000

Tabla G-5 Datos Experimentales del Secado del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Húmedo. T=60°C. Velocidad del aire= 1m/s. $A_{s0}=9.6000 \times 10^{-4} \text{m}^2$.
 $A_s = 9.7801 \times 10^{-5} X + 1.0406 \times 10^{-3}$

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
0	3.8234	9.1203
1	3.7684	8.9745
2	3.7133	8.8287
3	3.6582	8.6830
4	3.5995	8.5274
5	3.5407	8.3718
6	3.4819	8.2162
7	3.4247	8.0649
8	3.3676	7.9137
9	3.3105	7.7625
10	3.2591	7.6266
11	3.2078	7.4907
12	3.1565	7.3549
15	2.6860	6.1097
18	2.5436	5.7326
21	2.4062	5.3690
24	2.2733	5.0171
27	2.1448	4.6772
30	2.0210	4.3493
33	1.9017	4.0335
36	1.7871	3.7304
39	1.6781	3.4418

Tiempo(min)	Masa (kg x 10 ³)	X(kg/kg ss)
42	1.5743	3.1671
45	1.3625	2.6065
48	1.3823	2.6589
51	1.3258	2.2024
54	1.2385	1.9915
57	1.1553	1.7907
60	1.0767	1.6007
65	0.9656	1.3324
70	0.8883	1.1456
75	0.7546	0.8228
80	0.6684	0.6145
85	0.5914	0.4285
90	0.5482	0.3241
95	0.5054	0.2208
100	0.4916	0.1875
105	0.4532	0.0946
110	0.4316	0.0426
115	0.4285	0.0351
120	0.4205	0.0156
130	0.4184	0.0106
140	0.4181	0.0100

W_s (kg x 10 ⁴)	X_o (kg/ kg ss)	X_c (kg/ kg ss)	X_e (kg/ kg ss)	$-Nw \times 10^{-3}$ (kg/m ² s)
3.7780 ✓	9.1203 ✓	7.7506	0.0106	1.1000

Tabla G-6 Datos Experimentales del Secado del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Húmedo. T=80°C. Velocidad del aire= 1m/s. $A_{s0}=9.7280 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. ✓
 $A_s = 1.1989 \times 10^{-4} X + 8.8914 \times 10^{-4}$ ✓

Temperatura del Sólido

Masa (kg x 10 ³)	Humedad(kg/kg ss)	Temperatura del Sólido (°C)
4.6800	5.0953	20.0000
4.2700	4.5613	20.6855
3.9300	4.1185	23.1049
3.6300	3.7278	25.4030
3.4900	3.5455	27.1000
3.3900	3.4152	28.3070
3.1000	3.0375	29.1530
3.0000	2.9073	29.7580
2.8200	2.6728	30.2400
2.6400	2.4384	30.6050
2.4600	2.2040	30.8470
2.3000	1.9956	31.4520
2.1200	1.7611	32.1780
2.0000	1.6048	32.6620
1.8500	1.4095	33.2660
1.7700	1.3053	34.2340
1.6900	1.2011	34.3550
1.6100	1.0969	35.0810
1.5300	0.9927	36.2910
1.4500	0.8885	37.2580
1.3900	0.8104	37.8630
1.3500	0.7583	38.5890
1.3300	0.7322	39.0730
1.3100	0.7062	39.3140
1.2900	0.6801	39.5570
1.2900	0.6801	39.6000
1.2900	0.6801	39.6000
1.2900	0.6801	39.6000

$$W_s = 7.6800 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla G-7 Datos Experimentales del Comportamiento de la Temperatura del Material del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Seco. T=40°C. Velocidad del aire= 1m/s.

Masa (kg x 10 ³)	Humedad(kg/kg ss)	Temperatura del Sólido (°C)
5.5300	5.8953	29.2900
4.6600	4.8105	30.0200
4.0600	4.0623	33.9500
3.6500	3.5511	34.3900
3.3500	3.1771	37.6700
3.1800	2.9651	41.6800
3.0000	2.7406	46.0500
2.8100	2.5037	51.5200
2.7100	2.3791	55.5300
2.6800	2.3416	56.4400
2.6800	2.3416	56.4400
2.6800	2.3416	56.4400

$$W_s = 8.0200 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla G-8 Datos Experimentales del Comportamiento de la Temperatura del Material del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Seco. T=60°C. Velocidad del aire= 1m/s.

Masa (kg x 10 ³)	Humedad(kg/kg ss)	Temperatura del Sólido (°C)
7.1000	6.1935	25.6452
6.0700	5.1499	34.6800
4.8000	3.8632	38.0600
3.8500	2.9007	41.1700
3.1000	2.1408	45.1200
2.4200	1.4519	56.9800
2.1100	1.1378	74.1900
2.0000	1.0263	75.3200
2.0000	1.0263	75.3200
2.0000	1.0263	75.3200

$$W_s = 9.8700 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla G-9 Datos Experimentales del Comportamiento de la Temperatura del Material del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Seco. T=80°C. Velocidad del aire= 1m/s.

Masa (kg x 10 ³)	Humedad(kg/kg ss)	Temperatura del Sólido (°C)
4.2000	9.1870	25.3750
3.9300	8.5320	28.7400
3.7900	8.1920	30.0700
3.5900	7.7070	30.6700
3.3900	7.2220	31.1100
3.2900	6.9800	31.3300
3.1100	6.5430	31.4800
2.9700	6.2030	31.7000
2.6400	5.4030	32.0000
2.5000	5.6040	32.1500
2.2600	4.4810	32.2200
2.1000	4.0930	32.3700
2.0200	3.8990	32.5200
1.9200	3.6570	32.6700
1.8800	3.5600	32.7000
1.8000	3.3660	32.8200
1.7000	3.1230	32.9600
1.6000	2.8810	33.1100
1.5400	2.7350	33.4100
1.4500	2.5170	33.6300
1.3900	2.3710	34.0000
1.3500	2.2740	34.2200
1.3100	2.1770	34.8900
1.2500	2.0320	35.4800
1.2100	1.9350	36.3000
1.1700	1.8380	36.5900
1.1500	1.7890	37.1900
1.1400	1.7650	37.7780
1.1400	1.7650	38.6770
1.1400	1.7650	38.6700
1.1400	1.7650	38.6700
1.1400	1.7650	38.6700

$$W_s = 4.12000 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla G-10 Datos Experimentales del comportamiento de la Temperatura del Material del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Húmedo. T=40°C.
Velocidad del aire= 1m/s.

Masa (kg x 10 ³)	Humedad(kg/kg ss)	Temperatura del Sólido (°C)
4.6070	9.4490	27.3000
3.8700	7.7780	35.6800
3.4900	6.9160	37.8400
3.0000	5.8040	39.4600
2.6500	5.0100	40.0000
2.2700	4.1490	40.0000
1.8700	3.2410	40.8100
1.6300	2.6970	41.6200
1.4000	2.1750	42.1600
1.2500	1.8350	42.9700
1.0700	1.4270	44.8600
0.9600	1.1770	47.5700
0.9200	1.0870	50.0000
0.8700	0.9730	50.5400
0.8300	0.8830	51.8900
0.8100	0.8370	54.8600
0.7600	0.7240	55.9500
0.7600	0.7240	55.9500
0.7600	0.7240	55.9500

$$W_s = 4.4100 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla G-11 Datos Experimentales del Comportamiento de la Temperatura del Material del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Húmedo. T=60°C.
Velocidad del aire= 1m/s.

Masa (kg x 10 ³)	Humedad(kg/kg ss)	Temperatura del Sólido (°C)
4.1100	9.1230	35.0000
2.9900	6.3650	48.4000
2.2200	4.4680	51.0000
1.5500	2.8180	52.0000
1.1300	1.7830	52.0000
0.8100	0.9950	55.4000
0.5800	0.4290	60.6000
0.5000	0.2320	64.6000
0.5000	0.2320	73.6000
0.5000	0.2320	74.4000
0.5000	0.2320	74.4000

$$W_s = 4.0600 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla G-12 Datos Experimentales del Comportamiento de la Temperatura del Material del Sistema Jengibre-Agua Utilizando Aire Húmedo. T=80°C.
Velocidad del aire= 1m/s.

APENDICE H

**Datos Experimentales de la Variación Volumétrica
de las Rodajas de Jengibre Empleando Cortes
Transversal y Longitudinal.**

Tiempo (min)	Dimensiones (cm)	Grosor (cm)	Masa (kg x 10 ³)	Area (m ² x 10 ⁻⁴)	Humedad (kg/kg ss)	X/X ₀	A/A ₀	Volumen (m ³ x 10 ⁷)	V/V ₀
0	4.80 X 2.50	0.4100	4.7250	12.0000	3.3913	1.0000	1.0000	49.2000	1.0000
30	4.57 X 2.45	0.3500	3.7960	11.2000	2.5279	0.7454	0.9333	39.2000	0.7967
60	4.50 X 2.35	0.3100	3.4300	10.5750	2.1877	0.6451	0.8813	32.7825	0.6663
90	4.40 X 2.30	0.3050	2.9640	10.1200	1.7546	0.5174	0.8433	30.8660	0.6274
120	4.30 X 2.25	0.2800	2.6450	9.6750	1.4582	0.4300	0.8063	27.0900	0.5506
180	4.19 X 2.15	0.2400	2.2880	9.0000	1.1264	0.3321	0.7500	21.6000	0.4390
240	4.14 X 2.10	0.2300	2.0770	8.7000	0.9303	0.2743	0.7250	20.0100	0.4067
300	4.10 X 2.00	0.2000	1.8140	8.2000	0.6859	0.2022	0.6833	16.4000	0.3333
360	4.10 X 2.00	0.1750	1.4500	8.2000	0.3476	0.1025	0.6833	14.3500	0.2917
420	4.10 X 2.00	0.1600	1.3090	8.2000	0.2165	0.0639	0.6833	13.1200	0.2667
1500	4.10 X 2.00	0.1500	1.0760	8.2000			0.6833	12.3000	0.2500

$$W_s = 1.0760 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

Tabla H-1 Resultados Experimentales de la Variación Volumétrica de las Rodajas de Jengibre con Corte Longitudinal. T=40°C.

Tiempo (min)	Dimensiones (cm)	Grosor (cm)	Masa (kg x 10 ³)	Area (m ² x 10 ⁴)	Humedad (kg/kg ss)	X/X _o	A/A _o	Volumen (m ³ x 10 ⁷)	V/V _o
0	3.4 X 2.5	0.4000	3.3767	8.5000	9.6891	1.0000	1.0000	34.0000	1.0000
30	3.2 X 2.4	0.3300	2.8314	7.6800	7.9630	0.8218	0.9035	25.3440	0.7454
60	3.05 X 2.35	0.3050	2.4713	7.1680	6.8230	0.7042	0.8433	21.8624	0.6430
90	2.95 X 2.2	0.2950	2.0303	6.4900	5.4270	0.5601	0.7635	19.1455	0.5631
120	2.85 X 2.1	0.2500	1.7343	5.9850	4.4900	0.4634	0.7041	14.9625	0.4401
180	2.75 X 1.9	0.2050	1.3720	5.2250	3.3431	0.3450	0.6147	10.7113	0.3150
240	2.6 X 1.7	0.1950	1.0102	4.4200	2.1978	0.2268	0.5200	8.6190	0.2535
300	2.6 X 1.7	0.1900	0.9088	4.4200	1.8769	0.1937	0.5200	8.3980	0.2470
360	2.6 X 1.7	0.1600	0.5566	4.4200	0.7619	0.0786	0.5200	7.0720	0.2080
420	2.6 X 1.7	0.1400	0.4363	4.4200	0.3811	0.0393	0.5200	6.1880	0.1820
1500	2.45 X 1.35	0.1200	0.3159	4.4200			0.5200	5.3040	0.1560

$$W_s = 3.159 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla H-2 Resultados Experimentales de la Variación Volumétrica de las Rodajas de Jengibre con Corte Transversal. T=40°C.

Tiempo (min)	Dimensiones (cm)	Grosor (cm)	Masa (kg x 10 ³)	Area (m ² x 10 ⁴)	Humedad (kg/kg ss)	X/X _o	A/A _o	Volumen (m ³ x 10 ⁷)	V/V _o
0	4.50X 1.90	0.4000	3.4564	8.5500	3.3151	1.0000	1.0000	34.2000	1.0000
30	4.40X 1.80	0.3350	2.5752	7.6510	2.2150	0.6681	0.8949	25.6309	0.7494
60	4.20X 1.65	0.2750	1.8668	6.9300	1.3306	0.4014	0.8105	19.0575	0.5572
90	4.10X 1.60	0.2300	1.5548	6.5600	0.9411	0.2839	0.7673	15.0880	0.4412
120	4.00X 1.55	0.1950	1.2872	6.2000	0.6070	0.1831	0.7251	12.0900	0.3535
180	3.90 X 1.50	0.1900	1.0620	5.8500	0.3258	0.0983	0.6842	11.1150	0.3250
240	3.80 X 1.50	0.1850	0.9431	5.7000	0.1774	0.0535	0.6667	10.5450	0.3083
300	3.80 X 1.50	0.1800	0.8868	5.7000	0.1071	0.0323	0.6667	10.2600	0.3000
360	3.70 X 1.50	0.1700	0.8380	5.5500	0.0462	0.0139	0.6491	9.4350	0.2759
420	3.70 X 1.50	0.1650	0.8267	5.5500	0.0321	0.0097	0.6491	9.1575	0.2678
1500	3.70 X 1.50	0.1600	0.8009	5.5500			0.6491	8.8800	0.2596

$$W_s = 8.009 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla H-3 Resultados Experimentales de la Variación Volumétrica de las Rodajas de Jengibre con Corte Longitudinal. T=60°C.

Tiempo (min)	Dimensiones (cm)	Grosor (cm)	Masa (kg x 10 ³)	Area (m ² x 10 ⁴)	Humedad (kg/kg ss)	X/X _o	A/A _o	Volumen (m ³ x 10 ⁷)	V/V _o
0	3.70 X 2.50	0.4550	4.4100	9.2500	12.9601	1.0000	1.0000	42.0875	1.0000
30	3.50 X 2.30	0.3800	3.3565	8.0500	9.6252	0.7427	0.8703	30.5900	0.7268
60	3.38 X 2.25	0.3300	2.9575	7.6100	8.3621	0.6452	0.8227	25.1130	0.5967
90	3.25 X 2.20	0.2400	2.0756	7.1500	5.5704	0.4298	0.7730	17.1600	0.4077
120	3.15 X 2.10	0.2300	1.7574	6.6150	4.5630	0.3521	0.7151	15.2145	0.3615
180	3.10 X 1.90	0.1850	1.2863	5.8900	3.0719	0.2370	0.6368	10.8965	0.2589
240	3.10 X 1.81	0.1800	1.0021	5.7350	2.1722	0.1676	0.6200	10.3230	0.2453
300	3.10 X 1.85	0.1750	0.7986	5.6040	1.5280	0.1179	0.6058	9.8070	0.2330
360	3.00 X 1.65	0.1650	0.4868	4.9500	0.5410	0.0417	0.5351	8.1675	0.1941
420	3.00 X 1.65	0.1350	0.3788	4.9500	0.1991	0.0154	0.5351	6.6825	0.1588
1500	3.00 X 1.65	0.1300	0.3160	4.9500			0.5351	6.4350	0.1529

$$W_s = 3.160 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla H-4 Resultados Experimentales de la Variación Volumétrica de las Rodajas de Jengibre con Corte Transversal. T=60°C.

Tiempo (min)	Dimensiones (cm)	Grosor (cm)	Masa (kg x 10 ³)	Area (m ² x 10 ³)	Humedad (kg/kg ss)	X/X _o	A/A _o	Volumen (m ³ x 10 ⁷)	V/V _o
0	4.80 X 2.80	0.2600	3.0999	13.4400	3.2734	1.0000	1.0000	34.9440	1.0000
30	4.50 X 2.27	0.2000	1.6844	10.2321	1.3220	0.4039	0.7613	20.4642	0.5856
60	4.30 X 1.95	0.1400	0.9702	8.3850	0.3375	0.1031	0.6239	11.7390	0.3359
90	4.20 X 1.90	0.1300	0.8342	7.9800	0.1500	0.0458	0.5938	10.3740	0.2969
120	4.10 X 1.85	0.1250	0.7483	7.5850	0.0316	0.0096	0.5644	9.4813	0.2713
180	4.00 X 1.85	0.1250	0.7385	7.4000	0.0181	0.0055	0.5506	9.2500	0.2647
240	4.00 X 1.85	0.1200	0.7324	7.4000	0.0096	0.0029	0.5506	8.8800	0.2541
300	4.00 X 1.85	0.1150	0.7289	7.4000	0.0048	0.0015	0.5506	8.5100	0.2435
1380	4.00 X 1.85	0.1060	0.7254	7.4000			0.5506	7.8440	0.2245

$$W_s = 7.254 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla H-5 Resultados Experimentales de la Variación Volumétrica de las Rodajas de Jengibre con Corte Longitudinal. T=80°C.

Tiempo (min)	Dimensiones (cm)	Grosor (cm)	Masa (kg x 10 ³)	Area (m ² x 10 ⁴)	Humedad (kg/kg ss)	X/X _o	A/A _o	Volumen (m ³ x 10 ⁷)	V/V _o
0	3.90 X 2.40	0.3200	3.0026	9.3600	11.5317	1	1	29.952	1
30	3.60 X 2.00	0.2200	1.6792	7.2000	6.0083	0.5210	0.7692	15.8400	0.5288
60	3.30 X 1.80	0.1850	0.9818	5.9400	3.0977	0.2686	0.6346	10.9890	0.3669
90	3.10 X 1.60	0.1350	0.5194	4.9600	1.1678	0.1013	0.5299	6.6960	0.2236
120	3.00 X 1.40	0.1100	0.3072	4.2000	0.2821	0.0245	0.4487	4.6200	0.1542
180	2.90 X 1.40	0.1050	0.2459	4.0600	0.0263	0.0023	0.4338	4.2630	0.1423
240	2.90 X 1.40	0.1000	0.2418	4.0600	0.0092	0.0008	0.4338	4.0600	0.1356
300	2.90 X 1.40	0.0900	0.2406	4.0600	0.0042	0.0004	0.4338	3.6540	0.1220
1380	2.90 X 1.40	0.0850	0.2396	4.0600			0.4338	3.4510	0.1152

$$W_s = 2.396 \times 10^{-4} \text{ kg}$$

Tabla H-6 Resultados Experimentales de la Variación Volumétrica de las Rodajas de Jengibre con Corte Transversal. T=80°C.

APENDICE I

**Datos Experimentales de Ensayos en el
Secador Híbrido.**

Tiempo (h:min)	Temperatura (°C)							
	Ta	T1o	T1u	T2o	T2u	T3o	T42	R (kW/m2)
10:00	31.17	48.00	46.00	49.67	45.17	53.67	50.15	0.34
10:30	31.17	45.33	42.50	47.33	41.67	52.67	50.02	0.39
11:00	33.33	58.17	50.33	63.17	47.67	64.50	50.42	0.69
11:30	34.00	60.00	49.67	66.90	49.33	66.67	51.33	0.70
12:00	34.83	60.83	51.67	70.56	51.50	69.33	54.33	0.80
12:30	33.50	54.33	47.50	62.17	48.30	61.00	52.00	0.53
13:00	33.33	49.83	45.17	56.50	45.00	55.83	46.00	0.28
13:30	34.67	56.50	49.17	66.50	49.50	66.83	50.50	0.71
14:00	35.50	55.67	49.00	66.83	50.00	66.83	50.50	0.73
14:30	34.83	50.33	46.83	61.50	47.33	59.17	47.83	0.21
15:00	33.17	46.83	43.00	54.27	42.67	51.17	46.33	0.18
15:30	32.00	41.23	39.00	43.00	41.97	43.00	40.17	0.02
16:00	31.67	39.00	37.00	42.83	37.50	41.50	37.50	0.00
16:30	28.50	33.67	34.33	35.67	34.17	35.17	32.83	0.00
17:00	28.00	31.17	31.67	32.5	31.00	32.17	30.25	0.00


Tabla I-1. Datos Experimentales de Ensayos de Funcionamiento del Secador Híbrido.

Tiempo (h:min)	Temperatura (°C)							
	Ta	T1o	T1u	T2o	T2u	T3o	TC2	R (kW/m2)
9:00	27.50	41.30	36.00	38.00	36.00	54.00	62.40	0.30
9:30	30.00	52.90	40.00	45.00	39.50	55.00	71.90	0.37
10:00	32.50	67.10	47.50	55.00	45.50	67.50	68.80	0.75
10:30	34.00	70.50	52.00	60.00	51.00	73.50	72.00	0.90
11:00	34.50	76.20	58.50	64.00	54.00	78.00	64.80	0.93
11:30	34.50	71.30	55.00	62.00	53.00	76.00	63.40	1.00
12:00	34.50	64.30	53.00	61.00	54.00	72.00	63.80	0.68
12:30	34.00	58.50	49.00	56.00	51.00	65.00	67.40	0.23
13:00	35.00	64.90	52.00	62.00	53.00	74.00	69.10	0.70
13:30	34.50	58.10	48.00	58.50	49.5	68.50	74.80	0.82
14:00	36.00	60.20	51.00	62.00	52.00	72.00	66.10	0.62
14:30	35.00	55.40	48.00	58.50	51.00	68.00	69.10	0.60
15:00	34.00	48.80	45.00	51.00	48.00	57.00	65.00	0.25

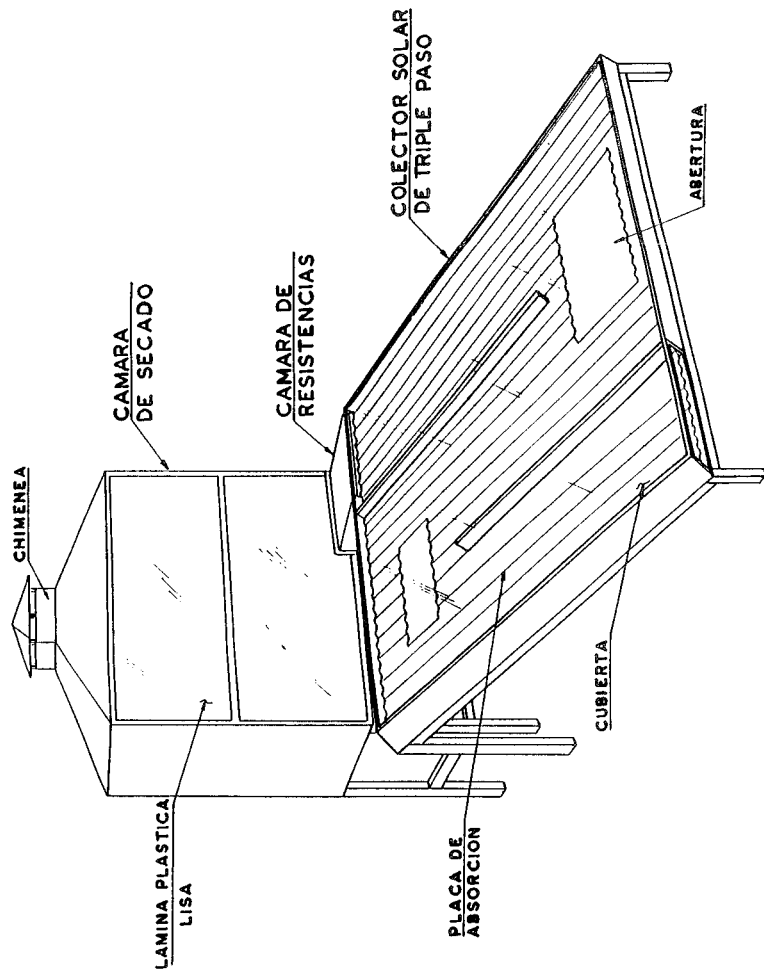
Tabla I-2. Datos Experimentales de Ensayos de Funcionamiento del Secador Híbrido Utilizando ambas Fuentes de Calor.

APENDICE J

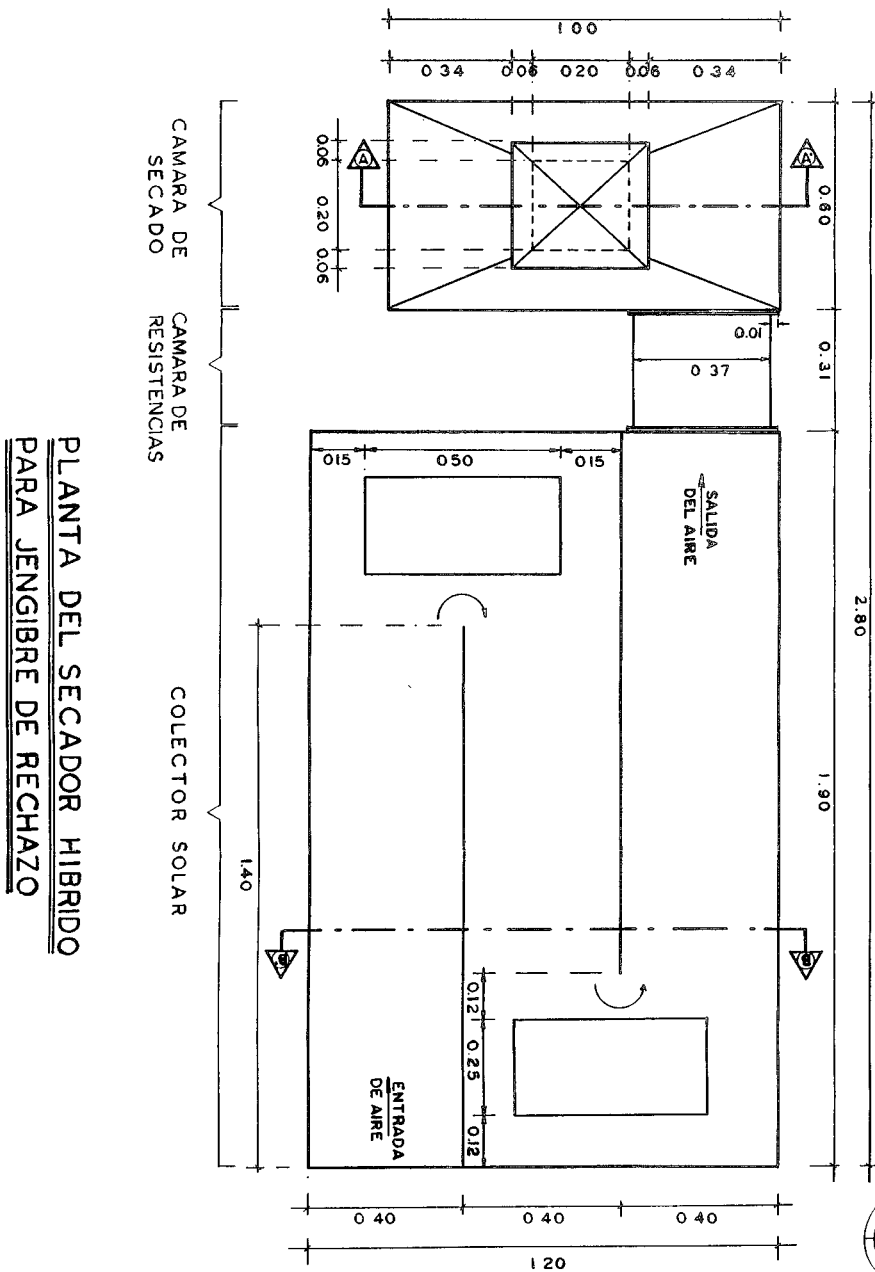
Planos del Secador Híbrido.


	PERSPECTIVA DEL SECADOR		FACULTAD DE QUIMICA	5
	PARA JENGIBRE DE RECHAZO			
	DISEÑO DE UN SECADOR HIBRIDO	APROBO		
	DISEÑO	RODOLFO ESPINOSA		
ESCALA		FECHA	15 ENE 99	2


2 / 5

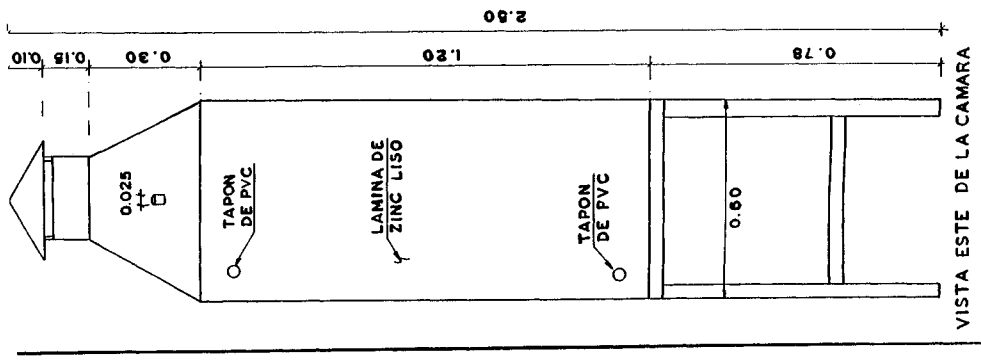
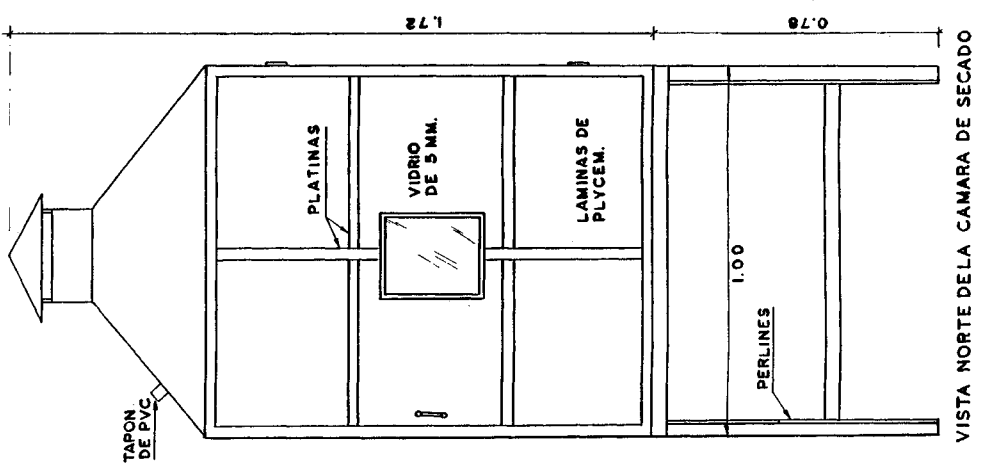
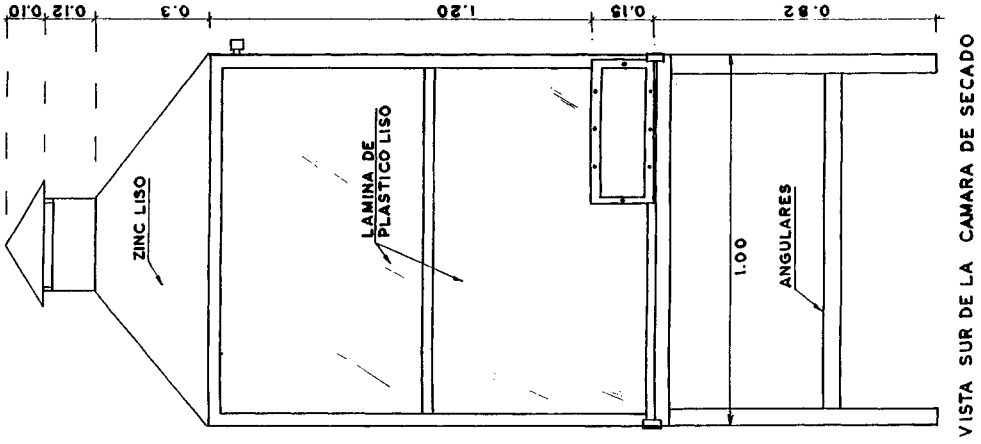


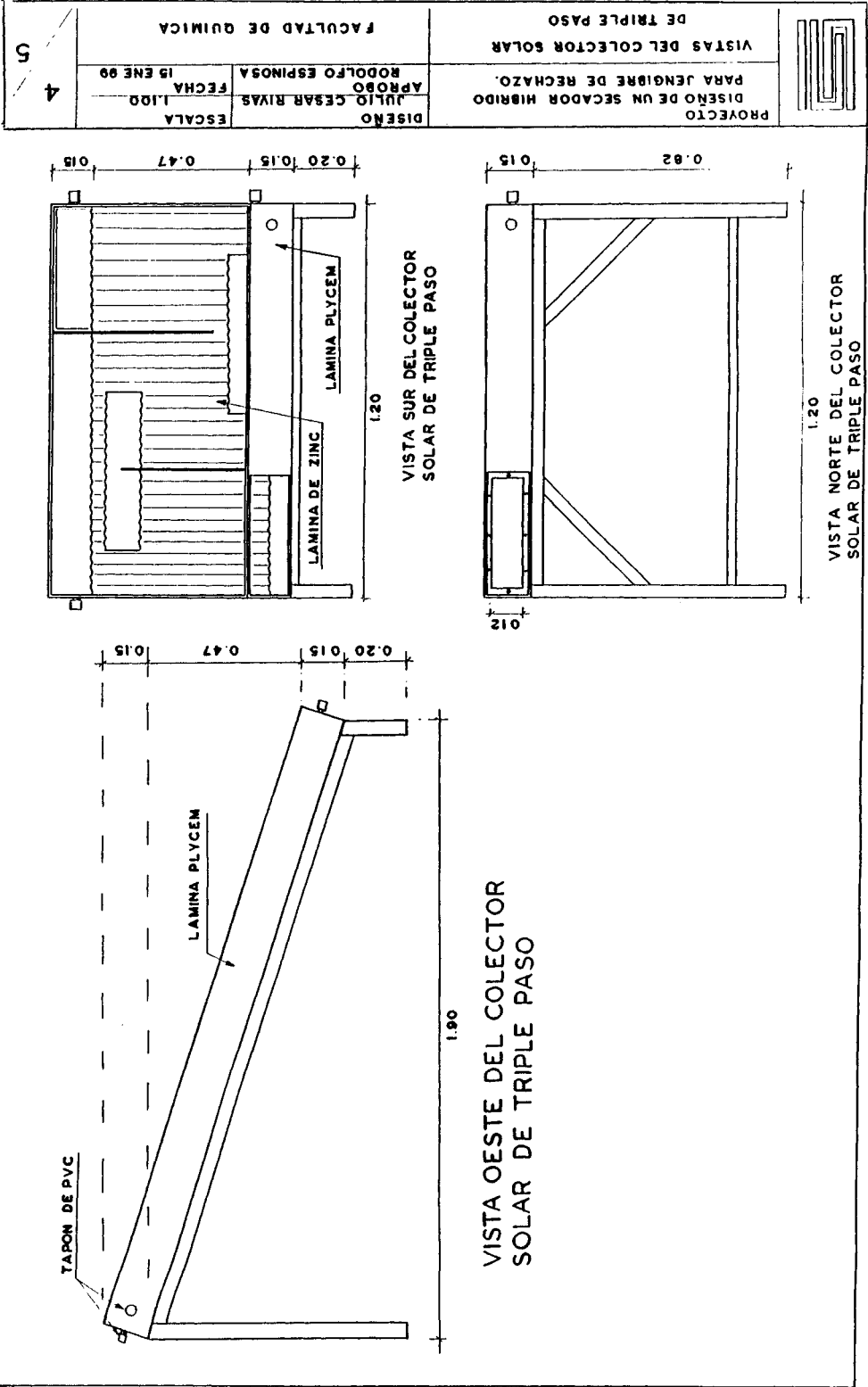
SECADOR HIBRIDO PARA JENGIBRE DE RECHAZO




	PROYECTO: DISEÑO DEL SECADOR HIBRIDO PARA JENGIBRE DE RECHAZO	DISEÑO: JULIO C. RIVAS.	ESCALA 1:100	1 5
		APROBO: RODOLFO ESPINOSA	FECHA. 15 ENE 99	
	PLANTA DEL SECADOR HIBRIDO PARA JENGIBRE DE RECHAZO		FACULTAD DE QUIMICA	

<div>  </div>	PROYECTO DISEÑO DE UN SECADOR HIBRIDO PARA JENGIBRE DE RECHAZO	
	DISEÑO: JULIO CÉSAR RIVAS	APROBO: RODOLFO ESPINOSA
	ESCALA: 1:100	FECHA: 15 ENE 99
VISTAS DE LA CAMARA DE SECADO		FACULTAD DE QUIMICA
PARA JENGIBRE DE RECHAZO		3
DISEÑO DE UN SECADOR HIBRIDO		5

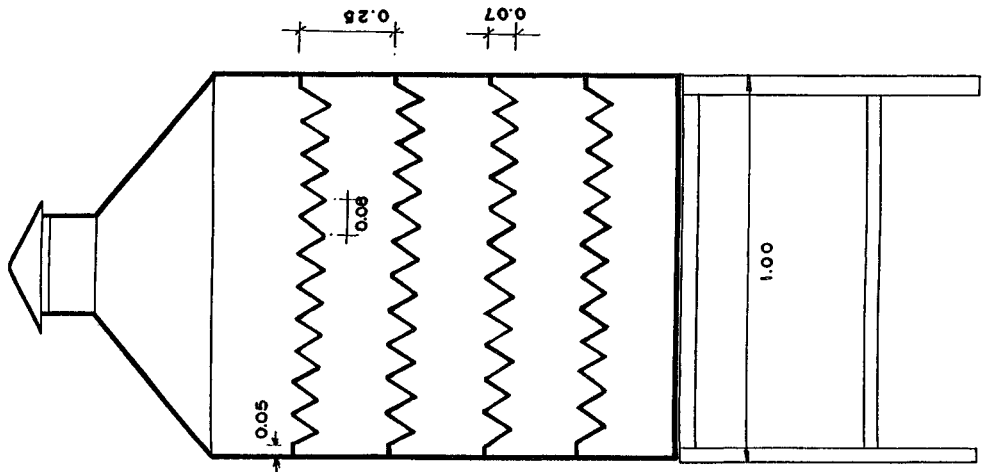
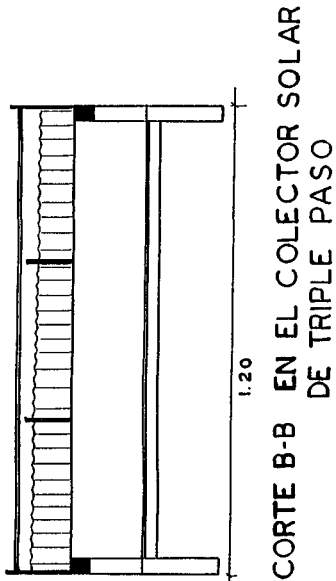
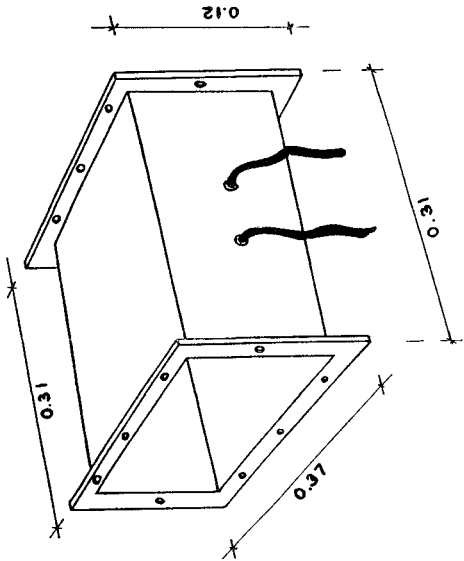




		CORTES		FACULTAD DE QUIMICA	
PROYECTO DISEÑO DE UN SECADOR HIBRIDO PARA JENGIBRE DE RECHAZO		APROBO RODOLFO ESPINOSA		FACULTAD DE QUIMICA	
DISEÑO JULIO CESAR RIVAS		FECHA 15 ENE 99		FACULTAD DE QUIMICA	
ESCALA 1:100				FACULTAD DE QUIMICA	

CAMARA DE RESISTENCIAS

ESC. ≈ 1:50



CORTE A-A CAMARA DE SECADO