

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR EXPERIMENTAL DE HIERBAS AROMÁTICAS CON EL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR, CAPACIDAD DE 5 Kg.”

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Elaborado por:

Edgar Stalin Reinoso Bedón

Director: Ing. Emilio Tumipamba

Codirector: Ing. José Guasumba

Sangolquí, 2006 – 06

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR EXPERIMENTAL DE HIERBAS AROMÁTICAS CON EL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR, CAPACIDAD DE 5 Kg.” fue realizado en su totalidad por el alumno Edgar Stalin Reinoso Bedón, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Emilio Tumipamba
DIRECTOR

Ing. José Guasumba
CODIRECTOR

Sangolquí, 2006-06-16

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR EXPERIMENTAL DE HIERBAS AROMÁTICAS CON EL EMPLEO DE ENERGÍA SOLAR, CAPACIDAD 5 Kg.”

ELABORADO POR:

Edgar Stalin Reinoso Bedón

CC: 170720462-2

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MAYO. de E. ING. Edgar Pazmiño

DECANO

Sangolquí, 2006-06

DEDICATORIA

A Dios y a mi Dolorosa por ser mi fortaleza y protección.

A mis padres Jaime y Yolanda por su amor, sacrificio y apoyo incondicional.

A mis hermanos Norka, Wladimir y Ana María por su amistad y aprecio.

A mi esposa Rocío por no dejar que abandone mis sueños.

A mis hijas Cristy, Gaby, Danielita, Romi y Martinita por ser el motor de mi vida.

A mis abuelitos Maria Elina, Luis y a todos mis tíos por ser parte de mi vida.

Stalin Reinoso.

AGRADECIMIENTO

Quisiera agradecer primero a Dios y a mi familia. A la Escuela Politécnica del Ejército – ESPE, por su valiosos conocimientos impartidos a lo largo de la carrera, lo que me ha ayudado a ser un excelente profesional y ser humano.

Al Ing. Emilio Tumipamba, Director de tesis y al Ing. José Guasumba, Codirector de tesis por su correcta orientación y aliento recibido durante la realización de este proyecto.

Al señor Tecnólogo Enrique Mullo, por su valioso aporte en al construcción del prototipo.

A mi tío Carlos, a mis compadres Lilia y Adrián por su apoyo incondicional.

Y a todos aquellos que de alguna manera colaboraron en el desarrollo del proyecto.

Stalin Reinoso.

ÍNDICE GENERAL

Títulos	Pg.
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xi
CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO	1
1.1.- Antecedentes	1
1.2.- Definición Del Problema.....	1
1.3.- Objetivos	2
1.3.1. – General	2
1.3.2.- Específicos.....	3
1.4.- Alcance	3
1.5. – Justificación e importancia del problema	4
CAPÍTULO 2: ANALISIS DE LOS PRODUCTOS A SECARSE.....	5
2.1.- Requerimeintos y parámetros de secado tradicional.....	5
2.2.- Manzanilla.....	6
2.2.1.- Descripción	6
2.2.2.- Características	7
2.3.- Menta.....	7
2.3.1.- Descripción	7
2.3.2.- Características	8
2.4.- Orégano	9
2.4.1.- Descripción	9
2.4.2.- Características	9
2.5.- Curvas de secado	10
CAPITULO 3: ENERGÍA SOLAR Y SECADO.....	17

3.1.- Características de la Energía solar disponible en el país.....	17
3.2.- Fundamentos y formas de secado.....	18
3.2.1.- Tipo de secadores convencionales.....	20
3.2.2.- Secado por resistencias eléctricas.....	21
3.2.3. – Secado con aire caliente	21
3.2.4.- Secado con superficies calientes.....	22
3.2.5.- Secado al vacío	23
3.2.6.- Secado solar	24
3.2.6.1. - Secado natural.....	24
3.2.6.2. - Secado con colectores solares planos.....	25
3.2.6.3. Secado por convección natural	29
3.3.- Selección de la alternativa	31
3.4.- Estructuración del modelo térmico (parámetros de operación)	34
3.4.1.- Cantidad de calor requerida para el secado	47
CAPITULO 4: DISEÑO DE LA SECADORA.....	57
4.1.- Diseño y cálculo del colector solar.....	57
4.2.- Diseño del ducto de alimentación y transporte del aire por conveccion natural.....	69
4.3.- Diseño de la cámara de secado y bandejas	72
4.3.1.- Cámara de secado.....	72
4.3.2.- Bandejas para producto.....	75
4.4.- Selección de materiales.....	77
4.4.1.- Selección de materiales para el colector.....	77
4.4.2.- Selección de materiales para la secadora	78
4.4.3.- Selección de materiales para las bandejas.....	78
CAPITULO 5: CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE.....	79
5.1.- Organización de la construcción	79
5.1.1.- Secuencia de la construcción	79
5.1.2.- Mano de obra necesaria	95
5.1.3.- Talleres y laboratorios.....	95
5.2.- Montaje	95
CAPITULO 6: PRUEBAS DE OPERACIÓN DE LA SECADORA	99
6.1.- Definición de parámetros y variables.....	99
6.2.- Plan de pruebas en el prototipo construido.....	100

6.2.1.- Medidas realizadas	102
6.3.- Análisis de resultados y discusión	103
CAPITULO 7: ANÁLISIS ECONÓMICO	105
7.1. – Costos directos	105
7.1.1. - Materiales	105
7.1.2.- Mano de obra directa	106
7.2.- Costos indirectos	106
7.2.1.- Materiales fungibles	107
7.2.2. - Imprevistos	107
7.3. – Costo total del proyecto	108
7.3.1. – Costo maquinaria y equipos	109
CAPITULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	113
8.1.- Conclusiones	113
8.2.- Recomendaciones	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Humedad relativa del aire Vs contenido de humedad base seca...	13
Figura 2.2: Curvas de secado	14
Figura 3.1: Relación de la presión con la temperatura de ebulición.....	23
Figura 3.2: Flujo de aire por arriba de la placa colectora	28
Figura 3.3: Flujo de aire por debajo de la placa colectora.....	28
Figura 3.4: Flujo de aire por arriba y debajo de la placa colectora	28
Figura 3.5: Aire en contra flujo por arriba y por debajo de la placa colectora ...	29
Figura 3.6: Esquema secador	30
Figura 3.7: Distribución de la energía solar según la longitud de onda.....	36
Figura 3.8: Variación anual de la radiación extraterrestre	37
Figura 3.9: Interacción de la radiación solar con la atmósfera	38
Figura 3.10: Posición del sol con respecto a una superficie	39
Figura 3.11: Radiación sobre una superficie plana inclinada	42
Figura 3.12: Relación entre el valor promedio de radiación difusa y el valor promedio de la radiación total	45
Figura 3.13 Esquema de la placa plana.....	48
Figura 3.14: Variación de la humedad del producto con respecto al tiempo.....	50
Figura 3.15: Geometría del colector para calentamiento de aire.....	54
Figura 3.16: Esquema cámara de secado	55
Figura 4.1: Balance energético de un captador solar plano	58
Figura 4.2: Colector solar con placa plana. Esquema de los coeficientes de transferencia de calor.....	61
Figura 4.3: Relación del diámetro hidráulico con el espesor	62
Figura 4.4: Simil eléctrico del colector.....	65
Figura 4.5: Puntos de caída de presión en el secador	69
Figura 4.6: Flujo de aire en el prototipo.....	73
Figura 4.7: Proceso calentamiento aire (colector - secador).....	74
Figura 4.8: Esquema bandeja de secado.....	76
Figura 5.1: Diagrama de proceso del colector solar.....	80
Figura 5.2: Diagrama de proceso del horno	85
Figura 5.3: Diagrama de proceso de las bandejas	93
Figura 6.1: Puntos de toma de datos	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Matriz de decisión para seleccionar el sistema de secado.....	33
Tabla 4.4.1: Materiales de construcción colector	77
Tabla 4.4.2: Materiales de construcción secadora.....	78
Tabla 4.4.3: Materiales de construcción bandejas	78
Tabla 7.1: Costos totales de materiales directos utilizados en el sistema de secado de hierbas aromáticas	105
Tabla 7.2: Costo de mano de obra directa	106
Tabla 7.3: Costos de materiales y accesorios indirectos utilizados en la valoración del proyecto	106
Tabla 7.4: Costo de materiales fungibles	107
Tabla 7.5: Costos de imprevistos	107
Tabla 7.6:Costo total del proyecto.....	108
Tabla 7.7: Costo de maquinaria y equipos.....	109
Tabla 7.8:Ingreso anual del proyecto	110
Tabla 7.9: Egreso anual del proyecto.....	111
Tabla 7.10: Flujo de caja del proyecto	111

RESUMEN

El presente proyecto realiza la descripción general y el marco teórico de la utilización de la energía solar para calentar aire, a fin de proceder a la deshidratación de productos agrícolas como es el caso de la hierbas aromáticas; a continuación se procede a diseñar y construir los diferentes componentes del sistema de secado; como son: el colector y la cámara de secado, la cual se halla constituida por cinco bandejas, en un proceso de secado discontinuo y con circulación de aire por convección natural.

El prototipo nos permite obtener una temperatura de secado comprendida de 35 a 40 °C, que es el rango de temperatura necesario para este tipo de productos.

Para las pruebas de funcionamiento del prototipo se instaló este en la terraza sobre los laboratorios de termodinámica de la FIME, al considerarse este un sitio libre de sombra, amplio e idóneo para su funcionamiento.

Los resultados arrojados por las respectivas pruebas permiten indicar que el prototipo funcionó satisfactoriamente.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. - ANTECEDENTES.

En los últimos años los principales problemas que afronta la humanidad son fundamentalmente una escasez cada vez mayor de alimentos, contaminación ambiental, deforestación y un paulatino agotamiento de los recursos naturales.

Todo esto se va acentuando por la crisis energética provocada por las fluctuaciones del precio del petróleo, el cual en gran parte es causado por el agotamiento de los recursos fósiles no renovables; y una demanda de energía cada vez mayor ¹. Por lo que resulta importante el fomentar el uso de energías renovables, como es el de la **ENERGÍA SOLAR**.

Siendo nuestro país tradicionalmente agrícola se presentan aspectos muy interesantes sobre las aplicaciones de la energía solar en dicho campo, como en el presente caso, el secar hierbas aromáticas, tratando así de fomentar la exportación de productos agrícolas no tradicionales, y a su vez dando de esta forma un valor agregado al producto de las hierbas aromáticas, las cuales se utilizan ya sean secas o húmedas.

1.2.- DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Al revisar los principales mercados de la ciudad de Quito, se puede ver que en mas de un 90% las plantas aromáticas se las comercializa sin ningún tipo de industrialización, es decir en forma húmeda, por lo que el período de vida útil de la planta es corto. Las plantas aromáticas por su gran contenido de aceites esenciales, utilizados principalmente como agentes aromatizantes o medicinales, necesitan de un proceso de conservación adecuado, de ahí la

¹ BRINKWORTH, B.J. Energía Solar para el hombre, editorial Blume año 1981 pag.3

necesidad de diseñar e investigar formas que permitan conservar estas plantas en forma seca, de manera que conserven sus características, y se constituyan en la materia prima refinada para otros procesos.

Aunque en los mercados locales buena parte de esta producción se suele expender en fresco, también es cierto que la mejor forma de comercializar estos es en forma deshidratada.” El secado es uno de los procesos más importantes en la producción de plantas medicinales, hierbas aromáticas y de condimento. Todas las partes deben ser secadas correctamente y hasta el porcentaje de humedad requerido, tanto para el almacenamiento como para el transporte.”²

El secado de las plantas medicinales requiere de temperaturas de 30 a 40 °C, en nuestro país se utiliza en forma general energía eléctrica para el calentamiento del aire utilizado en el proceso de secado, esto se puede conseguir calentando el aire con un colector solar.

1.3. - OBJETIVOS.

1.3.1.- GENERAL.

La presente tesis sobre secado solar tiene como objetivo general obtener un equipo que permita secar hierbas aromáticas, con el empleo de energía solar, así como disponer de una herramienta que abarque los conceptos más importantes sobre el secado solar y sus aplicaciones en este tipo de productos agrícolas, contribuyendo así a mejorar el desarrollo socio económico de las regiones rurales del país, fomentando el crecimiento de las exportaciones de productos no tradicionales, como en este caso hierbas aromáticas deshidratadas, base para la elaboración de nuevos fármacos, que exigen las necesidades médicas actuales, o como también la necesidades creadas por

² PLANTAS MEDICINALES Y HIERBAS AROMÁTICAS.
Manual para la producción orgánica .Ediciones UPS FUNDAGRO 1995 pg. 35

una sociedad de consumo. Por lo que se necesita una adecuada técnica de conservación, a fin de mejorar el transporte y almacenamiento de estos.

1.3.2. - ESPECÍFICOS.

- Cálculo, diseño y construcción de un secador solar de hierbas aromáticas de una capacidad de 5 Kg., a fin de lograr un nivel adecuado de humedad en las hierbas aromáticas (manzanilla, menta y orégano), con el propósito de crear las condiciones desfavorables, para el desarrollo de microorganismos asociados a estos productos, permitiendo almacenar estos en condiciones ambientales por largos períodos, sin la pérdida de sus características físicas y químicas.

- Calcular, diseñar y construir un colector solar plano que sirva para calentar el aire ambiente y transformarlo en aire apto para el secado con una temperatura de 30 a 40 °C.

- Determinar el proceso de secado para las hierbas aromáticas manzanilla, menta, orégano.

- Definir la conveniencia de utilizar un secador con uso de energía solar para las hierbas aromáticas en el sector andino rural de nuestro país.

1.4. - ALCANCE.

El presente proyecto pretende desarrollar un secador de utilidad para el secado de hierbas aromáticas con potenciales aplicaciones para el sector rural marginal, a fin de mejorar las condiciones higiénicas en el procesamiento de este tipo de plantas medicinales así como sus condiciones socio económicas, en especial del productor de la sierra ecuatoriana, (el secador solar será construido en base a datos, como condiciones atmosféricas, físicas de la provincia de Pichincha).

1.5. - JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROBLEMA.

Al ser la deshidratación uno de los procesos más usados para la preservación de productos agrícolas, el secado solar de estos puede potencialmente contribuir al desarrollo socio económico de las regiones rurales del país.

El secado solar comparado con otras técnicas de preservación como la refrigeración, tratamientos químicos, enlatados, tiene una enorme ventaja en cuanto a costo y simplicidad de operación. De igual forma con el secado solar se consigue una reducción en cuanto a gastos energéticos y se puede llegar a sitios en los que otra forma de energía es hoy por hoy casi nula.

Las razones para deshidratar son múltiples pero las más importantes son las siguientes:

- 1) Facilitar la conservación del producto durante su almacenamiento y su transporte, manteniendo la calidad del mismo.
- 2) Facilitar la manipulación en operaciones de comercialización, por ejemplo empaquetado, tamizado.
- 3) Permitir la utilización satisfactoria del producto final.
- 4) Aumentar el valor y la utilización de los desperdicios o los sub-productos obtenidos.

CAPÍTULO 2.

ANÁLISIS DE LOS PRODUCTOS A SECARSE

2.1. - REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS DE SECADO TRADICIONAL.

Todas las partes de las plantas deben ser secadas correctamente y hasta el porcentaje de humedad requerido, tanto para el almacenamiento como para el transporte., ya que mediante un adecuado proceso de deshidratación las plantas mantienen su color y fragancia. En un vegetal superior, la raíz actúa a modo de bomba que absorbe del suelo el agua, las sales minerales y los nitratos, savia bruta, que impulsa y reparte por todo el vegetal, cuyas **hojas** constituyen uno de los órganos más importantes.

El producto a ser secado constituyen las flores o las hojas, las cuales por su propia contextura, deben ser secadas en un proceso meticuloso y en un tiempo adecuado, que bajo ninguna circunstancia se lo debe tratar de acelerar con la aplicación de altas temperaturas o temperaturas moderadas por períodos prolongados, puesto que llegaría a darse la cocción en la superficie del mismo.

“Para secar plantas a una pequeña escala, se extienden sus hojas o flores sobre papel o se las cuelga de un hilo, a modo de guirnaldas. Es preferible efectuar la desecación a la sombra en un granero, o en una área grande y bien aireada, expuesto a los rayos del sol.

Cuando los órganos de una planta son carnosos, es mejor hacer la desecación en estufa calentada progresivamente de 30 a 40 °C., Conviene evitar que esta temperatura sea superada con el fin de no “cocer” o alterar los órganos de la planta.

Las raíces se lavarán antes de ponerlas a secar. Toda la tierra que pudiera adherirse a ellas debe quitarse con cuidado. Una vez arrancada la película que recubre, es mejor cortar las raíces en tiras o en rodajas. Para el caso de flores, es preferible secar únicamente el cáliz y la corola. Las plantas, que después de secarlas hayan perdido sus colores naturales, deben desecharse.

Los cultivos de hojas y de hierbas, desarrollados a escala deben ser secados a temperaturas moderadas, utilizándose para el efecto deshidratadores especiales a base de energía solar o aire caliente generado por electricidad. Las temperaturas iniciales de deshidratación deben ubicarse por debajo de los 100 °F. Las flores requieren aun temperaturas menores, al igual que las especies en donde las pérdidas de aceite volátil ³ son importantes.”

2.2. - MANZANILLA.

2.2.1 DESCRIPCIÓN

(*Matricaria chamomilla*). *Matricaria* proviene del latín *matriz*, *matriz*, por considerar esta planta como excelente para dolencias de este órgano en las mujeres.

Chamomilla proviene del vocablo griego *chamaimelon*, que significa pequeña manzana de tierra, aludiendo a la forma y olor del botón de esta planta.

Hierba aromática con hojas muy finas, filiformes, y con ramas pequeñas terminadas en cabezuelas de botón amarillo dorado y lígulas blancas. El involucre que rodea la cabezuela esta formado por hojas verdes pequeñas, cada una de ellas con una membrana incolora o rubia. Con las lígulas extendidas, las cabezuelas de manzanilla tienen unos 2 cm., de diámetro.

³ SUQUILANDA V MANUEL B. Plantas Medicinales y Hierbas Aromáticas UPS 1995 pag. 37.

El tallo y las hojas, de esta planta saben a manzana, y son aromáticas. Las flores son un poco amargas y despiden el característico olor a manzanilla.

Se cría en lugares montañosos en casi todo la serranía del país, (2000 a 2600 msnm.), es de cultivo muy fácil.

2.2.2. - CARACTERÍSTICAS.

El más importante de sus productos es la esencia, que se saca de las cabezuelas, por destilación, en cantidades variables. En la manzanilla se encuentra asimismo notables cantidades de vitamina C., en la planta florida y desecada ⁴, hasta 0.73%.

La manzanilla es antiespasmódica, sedante, y se utiliza principalmente en los trastornos de tipo nervioso de mujeres y de niños; en aquellas sobre todo, cuando sufren molestias de sus periodos menstruales, es también estimulante de la digestión. Actúa a si mismo favoreciendo los movimientos peristálticos del intestino, y por lo tanto, tiene notables propiedades carminativas. En la manzanilla se han reconocido moderadamente facultades desensibilizantes o antihistamínicas. Su rango de temperatura de secado es entre 85 y 110 °F.

2.3. - MENTA. (MENTHA PIPERITA).

2.3.1. - DESCRIPCIÓN.

La denominación española de la menta es vaga y compleja, refiriéndose a numerosas especies vegetales, conociéndola también como hierbabuena.

Es una herbácea, que erguida puede alcanzar un medio metro, toda la planta desprende un agradable olor, con tallos cuadrangulares, muy ramificados, con hojas grandes, largas, anchas y ovaladas.

⁴ Dr. P. FONT QUER Plantas Medicinales, Editorial Labor 1982 pag. 860 - 880

⁵ SUQUILANDA MANUEL V. Plantas Medicinales y Hierbas aromáticas UPS 1995 pag. 37.

Toda la planta es de un color verde intenso. Su floración se realiza en verano, se recolecta cuando esta a punto de florecer, se emplea las hojas.

La menta es fuertemente aromática, cultivándose en jardines, en huertas, vegetando espontáneamente y abundantemente en los bordes de los caminos, en los pastos montañosos, en los prados y en los cursos de agua.

Se la conoce también con el nombre de hierba buena, el contenido de aceite esencial constituido por mentol, crece en un clima cálido / frío.

2.3.2. - CARACTERÍSTICAS.

En lo referente a la recolección, hay que distinguir dos posibilidades, según se pretenda obtener hoja seca o aceite esencial. En el primer caso son posibles dos cortes anuales, antes de la floración o al iniciarse esta. En el segundo caso, cuando la menta se destina a la obtención de su esencia solamente se da un corte anual, el cual es cuando la planta esta en plena floración, pues entonces su rendimiento y riqueza en mentol es mayor.

En este caso hay que tener en cuenta que si se trata de una pequeña superficie cultivada, para el corte puede esperarse hasta la floración total; pero cuando se trata de grandes extensiones se debe adelantar el corte, es decir, lo que permitirá finalizar las tareas de cosecha con la planta en plena floración. Si se inicia el corte en este ultimo estado, se corre el riesgo de que comience la caída de las hojas con las consiguientes mermas de cantidad, y además en la calidad, pues disminuye el contenido de mentol.

La infusión de hojas secas y la esencia tienen propiedades antiespasmódicas, anticoléricas, estimulante estomacal. Sus propiedades hay que atribuir las a la esencia, y primordialmente al mentol. La menta amortigua la sensación de dolor.

La menta seca naturalmente, a la sombra y en locales bien ventilados, también artificialmente en secadores de aire, cuya temperatura ⁶ debe estar entre 85 a 110 °F.

2.4. - ORÉGANO. (ORIGANUM VULGARE).

2.4.1. - DESCRIPCIÓN.

El orégano nace de una delgada cepa que se arrastra casi a flor de tierra, enraizada en ella.

Sus flores pequeñas ofrecen un pálido color rosado, el orégano realiza su floración en verano. Sus flores pequeñas se hallan dispuestas en apretados y breves ramilletes, la planta despide buen aroma cuando se restriegan las hojas entre los dedos, siendo su componente principal la esencia de orégano, de color amarillo.

Se cría en las arboledas poco espesas, entre las matas y en los linderos a una altura de 800 a 2000 msnm.

2.4.2. - CARACTERÍSTICAS.

El orégano es un eficaz tónico y digestivo. También se le considera antiespasmódico, siendo un poco sudorífico. Se recomienda en las digestiones difíciles y lentas, en las alteraciones nerviosas, en las palpitaciones excesivas del corazón, en el asma. Se emplea con frecuencia en la cocina para dar sabor y aroma a toda suerte de carnes estofadas. Se deshidrata a una temperatura ⁷ entre 85 a 110 °F.

⁶ Dr. P. FONT QUER Plantas Medicinales, Editorial Labor 1982 pag. 870

⁷ SUQUILANDA MANUEL V. Plantas Medicinales y Hierbas aromáticas UPS 1995 pag. 37.

2.5. – CURVAS DE SECADO.

En la curva de secado se refleja la pérdida de humedad del sólido húmedo en el lapso de tiempo de secado.

Antes de describir el comportamiento de la curva de secado, existen algunos conceptos involucrados en este proceso que se indican a continuación.

- **Humedad.** – Es el contenido de agua que contiene un sólido, la humedad puede presentarse de dos formas, base húmeda y base seca.⁸

- **% Humedad base seca (CH_s)**

Relacionada la masa de agua con la materia seca.

$$CH_s = \frac{100.M_a}{M_s} \quad (2.1)$$

Donde: CH_s, porcentaje de humedad en base seca (%), **M_a**, masa de agua (Kg.), **M_s**, masa de la materia seca (kg.)

- **Humedad en base húmeda (CH_H).**

Relaciona la masa de agua con la masa total del Producto.

$$CH_H = \frac{M_a.100}{M_a + M_s} \quad (2.2)$$

⁸ FAIRES , Moring. Termodinámica, unión tipográfica, editorial hispanoamericana en 1980. pags. 551-552-553

Donde: CH_H , Porcentaje de humedad en base húmeda (%), Ma , Masa de agua (Kg.), Ms , Masa de la materia seca (Kg.)

Como la masa seca es la misma para ambos casos, estas dos relaciones se las puede combinar, obteniéndose:

$$CH_s = \frac{CH_H \cdot 100}{100 - CH_H} \quad (2.3)$$

Donde: CH_s , Porcentaje de humedad en base seca (%), CH_H , Porcentaje de humedad en base húmeda (%)

- Humedad relativa del aire (Φ)

Humedad relativa del aire, es la relación entre la presión de vapor (P_v) ejercida por la humedad contenida en él, con la presión de saturación del vapor (P_s) para ese aire a la temperatura predominante.

$$\Phi = (P_v / P_s) \cdot 100 \quad (2.4)$$

- Humedad de equilibrio.

La humedad retenida en un sólido ejerce una determinada presión de vapor (P_v'), la humedad contenida en el aire también ejerce una presión de vapor (P_v).

Al estar en contacto un sólido con el aire puede acontecer que el sólido pierda humedad por evaporación cediéndola al aire, o que gane humedad de este último hasta que las presiones de vapor del sólido y la del aire se igualen, es decir que se cumpla que $P_v = P_v'$ en este punto se dice que se ha llegado al estado de equilibrio, y el contenido de humedad presente en el sólido es estas condiciones se conoce como humedad de equilibrio. (Es el límite al que puede llegar el contenido de humedad de un sólido en un proceso de secado bajo condiciones determinadas)

- **Temperatura bulbo seco (Tbs).**

Es la temperatura que registra el termómetro del aire circundante.

- **Temperatura bulbo húmedo (Tbh).**

Temperatura que se registra en procesos de entalpía constante, se mide con un termómetro de vidrio común envuelto con un paño húmedo.

- **Humedad ligada.**

Es la contenida por el sólido, que ejerce una presión de vapor menor que la del líquido a la misma temperatura.

- **Humedad no ligada.**

Es la contenida en el sólido y que ejerce igual presión de vapor en equilibrio que la del líquido.

- **Humedad libre.**

Es la contenida en exceso en relación a la humedad de equilibrio. Solo esta puede ser evaporada.

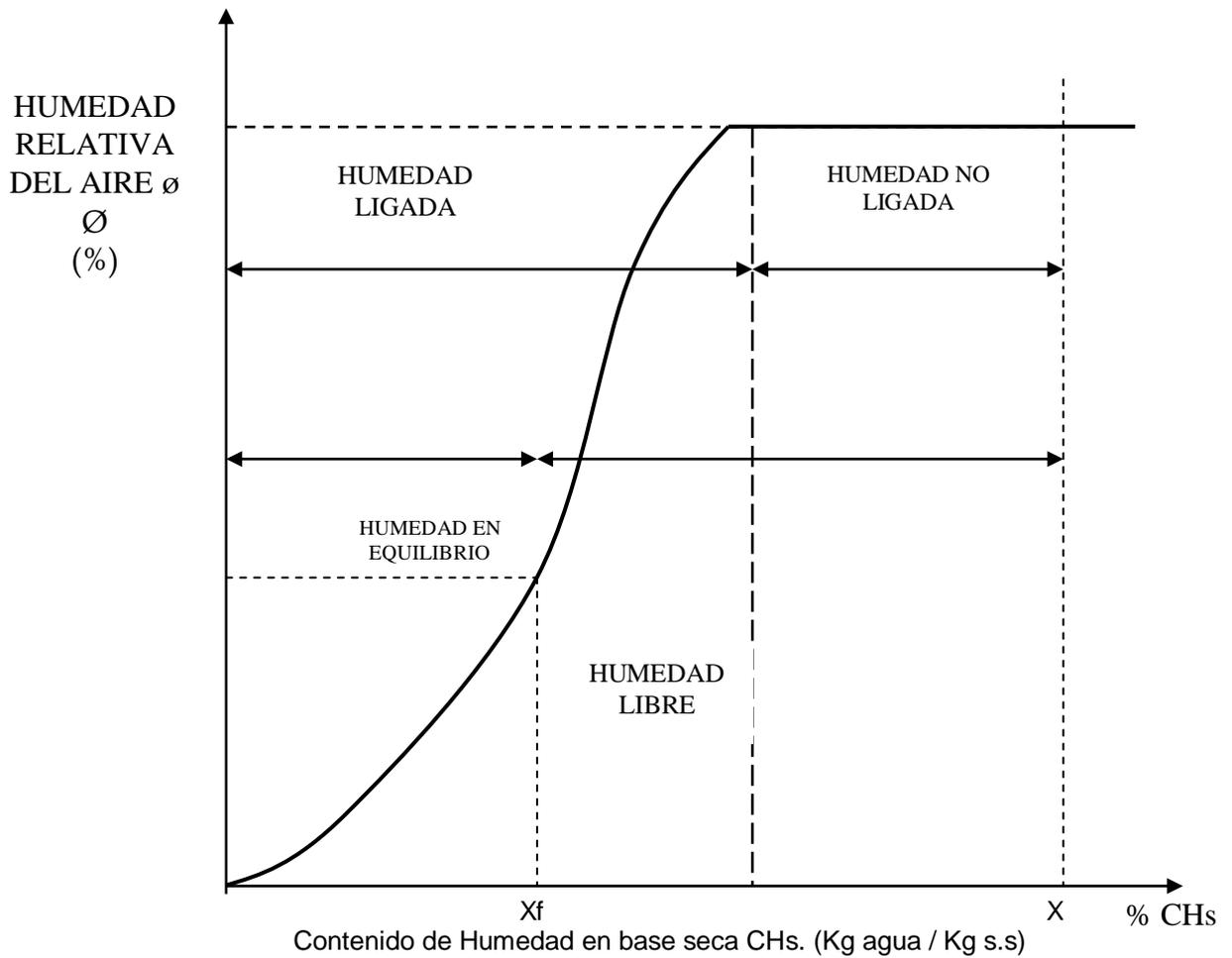
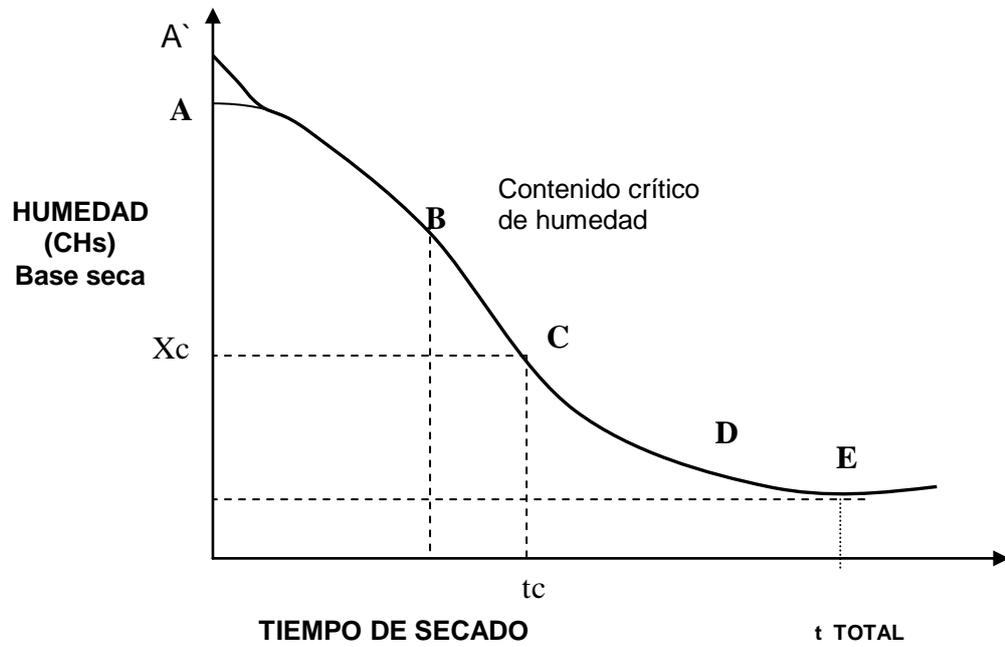


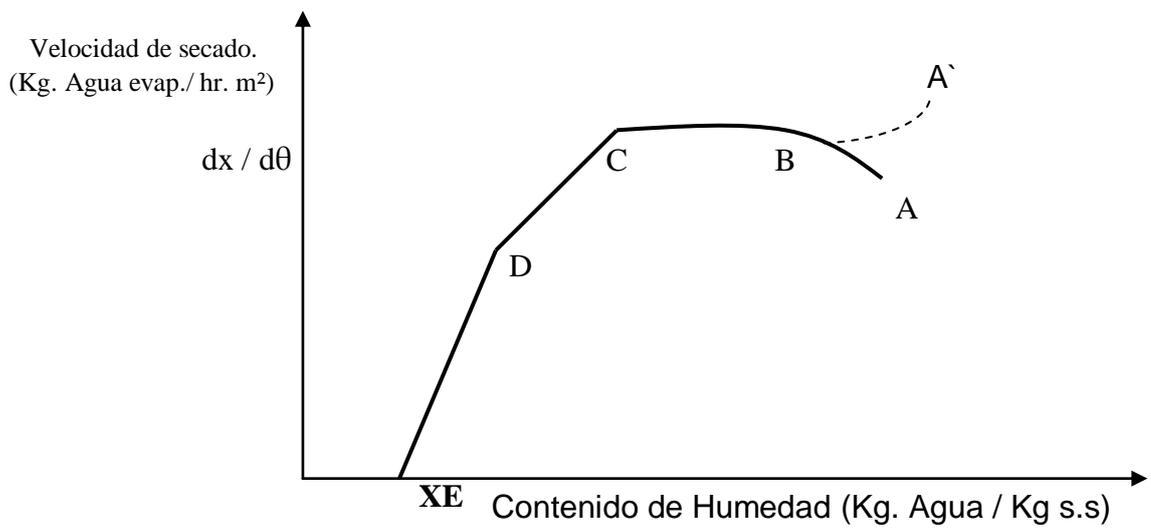
Figura 2.1 Humedad relativa del aire vs contenido de humedad base seca.

- Comportamiento de la curva de secado.

El comportamiento de un sólido húmedo, que es sometido a un proceso de secado, con la intervención de un gas seco (**aire**), a temperatura y humedades constantes, obedece al siguiente proceso. Figura 2.2.



Curva de Régimen de secado



Curva de velocidad de secado

Figura 2.2 Curvas de secado.

- Fase de estabilización o ajuste.

Cuando el sólido húmedo es expuesto a un medio ambiente seco ocurre un período de ajuste de la temperatura y del régimen de secado, esta se da como indican los segmentos AB y A` B, como una disminución de la humedad a lo largo del tiempo, estas variaciones ocurren hasta que la temperatura superficial del sólido haya alcanzado la temperatura de bulbo húmedo del aire, para luego la rapidez de secado como la temperatura estabilizarse.

- Secado constante.

Luego del período de estabilización, se presenta una etapa en que la humedad que envuelve al sólido se evapora con un régimen constante, en esta parte la superficie del sólido se halla totalmente saturado de humedad, debido a la salida de agua desde el interior. El segmento BC representa esta fase de pendiente constante, fase que termina cuando el producto llaga a un contenido de humedad que se conoce como humedad crítica, y esta se manifiesta cuando la humedad que produce desde el interior del producto no es suficiente como para que su superficie se encuentre saturada.

- Secado decreciente.

El período de secado decreciente se lo representa por los segmentos CD; DE. Luego de alcanzar el contenido crítico de humedad, la temperatura del sólido comienza un incremento y la velocidad de secado disminuye rápidamente, debido a que el flujo de agua desde el interior es menor a la transferencia de masa húmeda desde el producto hacia el aire. CD representa el secado desde el contenido crítico de humedad hasta el estado en que la superficie del sólido se ha secado totalmente; DE tiene una pendiente menos pronunciada, fase en la cual la velocidad de secado disminuye rápidamente, y el contenido de humedad alcanza la fase de equilibrio.

CAPÍTULO 3

ENERGÍA SOLAR Y SECADO

3.1. - CARACTERÍSTICAS DE LA ENERGÍA SOLAR DISPONIBLE EN EL PAÍS.

Nuestro país por estar ubicado en una zona ecuatorial, es privilegiado en lo que se refiere a cantidad y calidad de radiación solar que recibe, (ver tabla N° 1 Radiación Global anexo A.1). Se debe tener muy en cuenta la difusión de esta energía solar, ya sea a causa de la humedad proveniente de la amazonía, la humedad atmosférica, el polvo o la contaminación.

La mejor alternativa para expresar, el potencial de la energía en el país, es a través de las líneas de ISORADIACIÓN, es decir, las líneas que unen puntos que corresponden a zonas con iguales o similares cantidades de radiación solar global incidente.

En el Ecuador las mediciones solarimétricas existentes las realiza el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), el cual mide la energía solar global diariamente en 10 sitios, (Fig. A, anexo A.2); también se tiene los valores de radiación global en la ciudad de Quito en el año 2004 y 2005. Las estaciones meteorológicas hacen dos tipos de mediciones:

- La energía solar global (radiación directa y difusa) diaria, a nivel del suelo, expresado en unidad práctica: watio – hora / metro cuadrado día. (Wh/m²día).
- La duración diaria o mensual de la insolación (radiación directa), expresado en horas o en porcentaje de la duración total del día (también llamada heliofanía).

En el mapa de la (Fig. B, anexo A.3) se ve las isohelias anuales publicadas por el INAMHI, de acuerdo a este las mejores zonas en cuanto a radiación global son:

- Parte norte de la sierra: Cerca de Quito e Ibarra (Pichincha e Imbabura)
- Parte central de la sierra: Especialmente las provincias de Cañar y Chimborazo.
- Parte sur de la sierra: Área de Carimanga.
- En la costa: Región Occidental de las provincias de Esmeraldas, Manabí y Gayas.
- Las Islas Galápagos.

3.2. - FUNDAMENTOS Y FORMAS DE SECADO.

El término secado se define como la remoción de la humedad de un material, dicha humedad se refiere en la mayoría de los casos a la provocada por el agua, y la remoción más común es la evaporación de esta en un flujo de aire caliente, aunque existen muchos otros métodos de secado, como son al vacío, por osmosis, por congelación-sublimación.

La deshumidificación puede llevarse a cabo en sólidos, líquidos o gases, de manera parcial o total. En la practica en la mayoría de casos de secado de sólidos, la humedad es agua y el gas receptor el aire, por lo que en los análisis que se harán a continuación se tomará a la combinación de estos elementos como base del estudio de secado de las hierbas aromáticas, teniendo en cuenta que precisamente es la eliminación del agua contenida en estas, con la intervención del aire caliente el propósito fundamental de este proyecto.

El aire presenta como componentes principales oxígeno, nitrógeno y vapor de agua. Cada gas ejerce parte de la presión total del aire, la cual es medida por el barómetro. Dependiendo de la cantidad de vapor de agua contenida en el aire se ejerce una presión parcial distinta, la cual es máxima al saturarse el

aire con vapor de agua, lográndose así lo que se denomina presión de saturación , la cual varía con la temperatura y con ella la capacidad de contener agua.

En cuanto al agua que se halla en el material a deshumificarse, se encuentra en 4 formas:

- a) Agua superficial: se produce por lluvias o condensaciones producidas por cambios de temperatura, se mantiene adherida a la planta por fuerzas capilares y de tensión superficial.
- b) Agua absorbida: ocupa espacios intergranulares y poros, es agua superficial que ha penetrado en la planta o que queda aún del proceso de maduración, se mantiene en la planta por fuerzas capilares.
- c) Agua ligada: está unida más íntimamente a la sustancia de la planta, se mantiene por fuerzas de atracción molecular.
- d) Agua de constitución: está unida a la materia seca en forma química, forma parte de la propia sustancia del material y no es posible removerla sin desnaturalizar la esencia del producto.

En el proceso de secado el primer requisito es la transferencia de calor a la superficie del material húmedo por conducción y convección del aire adyacente a temperaturas superiores a las de material que se seca. El agua empieza a evaporarse de la superficie del material húmedo cuando la energía absorbida ha aumentado la temperatura lo suficiente para que la presión de vapor de agua supere la presión parcial en el aire ambiente. Entonces si un sólido húmedo se expone a un suministro continuo de aire fresco conteniendo una presión parcial fija de vapor P , perderá humedad por evaporación o la ganará hasta que la presión de vapor del producto sea igual a P ; el producto y el gas estarán entonces en equilibrio y el contenido de humedad del material se denomina contenido de humedad de equilibrio a las condiciones presentes.

La capacidad del aire para acarrear vapor depende de su humedad, es máxima cuando el aire esta totalmente seco y es cero, cuando esta completamente saturado.

3.2.1.- TIPOS DE SECADORES CONVENCIONALES.

Los secadores se clasifican básicamente de acuerdo a la forma de obtención del calor necesario para la evaporación de la humedad, siendo los secadores directos y los indirectos los más usados.

a) **Secadores directos.-**

En este tipo de secadores el calor se obtiene completamente por contacto directo de la substancia con el aire, en el cual tiene lugar la evaporación. En este tipo de secador se puede utilizar el secado por lotes o continuo. Existen tres formas para llevar a cabo el secado mediante flujo de aire.

- **Secado solar tradicional.-** Esta se realiza después de alcanzada la madurez fisiológica del producto, exponiéndolo en estado húmedo a corrientes de aire y a los rayos solares, ya sea en la propia planta; tal es el caso de las gramíneas como el maíz, habas, arvejas. La otra manera es extendiendo el producto sobre una superficie plana de cemento, tal es el caso del café o el arroz.

- **Secado artificial.-** Se somete al producto a una corriente de aire generalmente caliente y de baja humedad relativa, el cual se obtiene de una fuente calorífica que puede provenir de hidrocarburos, leña o electricidad, utilizando además un flujo forzado por ventiladores.

- **Secado solar modificado.-** Para este se dispone generalmente de colectores solares con un flujo de aire natural, y en algunos casos forzado.

b) Secadores indirectos.-

En estos el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para atrapar la humedad evaporada. Así el calor puede obtenerse a través de un intercambiador de calor, que muchas veces puede ser la misma pared metálica del recipiente que contiene el producto y que se encuentra en contacto con otra sustancia que provee el calor.

Entre los secadores indirectos los más usados son: secadores al vacío que utilizan la metodología del secado por lotes, los secadores rotatorios de flujo a contra corriente.

En las plantas aromáticas lo más utilizado es el secado al aire libre, y el secado al aire caliente; estos procesos se ampliarán más adelante.

3.2.2. - SECADO POR RESISTENCIAS ELÉCTRICAS.

Se usa un secador en el que circula una corriente de aire forzada por un ventilador, el aire se calienta mediante resistencias eléctricas; el producto se hace pasar dentro de la cámara de secado mediante transportadores, en donde es secado por la corriente de aire caliente.

Según el movimiento del transportador y la dirección de circulación del aire, este puede ser en flujo cruzado, en el sentido de la corriente de aire o bien en contra corriente.

3.2.3. - SECADO CON AIRE CALIENTE.

Dependiendo del tipo de circulación de aire utilizado y la energía utilizada para calentar el aire, a los secadores se los puede clasificar en: convección forzada de aire a temperatura ambiente y circulación forzada de aire precalentado por un quemador de combustible o por resistencias eléctricas.

Otra alternativa, no generalizada en nuestro país, es convección forzada de aire calentado por radiación solar.

En lo referente a las plantas aromáticas el secado al aire caliente es el más utilizado en clima templado húmedo y en las producciones importantes ya que permite la deshumidificación de grandes cantidades, el tiempo de secado queda reducido a pocas horas.

El aire caliente y seco se lo hace circular a través de la planta fresca, se carga de humedad y se renueva, en grandes procesos se lo realiza por ventilación forzada, aspirada o impulsada.

Se emplean diversos tipos de secadores: En los mas simples, la fuente de calor esta en la parte inferior de una construcción de ladrillo. En la parte superior de la misma se halla una o varios niveles de rejillas en los cuales se hallan los lechos de plantas, en estos el tiempo de secado es de 30 a 40 horas. También se emplean mucho los secadores tipo túnel, en los cuales las plantas se colocan en bandejas que recorren este túnel, en el inicio del recorrido se halla un ventilador aspirador y en el extremo opuesto la fuente de calor del túnel; estas bandejas recorren el túnel, al llegar al extremo de la fuente de calor la desecación de la planta esta terminada.

Existen secadores con cinta transportadora sin fin, sobre esta se disponen las plantas, la circulación del aire caliente y seco es forzado en sentido inverso a el movimiento de la banda sin fin, la carga y descarga se efectúa en forma continua por los extremos.

3.2.4. - SECADO CON SUPERFICIES CALIENTES.

Se suministra calor al producto, principalmente por conducción, a través de una placa caliente.

3.2.5.- SECADO AL VACÍO

El secado al vacío es un secado indirecto, es decir el producto se seca por transferencia de calor por conducción, esta transferencia se realiza entre el material húmedo y una superficie, que generalmente es una pared metálica, con lo que se logra eliminar el agua sin la presencia de corrientes de aire caliente. Al realizar el secado al vacío o cualquier otro tipo de secado, el agua se elimina como vapor.

En la gráfica a continuación, se ve la relación de la presión con la temperatura de ebullición; a una presión P_1 se tiene una temperatura de ebullición T_{b1} , pero al reducir la presión hasta P_2 se tiene una temperatura de ebullición T_{b2} menor a T_{b1} , siendo este uno de los fundamentos del secado al vacío, ya que esta operación utiliza presiones bajas con lo que se logra disminuir la temperatura de ebullición del agua que se desea eliminar.

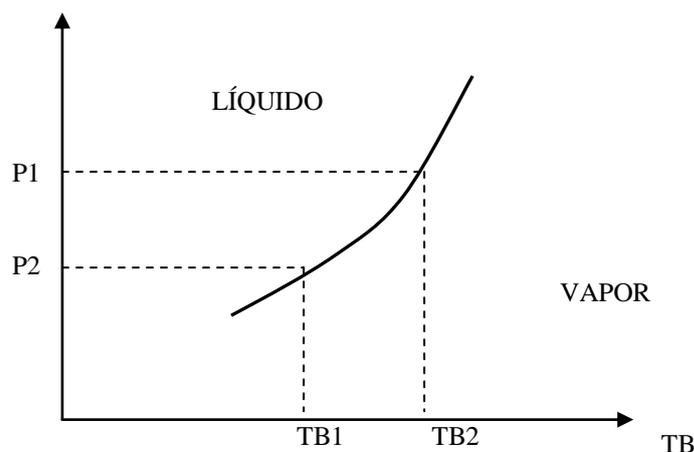


Figura 3.1 Relación de la presión con la temperatura de ebullición.

La disminución de la presión no solo permite el que el secado se realice en o sobre el punto de ebullición del agua, si no que además hace que se incremente la diferencia de temperatura entre el material a secarse y el medio calefactor, con lo que se consigue mejorar la transferencia de calor, ya que se

requiere de poca cantidad de calor par eliminar una determinada cantidad de humedad.

El secado al vacío tiene varias aplicaciones entre las que se puede citar:

- Cuando se requiere secar sustancias que son sensibles e temperaturas elevadas, ya que las pérdidas de compuestos volátiles es mínima.
- Cuando se requiere secar productos farmacéuticos y biológicos como por ejemplo: la penicilina, plasma sanguíneo, este último se somete a secado al vacío para poder ser transportado fácilmente como polvo, para posteriormente ser regenerado mediante la adición del agua.
- El secado al vacío sirve también para aislar al producto del medio ambiente, para evitar la formación de mohos, hongos y en el caso de sólidos la oxidación de estos.

3.2.6.- SECADO SOLAR.

Los secadores solares se clasifican según el modo de calentarse o la manera como se utiliza el calor derivado de la radiación solar, y según su principal modo de funcionamiento sea por circulación forzada o sistemas totalmente pasivos. Los secadores que para funcionar utilizan únicamente energía solar o eólica se clasifican como sistemas pasivos.

3.2.6.1.- SECADO NATURAL.

Estos secadores hacen uso de la acción natural de la radiación solar; de la temperatura, humedad y movimiento del aire ambiente para lograr el secado.

Para este tipo de secado, no se utilizan equipos, el producto se seca por la acción del viento que circula en ese momento, por lo que este tipo de secado dependerá de las condiciones atmosféricas, por lo que se torna en un tipo de

secado difícil de controlar. La mano de obra se reduce al mínimo, ya que aparte de la recolección, la operación adicional es colocar el producto esparcido en un patio de cemento para la acción del sol.

Es un método muy económico en los climas cálidos y secos, en el caso de las hierbas aromáticas, estas se las extiende sobre lienzos o bandejas, las cortezas y raíces, soportan bien los rayos solares. Pero este procedimiento está contra indicado para las flores, que decolora, y para las plantas que contienen aceites esenciales, las cuales pierden parte de sus componentes volátiles. Al ser un proceso lento, no existe un control sobre la duración del proceso o sobre la acción de los microorganismos que pudieran desarrollarse por el largo periodo de secado.

El secado natural de las plantas aromáticas medicinales, también se lo hace a la temperatura ambiente, en cobertizos, graneros; siendo este el proceso mas utilizado a escala artesanal. Se extienden las plantas sobre papeles, lonas o sobre telas metálicas, de tal forma que se permita un mejor flujo de aire. Se construyen secadores formados por bandejas de madera, cuyo fondo esta formado por una tela metálica, sobre la cual se colocan las hojas de las plantas medicinales.

Las plantas enteras suelen también colocarse sobre alambre, formando ramilletes, la ventilación debe ser buena.

3.2.6.2.- SECADO CON COLECTORES SOLARES PLANOS.

Una de las alternativas de la energía solar es el secado de productos agrícolas, mediante la utilización de un colector solar, para el calentamiento del aire necesario para tal proceso. Es un sistema de secado indirecto, con un colector que capta la energía solar en una forma más eficiente que la simple exposición del producto al sol.

Un colector solar plano es un captador de energía, que se adecua convenientemente para que absorba la mayor cantidad de energía posible, directa y difusa, a través de una superficie absorbadora y la transforme en calor, este calor es transferido al fluido que circula por el ducto que se encuentra en contacto con la superficie absorbadora.

Un colector solar está integrado por diferentes componentes: uno que tiene función estructural sobre el cual van todos los demás componentes, otro que tiene la función de convertir la radiación solar en calor, y otros que tienen la función de aislar el colector para evitar pérdidas. El componente más importante del colector son aquellos que convierten la energía radiante incidente en calor y aquellos que evitan las pérdidas de energía colectada.

La superficie de los colectores planos se suelen hacer de chapa metálica, fundamentalmente de hierro, cobre o aluminio; para obtener una buena conductividad se ennegrece con pintura mate, el armazón del colector puede ser construido de madera, metal, tabla.

Para disminuir las pérdidas de calor por radiación y conducción desde el colector, se coloca sobre la placa absorbadora uno o varios vidrios, o plásticos. En la parte posterior de la placa colectora y los laterales, se aísla adecuadamente; entre los aislantes se tiene aserrín, rechazos de lana, actualmente se utiliza espuma de poliuretano rígido, el cual posee baja conductividad térmica, reduciéndose así las pérdidas por conducción.

- Clasificación de los colectores solares para calentamiento de aire.

De la diversidad de colectores para calentamiento de aire, se puede hacer la siguiente clasificación:

- a) Según el número de cubiertas:

- De una cubierta: Invernaderos, secadores de madera, de leña, de productos agrícolas.

- De dos cubiertas: Deshidratadores de frutas, estufas solares.

b) Por los materiales con los que se construye el absorbedor:

- Metálicos: Láminas metálicas (aluminio, cobre, tol).

- Plásticos: Películas de polietileno negro, pvc laminado.

- Pétreos: Rocas, cemento, arena de mar.

c) Por el grado de contacto entre el absorbedor y el aire:

- De área expandida: Láminas onduladas, láminas corrugadas en forma de "V", ducto aleteado.

- De área normal: Láminas lisas.

d) Por la relación de paso del aire en el absorbedor:

- Aire arriba del absorbedor (Fig. 3.2)

- Aire abajo del absorbedor (Fig. 3.3)

- Aire arriba y abajo del absorbedor (Fig. 3.4)

- Aire en flujo cruzado respecto al absorbedor (Fig. 3.5)

De estos tipos de colectores, el más conveniente es aquel en el cual el aire circula por debajo de la placa colectora, la conveniencia se debe a que el aire lleva consigo partículas de polvo, y si este pasa por encima de la placa absorbidora, el polvo se deposita sobre esta, con lo que se provocaría la pérdida de absorbencia de la placa colectora, por ende disminuye el rendimiento térmico del colector.

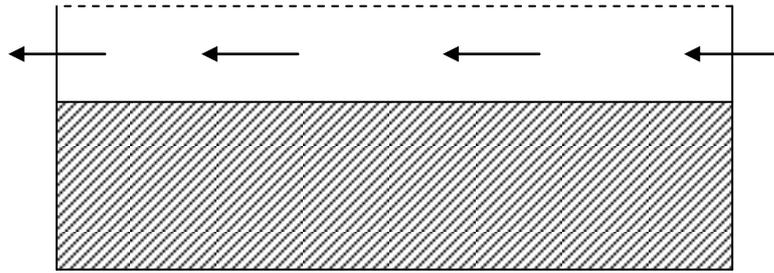


Figura 3.2. - Sección longitudinal de un colector solar con aire circulante por arriba de la placa colectora.

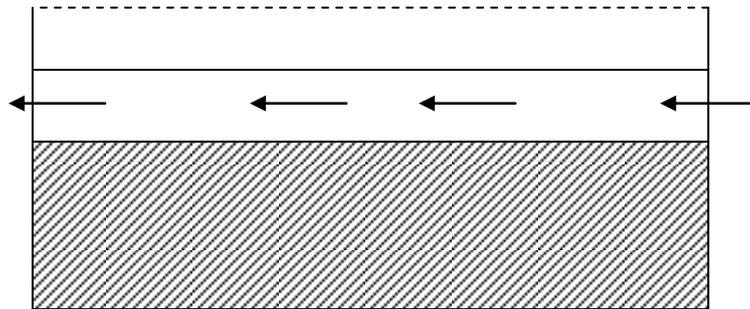


Figura 3.3. – Sección longitudinal de un colector solar con aire circulante por debajo de la placa colectora.

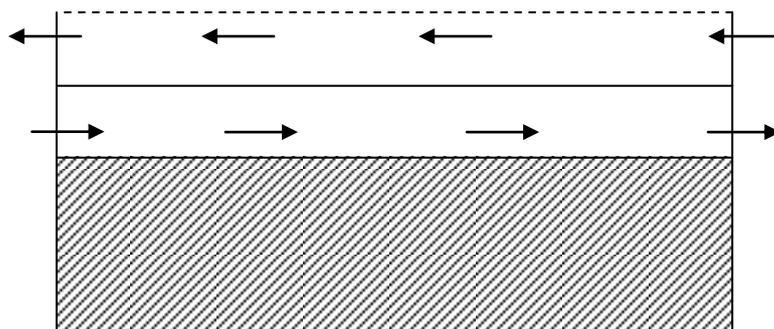


Figura 3.4. - Sección longitudinal de un colector solar con aire circulante por arriba y por debajo de la placa colectora.

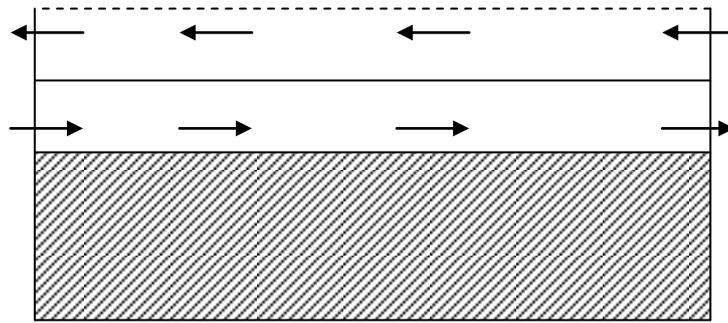


Figura 3.5. – Sección longitudinal de un colector solar con aire circulante a contraflujo por arriba y por debajo de la placa colectora.

3.2.6.3 . - SECADO POR CONVECCIÓN NATURAL.

La convección es estrictamente un medio de mover energía de un lugar a otro: es un transporte de energía, esto se da por que un fluido en movimiento (en este caso aire), recoge energía de un cuerpo caliente y la entrega a un cuerpo más frío.

En el secado solar por convección natural los rayos solares atraviesan las cubiertas transparentes del colector, incidiendo sobre la placa colectora, creando un gradiente de temperatura entre estos y el medio que los rodea, en el colector ocurre una transferencia de calor por convección natural entre el aire que se encuentra dentro de él y la placa caliente, con lo que se eleva la temperatura del aire; este aire caliente disminuye su densidad, con lo que fluye hacia arriba, dejando un espacio que es ocupado por aire fresco que entra al colector. De esta forma se genera una circulación espontánea del aire, y la convección natural tiene lugar en forma continua a lo largo de todo el trayecto del aire dentro del colector, llegando a la cámara de secado, la cual tiene una chimenea, como se representa en la figura 3.6.

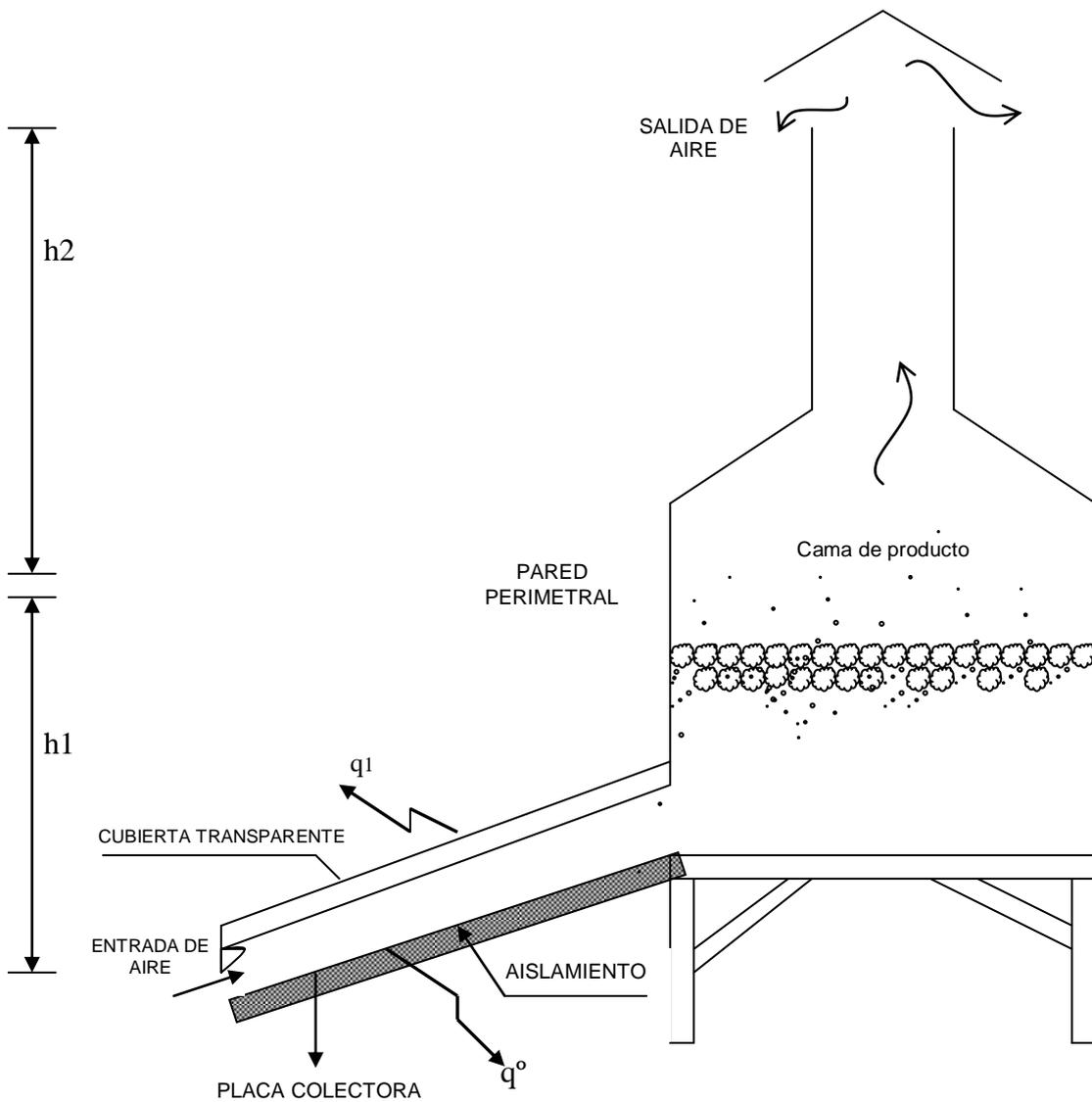


Figura 3.6 Esquema Secador

En el gráfico también se aprecia que ocurre una transferencia de calor entre la cubierta y el fluido, lo mismo que un proceso de intercambio de calor por conducción y convección entre la placa colectora y el ambiente. Estos procesos serán analizados en el diseño en si del secador.

3.3.- SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA.

El presente proyecto tiene como finalidad el secar hierbas aromáticas, mediante la utilización de un equipo que se lo pueda de utilizar en el sector rural marginal, dicho equipo debe calentar el aire necesario para el secado a una temperatura de 30 a 40 °C (temperatura apta para este tipo de producto), con una humedad inicial de 65 a 75 % y para llegar a una humedad⁹ de 15 a 20 %.

Por lo anterior el equipo de secado, deberá presentar como características principales: bajo costo inicial, construcción fácil, facilidad de manejo, tiempo de secado adecuado, mantenimiento fácil, operación segura. De las diferentes formas de básicas de secado, debemos escoger una que satisfaga las necesidades del productor rural de hierbas aromáticas, para comparar las diferentes alternativas y escoger una de ellas se debe tener en cuenta los mismos criterios de selección, los cuales les podemos agrupar en base a los siguiente criterios.

TÉCNICO.

- Construcción.
- Mantenimiento
- Funcionamiento.
- Operación segura.
- Consumo energético.
- Tiempo de secado.
- Adaptabilidad al medio.

⁹ SUQUILANDA V MANUEL B. Plantas Medicinales y Hierbas Aromáticas UPS 1995 pag. 37.

ECONÓMICO

- Costo de fabricación.
- Costo de operación.

COMPLEMENTARIO:

- Disponibilidad de espacio.
- Influencia de las condiciones atmosféricas sobre secado.

Para valorar estos criterios se utiliza una escala de 0 a 1, y determinando un puntaje para cada una de las alternativas, formando una matriz de decisión. La selección del sistema de secado se lo realiza con la ayuda de la siguiente matriz, observar tabla 3.1.

Tabla 3.1. Matriz de decisión para seleccionar el sistema de secado

ASPECTO		PONDERACIÓN	ALTERNATIVAS					
			A		B		C	
			P	COEFICIENTE A	A.P	COEFICIENTE B	B.P	COEFICIENTE C
Técnico	FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN	15	0.9	13.5	0.7	10.5	0.8	12.0
	FACILIDAD DE MANTENIMIENTO	9	0.9	8.1	0.7	6.3	0.9	8.1
	OPERACIÓN SEGURA	10	1.0	10.0	0.6	6.0	1.0	10.0
	BAJO CONSUMO ENERGÉTICO	10	1.0	10.0	0.6	6.0	1.0	10.0
	TIEMPO DE SECADO	8	0.2	1.6	1.0	8.0	0.6	4.8
	CONTROL TIEMPO DE SECADO	8	0.2	1.6	1.0	8.0	0.6	4.8
	EFICIENCIA ENERGÉTICA	10	0.1	1.0	0.9	9.0	0.7	7.0
Económico	BAJO COSTO DE FABRICACIÓN	8	1.0	8.0	0.2	1.6	0.8	6.4
	BAJO COSTO OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	8	1.0	8.0	0.4	3.2	0.9	7.2
Complementario	DISPONIBILIDAD DE ESPACIO	6	0.5	3.0	0.6	3.6	0.6	3.6
	BAJA INFLUENCIA CONDICIONES ATMOSFÉRICAS	8	0.1	0.8	1.0	8.0	0.6	4.8
TOTAL		100		65.6		70.2		78.7

Alternativas: A. – Secado aire ambiente; B. – Aire calentado con combustible y/o energía eléctrica; C. – Aire calentado con energía solar.

Como se puede apreciar en la matriz la alternativa C (Aire calentado con energía solar) presenta mayor puntaje, es decir, es la alternativa más optativa en base a los criterios presentados, que corresponde a las necesidades del agricultor rural de hierbas aromáticas.

3.4.- ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO TÉRMICO, PARÁMETROS DE OPERACIÓN.

Antes de entrar a diseñar el secador primero realizaremos un estudio de los parámetros y fenómenos que se involucran en su proceso, tales como energía solar, balances energéticos, caídas de presión.

- Energía solar

A pesar que la estructura del sol es muy compleja, el hidrógeno constituye un 80% de la materia solar, el resto en casi su totalidad esta compuesto de helio. Por lo tanto, se suele considerar que la fuente principal de la energía radiante del sol es la fusión de los núcleos de hidrógeno, que produce la formación de helio.

En las aplicaciones de energía se lo considera al sol como un cuerpo negro que esta a una temperatura de 5500 °C aproximadamente, y que emite energía en forma de radiación espectral de diversas longitudes de onda.¹⁰

- Cuerpo negro

La acción reciproca entre la radiación y un cuerpo cualquiera, es tan compleja que es totalmente imposible predecirla partiendo de principios básicos, por lo que se toma un estándar con el que pueden compararse las características de radiación de otros cuerpos.

¹⁰ B.J. BRINKWORTH. Energía Solar Para El Hombre, editorial BLUME 1981, pag. 24

Si este cuerpo tiene un número infinito de niveles de energía, de tal manera que puedan absorber y emitir a cualquier temperatura la máxima cantidad posible de radiación se dice que es un cuerpo negro.¹¹

- Radiación solar.

Radiación en si es el fenómeno por el cual un cuerpo emite energía en forma de ondas electromagnéticas dependiendo de la temperatura a la que se encuentra, y ocurre de manera más eficiente en el vacío La transmisión de calor mediante radiación, a diferencia de la conducción y convección no necesita de un medio físico para que se transmita.

Se ha determinado que la magnitud de la radiación solar para una superficie perpendicular a ella es de 1353 W/m², y se la conoce como constante solar, de la cual el 95% es de longitud de onda ¹² inferior a 2 μm.

Las radiaciones electromagnéticas tienen un carácter análogo, diferenciándose solo en la longitud de onda, inicialmente la radiación liberada por en el núcleo central del sol comienza como radiación gamma, la cual tiene una longitud de onda de cien millonésimas de milímetro, pronto esta radiación gamma se debilita convirtiéndose en rayos x.

La radiación que sale del sol y llega al espacio, se distribuye en una amplia serie de longitudes de onda, donde la mayor parte de la energía corresponde a las longitudes de onda entre diez milésimas de milímetro y una centésima de milímetro, la distribución de energía es muy similar a la del clásico cuerpo negro para una temperatura ¹³ de 5500 °C como se muestra en la figura.3.7

¹¹ FAIRES , Moring. Termodinámica unión tipográfica, editorial hispanoamericana en 1980. pags. 551-552-553

¹² B.J. BRINKWORTH. Energía Solar Para El Hombre, editorial BLUME 1981, pag. 24

¹³ B.J. BRINKWORTH. Energía Solar Para El Hombre, editorial BLUME 1981, pag. 26

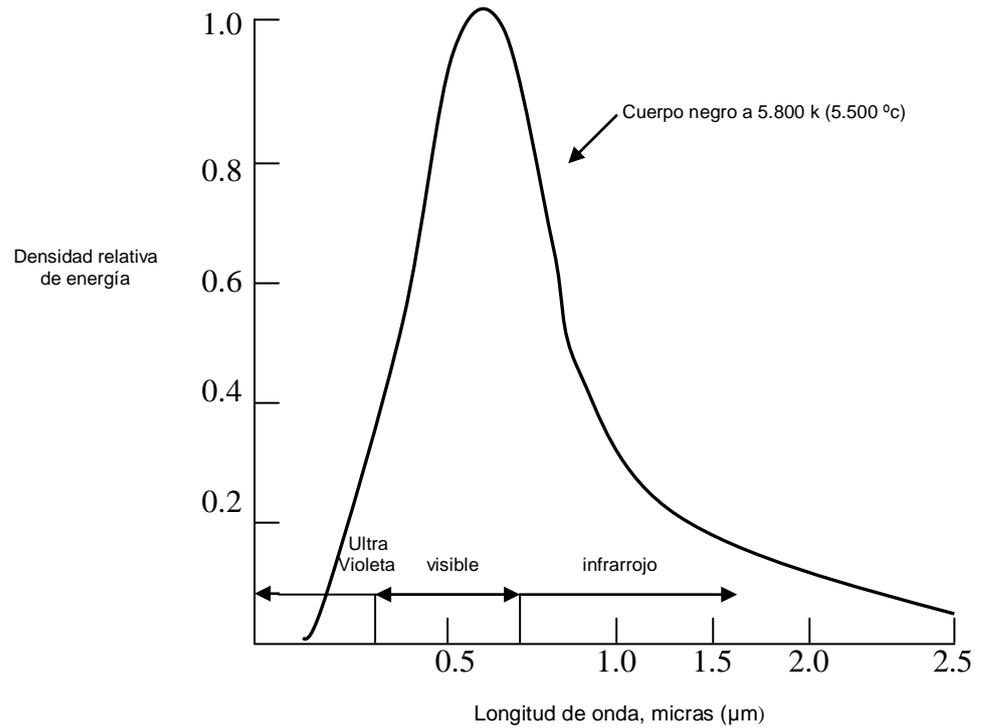


Figura 3.7. - Distribución de la energía según longitud de onda

- Constante solar (Isc)

Es la energía que radia el sol en todas las longitudes de onda por unidad de tiempo, recibida sobre una unidad de área, situadas en el límite exterior de la atmósfera terrestre y en un plano perpendicular a los rayos solares. Esta constante solar extraterrestre tiene un valor de 1353 w/m², y debido a que la distancia entre el sol y la tierra no es constante, varía de acuerdo a la época del año, como se ve en la figura 3.8 (En el ANEXO A.4 tabla No.- 2 se colocan valores más exactos).

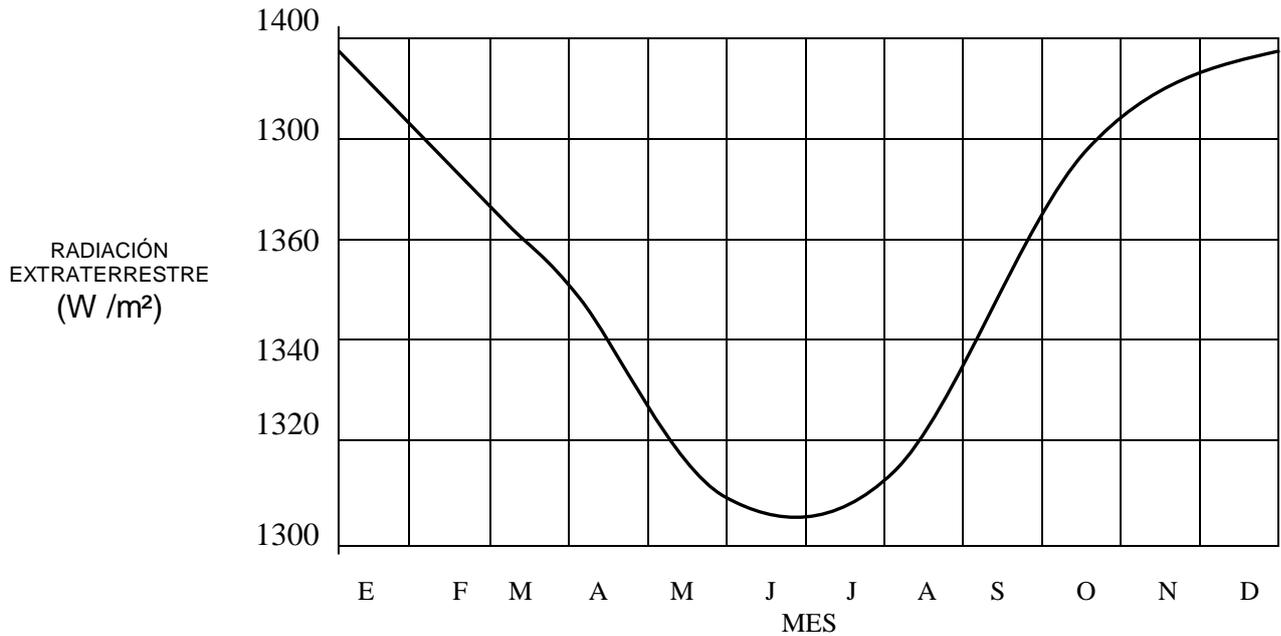


Figura 3.8. – Variación anual de la radiación extraterrestre.

En la figura 3.7, podemos ver que alrededor de la mitad de la energía solar se irradia con longitudes de onda entre 0.35 y 0.75 micras, es decir dentro de la banda visible, dentro de la banda ultravioleta con longitudes de onda menor de 0.35 micras hay pocas radiaciones, por encima de la banda visible esta lo infrarrojo, la cual aunque no se la pueda apreciar es la que contribuye a la sensación de calor.

Al llegar a la superficie de la tierra la radiación solar a sufrido una interacción con la atmósfera, lo que a provocado que prácticamente se elimine la radiación ultravioleta, los fotones con longitudes de onda dentro del espectro visible e infrarrojo, se difunden en todas direcciones, de una manera más o menos uniforme, de modo que parte de la radiación regresa de nuevo al espacio, esto se lo grafica a continuación.

Los datos de la radiación solar que llega al suelo y que son registrados por las estaciones metereológicas, proporcionan un referente histórico sobre la radiación diaria promedio que incide en una superficie plana horizontal, que a fin practico es recomendable utilizar para determinar la radiación solar de un determinada localidad.

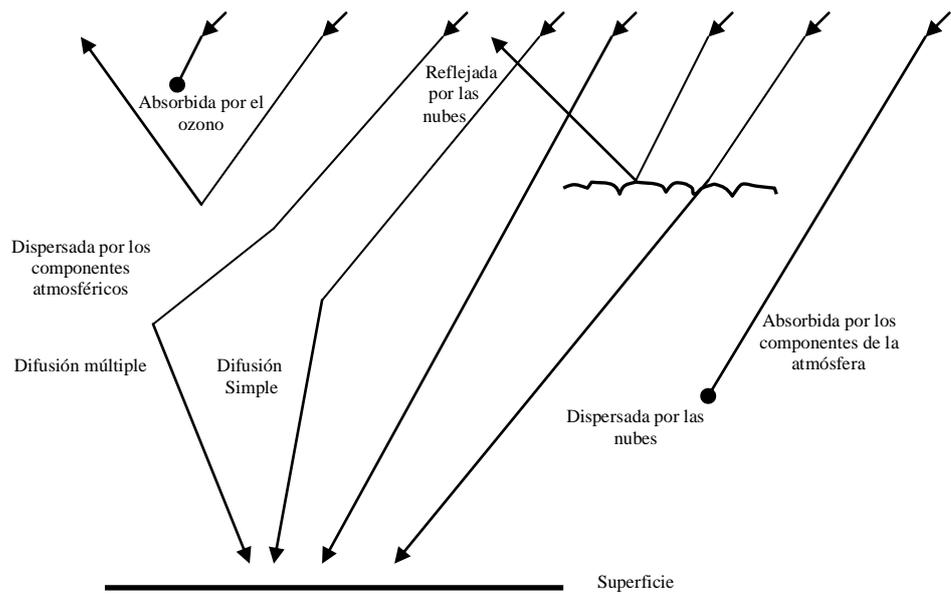


Figura 3.9. - Interacción de la radiación solar con la atmósfera. ¹⁴

- **Radiación de onda corta** (radiación solar). Radiación de longitudes de onda entre 0.2 y 4 μm , aproximadamente.
- **Radiación de onda larga** (radiación terrestre). Radiación de longitudes de onda entre 4 y 100 μm , aproximadamente.
- **Radiación solar directa.** Radiación solar que se recibe del ángulo sólido del disco solar.
- **Radiación solar difusa.** Radiación solar procedente de toda la bóveda celeste. Está originada por la dispersión de la radiación en la atmósfera.
- **Radiación solar reflejada.** Fracción de la radiación solar (directa y difusa) que es reflejada por la superficie terrestre.
- **Radiación solar global.** Suma de la radiación solar directa, difusa y reflejada.

¹⁴ B.J. BRINKWORTH. Energía Solar Para El Hombre, editorial BLUME 1981, pag. 26

- Geometría solar

Antes de entrar a evaluar la radiación solar incidentes sobre una superficie, es necesario poder determinar con exactitud la posición del sol con respecto a esa superficie, y para ello se ha especificado ciertos ángulos, como se indica en la figura 3.10

La posición de la tierra con respecto al sol cambia día a día durante todo el año, y además la posición relativa del sol con respecto a un observador en la tierra, depende también de la latitud del lugar geográfico en donde este último se encuentra.

Si se supone que el sol tiene un movimiento virtual en relación a un eje de coordenadas ubicado en la Tierra, su posición queda totalmente definida mediante dos variables: la altura solar α y el acimut γ , la primera define el ángulo que forma la visual solar con el horizonte mientras que la segunda es el ángulo formado entre la proyección de esta visual y el sur verdadero.

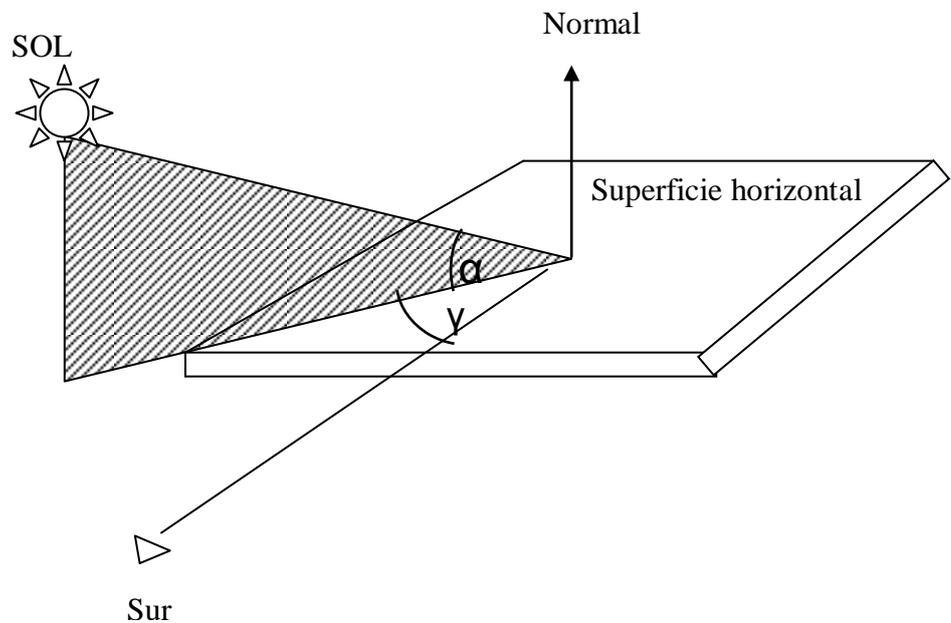


Figura 3.10 Posición del sol con respecto a una superficie.

Para calcular en forma precisa la altura α y el acimut γ , se requiere conocer tres parámetros, la latitud del lugar \varnothing , la declinación solar $\bar{\delta}$, y el ángulo horario ω .

Para el caso de Ecuador se puede asumir que $\varnothing = 0^\circ$ en todo su territorio, la declinación solar viene dada por la ecuación 3.1, y representa la desviación angular que tiene el Sol con respecto al Ecuador al medio día solar ¹⁵.

$$\bar{\delta} = 23.45 \cdot \text{Sen} \left[360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right] \quad (3.1)$$

Donde: $\bar{\delta}$ = declinación solar, positivo hacia el norte y negativo hacia el sur (grados); n , día del año. En el Anexo B.2, se encuentran valores tabulados para el Valle de los Chillos.

El ángulo horario ω es igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de 15° por cada hora de diferencia con este medio día, siendo positivo en la mañana y negativo en las tardes.

Las ecuaciones 3.2 y 3.3 sirven para calcular la altura solar α y el acimut γ , en función de ¹⁶:

\varnothing , $\bar{\delta}$ y ω .

$$\text{Sen } \alpha = \text{Cos} \varnothing \cdot \text{Cos} \bar{\delta} \cdot \text{Cos} \omega + \text{Sen} \varnothing \cdot \text{Sen} \bar{\delta} \quad (3.2)$$

$$\text{Sen } \gamma = \text{Cos} \bar{\delta} \cdot \text{Sen} \omega / \text{Cos } \alpha \quad (3.3)$$

¹⁵ - ¹⁶ A DUFFIE JOHN, and A BECKMAN WILLIAM, Solar Termal Energy Processes, A Wiley Interscience Publication 1991 pag. 15

Para calcular la longitud del día, se puede usar la ecuación 3.2 haciendo que $\alpha = 0^\circ$; $\omega = \omega_\zeta$, obteniéndose la ecuación 3.4. La ecuación 3.5 sirve para calcular las horas de asoleamiento diario T_d , es decir dicha duración.

$$\cos\omega_\zeta = -\operatorname{tng}\varphi \cdot \operatorname{tng}\delta \quad (3.4)$$

$$T_d = 2 \cdot \omega_\zeta / 15^\circ \quad (3.5)$$

En el Anexo B.2 se encuentra las relaciones entre las horas de brillo solar teórico y reales.

- Radiación solar diaria incidente en una superficie plana horizontal.

Para fines prácticos, es recomendable aplicar los valores de radiación diaria que proporcionan las estaciones meteorológicas, mediante sus registros históricos.

Esto se debe a que es inexacto predecir o calcular a partir de los datos de radiación extraterrestre, la cantidad de radiación que va a incidir sobre una superficie plana horizontal que se encuentre en la tierra, puesto que antes de llegar a la superficie terrestre, ésta se ve afectada por diversos factores como son: altura de atmósfera, nubes, polvo, humedad, (Figura 3.9). Para el presente proyecto se tomaron valores reales en el sector de ubicación de la ESPE, ya que el departamento de investigación cuenta con los equipos necesarios para tal actividad, incluso determinándose la radiación sobre un plano inclinado.

- Radiación solar incidente en una superficie plana inclinada.

Debido a que las estaciones metereológicas únicamente proporcionan los datos históricos referentes a la radiación diaria u horaria promedio que incide en una superficie plana horizontal, y que no siempre se cuenta con los equipos necesarios para la toma de mediciones, se hace necesario, contar con un método que a partir de la información entregada por las estaciones

meteorológicas permita calcular la radiación diaria promedio incidente sobre una superficie plana inclinada un ángulo S con respecto a la horizontal.

La radiación que incide sobre un plano horizontal según el ángulo azimut y una altura, es menor que si se lo hiciera sobre un plano normal a la dirección de la radiación, por lo tanto, la intensidad máxima de la radiación solar, se consigue siempre en un plano normal.

Para conocer la radiación promedio total sobre una superficie inclinada, debemos efectuar una corrección al promedio de radiación sobre una superficie horizontal ¹⁷.

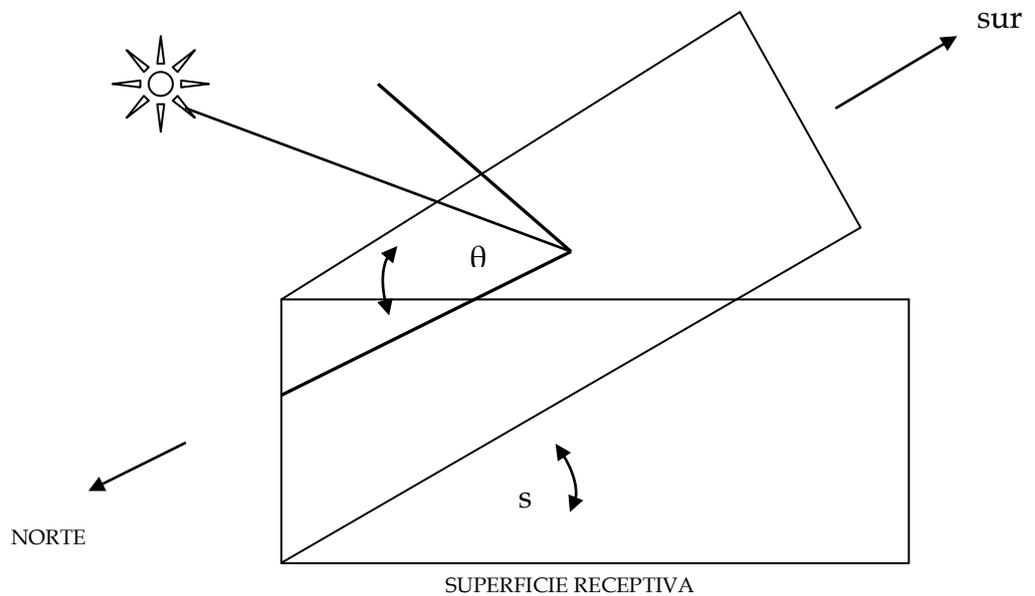


Figura 3.11 Radiación sobre una superficie plana inclinada.

$$H_{t1} = H_b \cdot R_b + H_d \cdot R_d \quad (3.6)$$

¹⁷ A DUFFIE JOHN, and A BECKMAN WILLIAM, Solar Termal Energy Processes, A Wiley Interscience Publication 1991 pag. 49,

Donde: H_t1 , Radiación solar sobre un plano inclinado, H_b , Radiación solar directa, H_d , Radiación solar difusa, R_b , Factor de corrección de la radiación directa para una superficie inclinada; R_d , Factor de corrección de la radiación difusa que toma en cuenta la radiación reflejada de los alrededores hacia el colector.

Los factores de corrección se calculan de la siguiente manera:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\sin \alpha} = \frac{\cos \left[(\varphi - S) \cdot \cos \bar{\delta} \cdot \cos \omega + \sin (\varphi - S) \cdot \sin \bar{\delta} \right]}{\left[\cos \varphi \cdot \cos \bar{\delta} \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \bar{\delta} \right]}$$

$$R_d = \left[\frac{(1 + \cos S)}{2} \right] + (H_b + H_d) \cdot \left[\frac{(1 - \cos S) \cdot Y}{2} \right] \quad (3.7)$$

Donde: Y , Es la reflectancia del suelo, sus valores aproximados es de 0.8 si hay nieve; 0.2 para tierra o vegetación y 0.15 para tejas de grava; θ , Ángulo de incidencia, es el ángulo medido entre la radiación directa y la normal a la superficie colectora. La relación entre este ángulo y los otros viene dado por:¹⁸

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \bar{\delta} \cdot \sin \varphi \cdot \cos S & (3.8) \\ & - \sin \bar{\delta} \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \\ & + \cos \bar{\delta} \cdot \cos \varphi \cdot \cos S \cdot \cos \omega \\ & + \cos \bar{\delta} \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega \\ & + \cos \bar{\delta} \cdot \sin S \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned}$$

S = Ángulo de inclinación del colector.

¹⁸A DUFFIE JOHN, and A BECKMAN WILLIAM, Solar Termal Energy Processes, A Wiley Interscience Publication 1991 pag. 15,

Cuando solo tengamos el valor de radiación total promedio diaria o mensual, sobre una superficie horizontal y no conozcamos los valores de la intensidad de radiación directa y difusa, podemos estimar utilizando la ecuación de Liu y Jordán.¹⁹

El valor de K_t , se obtiene al dividir la radiación total promedio diaria o mensual que incide sobre una superficie horizontal entre la radiación extraterrestre para la misma localidad.

$$\overline{H_{td}} / \overline{H_t} = 1.390 - 4.027 \overline{K_t} + 5.531 \overline{K_t}^2 - 3.108 \overline{K_t}^3 \quad (3.9)$$

El valor de $\overline{H_{td}} / \overline{H_t}$, (se puede obtener de la figura 3.12)

$$H_d = (\overline{H_{td}} / \overline{H_t}) \cdot H_t$$

$$H_b = H_t - H_d$$

Donde; ($\overline{H_{td}} / \overline{H_t}$) Relación entre el valor promedio de radiación difusa y el valor promedio de la radiación total.

¹⁹A DUFFIE JOHN, and A BECKMAN WILLIAM, Solar Termal Energy Processes, A Wiley Interscience Publication 1991 pag. 54

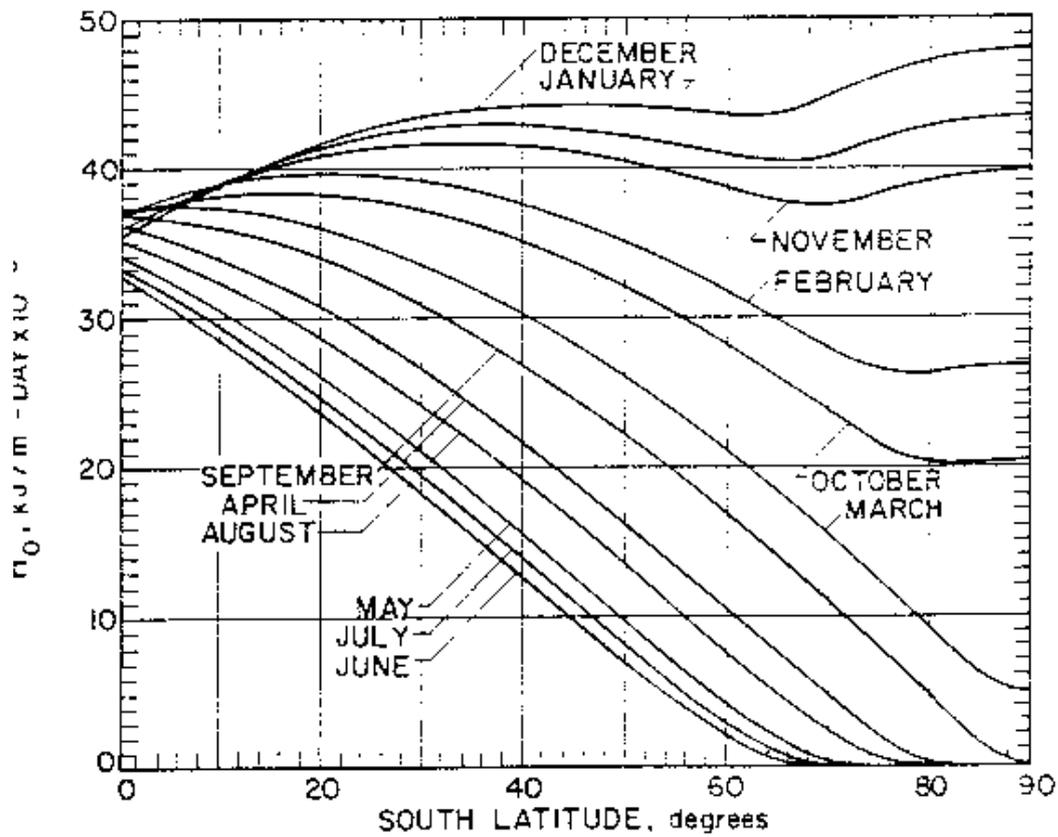
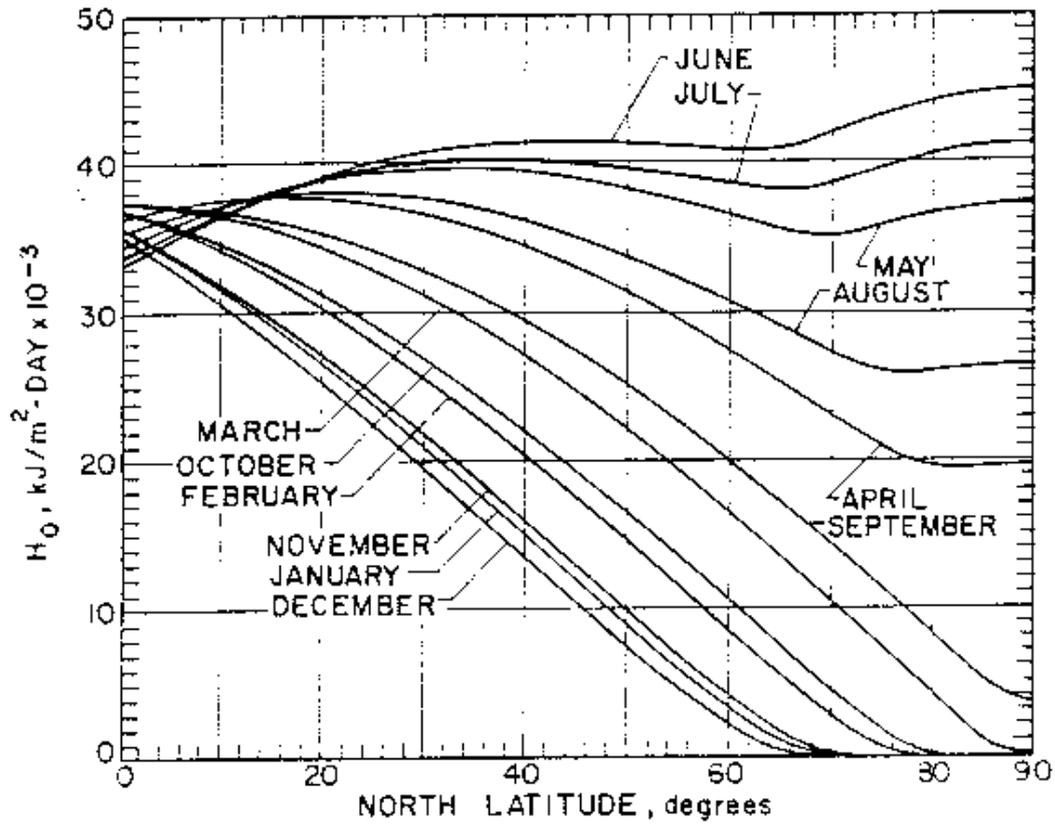
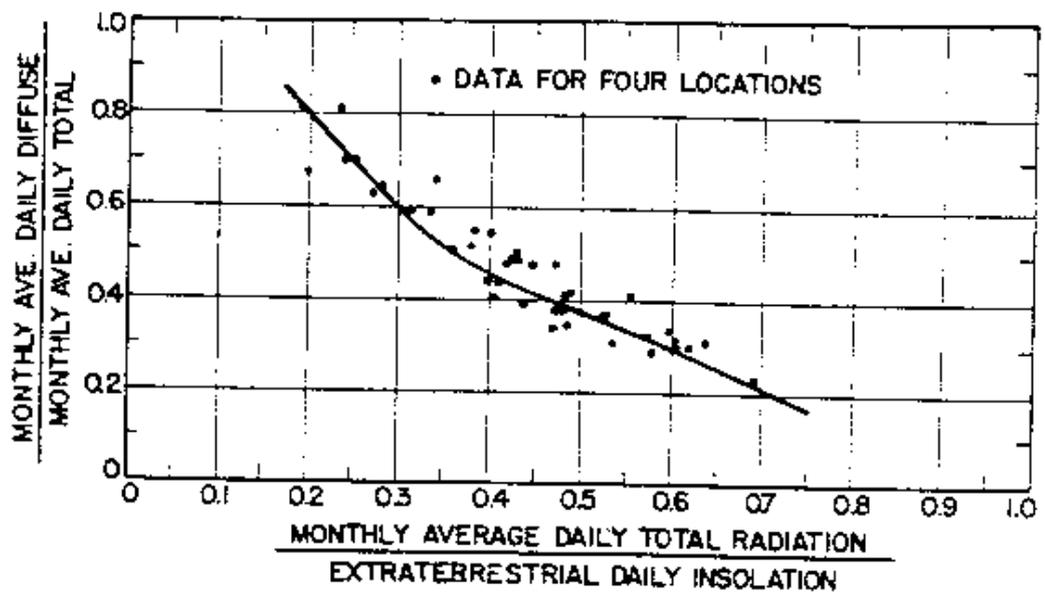
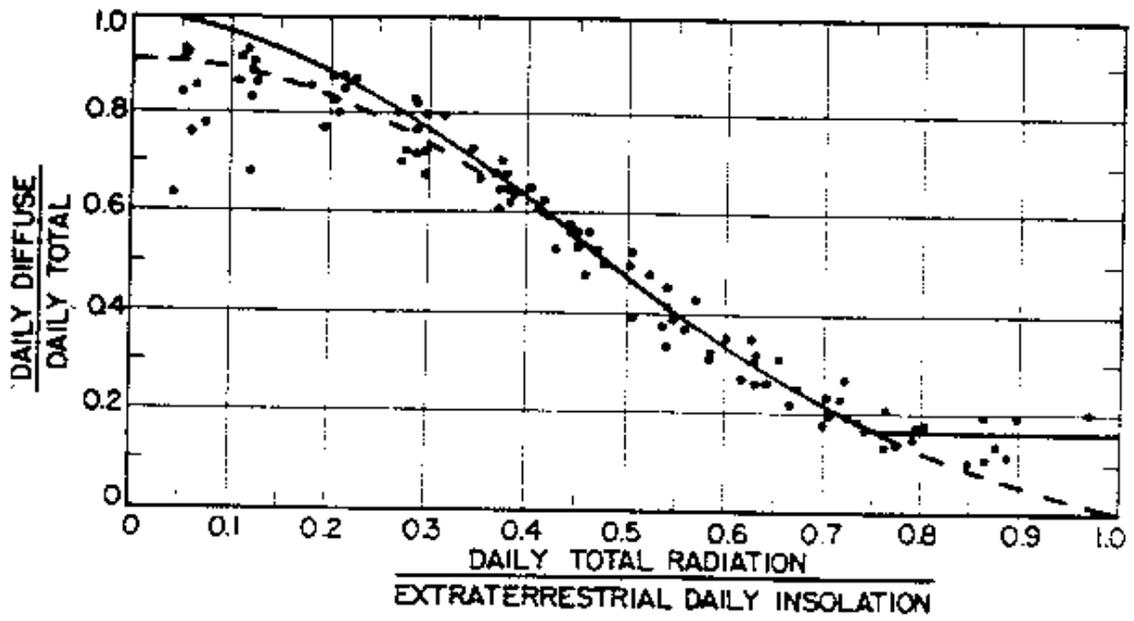


FIGURA 3.12. Relación entre la radiación difusa y la radiación total

Continuación. FIGURA 3.12



3.4.1. - CANTIDAD DE CALOR REQUERIDA PARA EL SECADO

Existen diversas maneras para determinar la cantidad de calor que se requiere para el secado de 5 Kg. de Hierbas Aromáticas, ya sea utilizando aire o superficies calientes, a continuación se procede al cálculo del calor necesario mediante la formula del calor sensible:

$$Q = m C_p (T_s - T_e) \quad (3.10)$$

Donde: **m**, masa del producto a secar (Kg); **C_p**, calor específico del producto Higroscópico (Kcal /Kg °c); **C_p**, $1.675 + 0.025 \cdot \omega$ donde ω contenido de humedad en %.²⁰**T_s**, Temperatura de secado (°c); **T_e**, Temperatura ambiente. (16,2 °c) promedio anual para Pichincha.

Debido a que una determinada masa de agua se evapora del sólido, es necesario considerar el calor latente de vaporización, el cual se determina con la siguiente expresión:

$$Q_L = m_v \cdot H_{fg} \quad (3.11)$$

Q_L, Cantidad de calor que se almacena en el vapor; **H_{fg}**, calor latente de vaporización, cuyo valor es de 540 (Kcal /Kg); **m_v**, masa de agua que se evapora desde el producto (kg).

$$m_v = \frac{MH(CH_{Hi} - CH_{Hf})}{100 - CH_{Hf}} \quad (3.12)$$

MH, masa inicial de producto o ser secado (Humedad); **CH_{Hi}**, Contenido inicial de humedad, base húmeda (porcentaje); **CH_{Hf}**, Contenido final de humedad, base húmeda (porcentaje).

²⁰R. PAÚL. SING, Introducción a la Ingeniería de los Alimentos, editorial ACRIBIA 1998 pag. 154

- Calor, perdido por las paredes

Las paredes de la secadora acumulan energía térmica y parte de este calor seden al ambiente. Para analizar la transferencia de calor se considera el modelo de placa plana, el mismo que nos permite determinar el coeficiente global de transferencia de calor, para el cual se utiliza el esquema de la figura 3.13

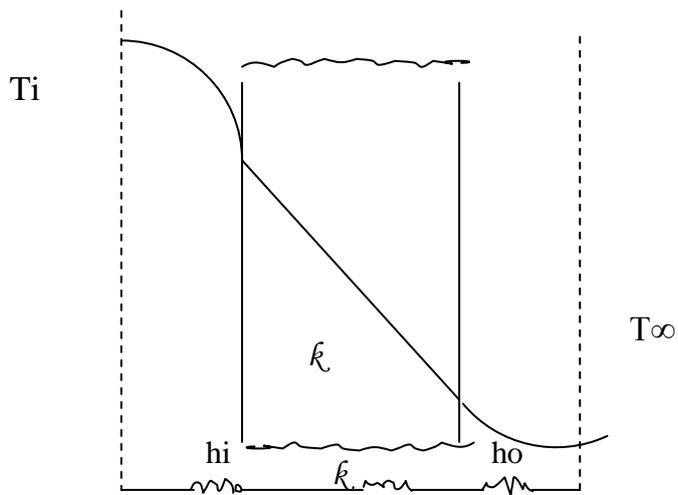


Figura 3.13 Placa Plana

Con el esquema de la figura anterior se puede realizar el cálculo del coeficiente Global de transferencia de calor con la siguiente expresión.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\Delta X}{k} + \frac{1}{h_o}} \quad (3.13)$$

Donde: U, Coeficiente Global de Transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

hi, Coeficiente de transferencia de calor por convención $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

k, Conductividad térmica del material $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$

ho, Coeficiente de convención por viento $\left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C} \right]$

Al considerar la velocidad del viento, se puede calcular ho en estado estable, y se utiliza la siguiente expresión.

$$h_o = 5,7 + 3.8 V_v \quad (3.14)$$

Donde: ho; coeficiente de convención, $\left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K} \right]$ Vv, velocidad del viento (m/s)

De tal forma que el calor necesario para calentar la cámara y el producto es el siguiente.

$$Q_T = Q_s + Q_L + Q_p \quad (3.15)$$

El cálculo utilizando las diferentes expresiones anteriormente descritas se realiza mediante el uso de (MATH CAD) el mismo que permite obtener los datos tabulados en el anexo C.1.

- Tiempo de secado

El tiempo de secado se puede calcular en dos partes, período constante y tiempo en período decreciente. ²¹

$$T_t = t_c + t_d \quad (3.16)$$

Dando el tiempo necesario para obtener el nivel deseado de humedad en el producto.

²¹SALGADO RAFAEL / GUTIERREZ FELIPE, Ingeniería de la Energía Solar, El colegio Nacional México 1994 pag. 180-185

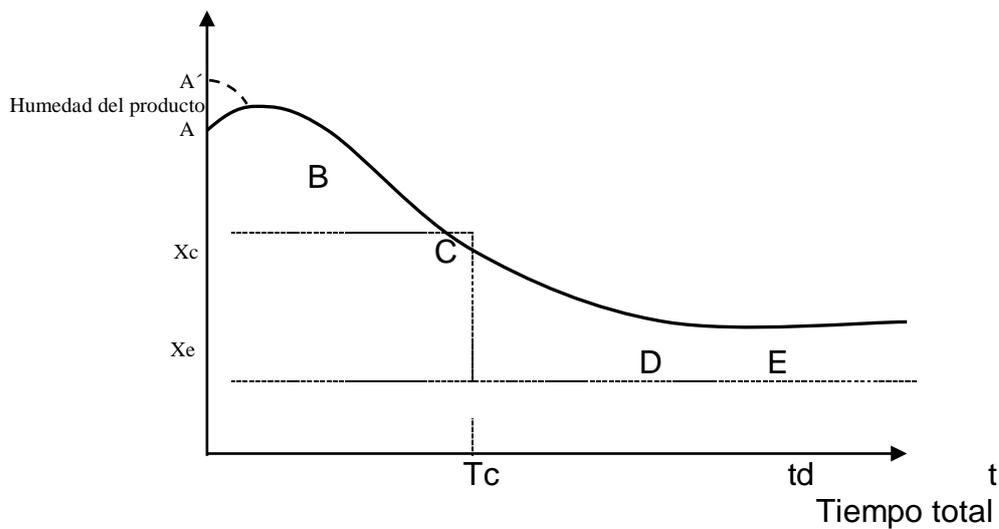


Figura 3.14 Variación de la humedad del producto con respecto al tiempo.

A' B, A-B. Es un período de calentamiento del sólido y normalmente es tan corto que no se toma en cuenta en los análisis.

B-C. La humedad superficial del grano es transferida hacia el aire a un valor único de la velocidad, por lo cual se denomina período de velocidad constante. Al punto C se le llama crítico.

C-D. Primer período decreciente. En esta sección de la curva, la humedad superficial es tan reducida que van apareciendo zonas secas que se van agrandando tal como este período finaliza.

D-E. Segundo período decreciente. El secado es dirigido por los gradientes de concentración existentes entre las partes profundas y la superficie del grano.

- Período de velocidad constante:

La velocidad de secado es:

$$N = -\frac{Ls dX}{A dt} \quad (3.17)$$

Reorganizando e integrando sobre el intervalo del tiempo, mientras el contenido de humedad cambia de X_1 a X_2

$$t = \int_0^t dt = \frac{Ls}{A} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{N} \quad (3.18)$$

Ya que $X_1 = X_i$; $X_2 = X_c$ y $N = N_c$ entonces:

$$t = \frac{Ls(X_i - X_c)}{AN_c} \quad (3.19)$$

Donde: **t** Tiempo de secado, hr; **Ls**, peso del sólido seco, kg; **A**, área de secado, m²; **X_i** humedad inicial del producto, kg agua /kg s.s.; **X_c**, humedad al inicio del periodo decreciente, kg agua /kg s.s, **N_c**, velocidad del secado, kg agua evaporada /hr . m².

- Período de Velocidad decreciente.

- a) Caso General. Para cualquier forma de curva, se puede obtener el área bajo la curva resultante al graficar X como abscisa y 1/N como ordenada y calcular el tiempo de secado como:

$$t = \frac{Ls}{A} \int_{x_i}^{x_2} \frac{dx}{N} \quad (3.20)$$

Donde los límites de la integral son el inicio y el final del período.

- b) Caso especial. En el primer período decreciente se observa que N varía linealmente con X y aplicando la ecuación (3.17):

$$t = \frac{Ls}{A} \int_{x_d}^{x_c} \frac{dx}{mX + b} = \frac{Ls}{mA} \ln \frac{mX_c + b}{mX_d + b} \quad (3.21)$$

Donde: m, pendiente de la recta, y b, constante.

Ya que:

$$m = \frac{(N_c - N_d)}{(X_c - X_d)} \quad (3.22)$$

Entonces:

$$t = \frac{Ls(X_c - X_d)}{A(N_c - N_d)} \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (3.23)$$

Donde: X_d, Humedad del producto al término de la recta, kg agua /kg s.s,
N_d, velocidad de secado al término de la recta, kg agua / hr m².

c) Aproximación. Frecuentemente, ante la escasez de datos, la curva puede suponerse como una recta entre, los puntos C y E. En este caso:

$$N = m(X_s - X_e) = \frac{Nc(X_s - X_e)}{(X_c - X_e)} \quad (3.24)$$

Con lo que la ecuación (3.23) se transforma en:

$$t = \frac{Ls(X_c - X_e)}{ANc} \ln \frac{(X_c - X_e)}{(X_c - X_e)} \quad (3.25)$$

Donde: X_s , humedad final del grano, kg agua / s.s., y X_e , humedad de equilibrio del producto, kg agua /kg s.s.

3.4.2. - VOLUMEN DE AIRE

Para determinar la cantidad de aire necesario para el secado se utiliza la siguiente expresión, para calcular la masa de aire.

$$Q \text{ necesario} = Ma \cdot C_p \text{ aire} \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.26)$$

$$\text{De esta ecuación: } Ma = \frac{Q_{\text{necesario}}}{C_{\text{aire}} \cdot (T_2 - T_1)} \quad (3.27)$$

Donde: Ma , masa de aire Kg; **Q necesario**, Cantidad de calor necesario (Kcal); C_p , aire (kj /kg °c); C_p , 1,0054 (kj /kg °c); T_2 , Temperatura de salida del aire (°c); T_1 , temperatura del aire (medio ambiente)(°c).

$$Va = Ma \cdot R \cdot Ts / p. \quad (3.28)$$

Donde: Va , Volumen de aire (m³); R , Constante (0,091 KPa m³ /kg °k); P , presión; Ts , temperatura del aire.

3.4.3. - GEOMETRÍA DEL COLECTOR Y SECADOR

Debido al uso de la tecnología solar, por sus ventajas térmicas, se debe disponer de sistemas tecnológicos sencillos de convección y transferencia térmica, por lo que, se propone el siguiente esquema para el colector.

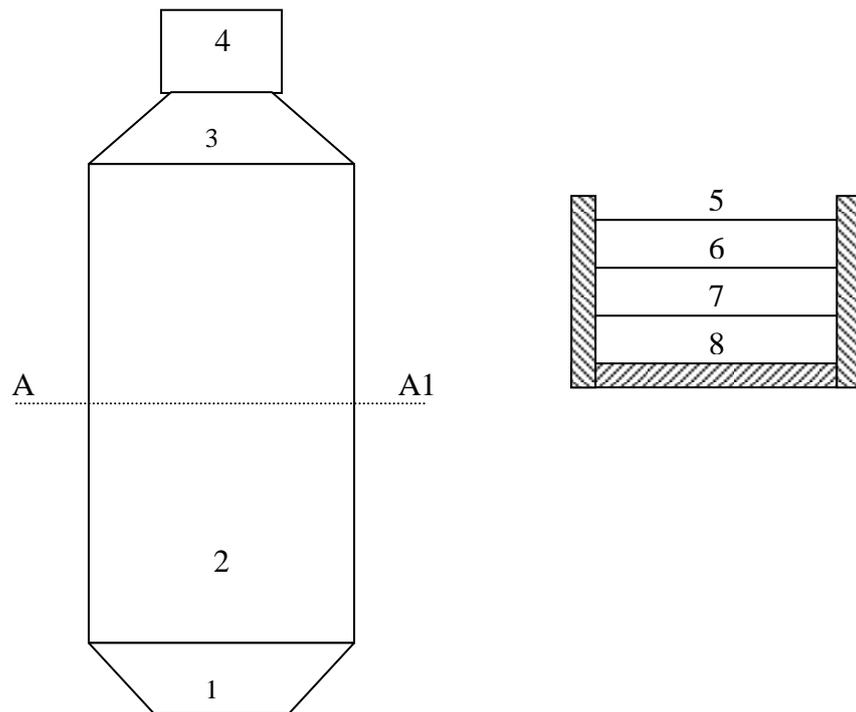


Figura 3.15. - Geometría del colector para calentamiento de aire.

De acuerdo a la figura se puede identificar los siguientes componentes.

1. - Ducto de entrada (plenum)
2. - Colector solar
3. - Tobera o colector de aire
4. - Ducto de secado
5. - Cubierta
6. - Placa absorbedora
7. - Placa posterior del ducto de calentamiento

8. – Aislamiento térmico.

- Geometría del secador

Tomando en cuenta que el recurso solar es intermitente en las diversas horas del día, se propone el siguiente esquema para el secador.

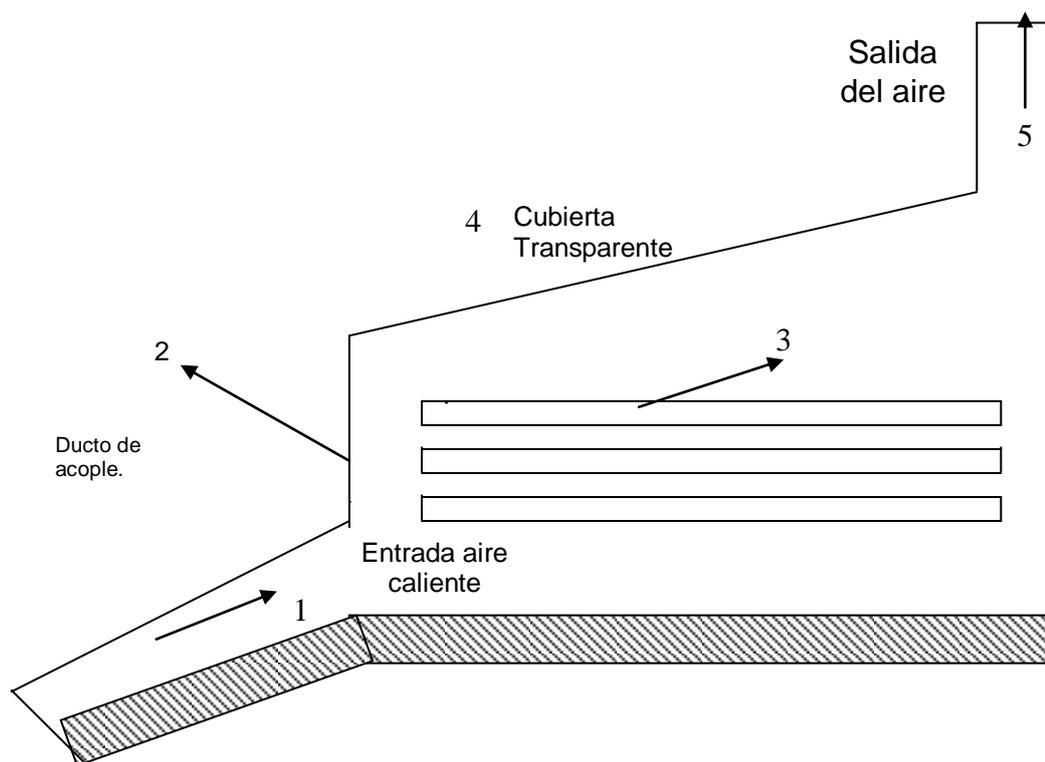


Figura 3.16 Secadora

En el esquema anterior se puede observar los siguientes componentes para la cámara de secado con capacidad de 5kg. de producto húmedo.

1. - Ducto de ingreso de aire caliente
2. – Cámara de secado
3. – bandejas
4. – Cubierta transparente
5. – Chimenea

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE LA SECADORA

Para realizar el modelamiento matemático del secador solar se tomarán en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se supondrá que la radiación solar permanecerá constante durante el tiempo que dure el secado.
- Se asumirá que las condiciones climatológicas del lugar en que se realice el secado permanecerán constantes a lo largo del día y durante el tiempo que dure éste.
- La temperatura de secado se encontrará entre 30 y 40 °C; de tal forma de no afectar la calidad del producto.
- Se supondrá que las pérdidas de calor por la parte inferior del invernadero serán despreciables, y de igual manera se considerará que la temperatura de su cubierta será igual a la del interior.
- También se asumirá que la temperatura del producto es igual a la temperatura del interior de la cámara de secado.

4.1. – DISEÑO Y CÁLCULO DEL COLECTOR SOLAR.

De acuerdo con los materiales disponibles en el mercado y con instalaciones existentes para el aprovechamiento de la energía solar para el calentamiento de aire, se plantea el siguiente modelo para realizar el balance de energía.

E RADIACIÓN DEL CIELO

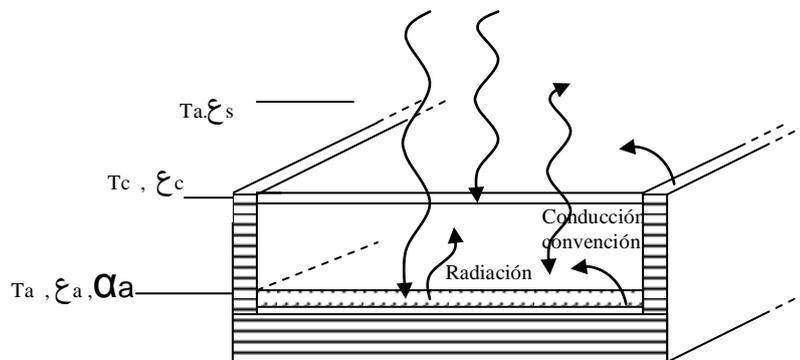


Figura 4.1 Balance energético de un captador solar plano.²²

ϵ = emitancia; α = absortancia; T = temperatura

$\alpha_a, \epsilon_a, T_a$ se refiere al absorbente : $\alpha_a = \epsilon_a = 1$

$\alpha_c, \epsilon_c, T_c$ se refiere a la cubierta

$\alpha_c = \epsilon_c = 0$ para la radiación visible

$\alpha_E = \epsilon_c = 1$ para el infrarrojo

$\epsilon_s = 0.65$ para una temperatura efectiva del cielo. T_{sky} de 17°C

σ = Constante de Stefan – Boltzmann

$$= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ } ^\circ\text{k}^4$$

²²WILSON J.I.B, La Energía Solar, editorial Alambra s.a 1982, pag. 108-109

- **Balance de energía para la cubierta.**

(no almacena energía térmica)

Energía que entra = Energía que sale

$$\begin{array}{l}
 \text{Irradiada por el} + \text{Irradiada desde} + \text{conducción} = \text{radiado hacia} + \text{radiado hacia} + \text{conducción y} \\
 \text{Absorbedor} \quad \quad \quad \text{el cielo} \quad \quad \quad \text{y convección} \quad \quad \quad \text{el cielo} \quad \quad \quad \text{el absorbedor} \quad \quad \quad \text{convección hacia} \\
 \quad \text{hacia la cubierta} \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \text{el cielo} \\
 \\
 \alpha_c \xi_a \sigma T_a^4 + \alpha_c \xi_s \sigma T_{sky}^4 + h(T_a - T_c) = \xi_c \sigma T_c^4 + \xi_a \sigma T_c^4 + h(T_c - T_{sky}) \\
 (4.1)
 \end{array}$$

$$T_\infty = 16.2 \text{ }^\circ\text{C (INAMI)} \quad ; \quad T_{sky} = 0,0522 T_{amb}^{1.5} \text{ (}^\circ\text{k)}$$

- **Balance de energía para el absorbedor**

$$\begin{array}{l}
 \text{Energía solar} + \text{Irradiada por} = \text{irradiado por} + \text{pérdida por conducción} \\
 \text{y} \quad \quad \quad \text{la cubierta} \quad \quad \quad \text{el absorbente} \quad \quad \quad \text{convección hacia la} \\
 \text{Incidente} \quad \text{Cubierta} \\
 \\
 \alpha_a E + \alpha_a \xi_c \sigma T_c^4 = \xi_a \sigma T_a^4 + h(T_a - T_c) \quad (4.2)
 \end{array}$$

En la práctica de ingeniería térmica es común reducir la ecuación de balance calorífico de un colector solar plano en una forma lineal introduciendo todas las pérdidas de energía no deseables en un término, el coeficiente de pérdida U_L , y utilizando un (factor de extracción de color) F_R , para la pérdida de energía útil. Esta se llama la ecuación Hottel – Whillier _ Bliss. ²³

$$Q_u = A_c \cdot F_R \left(\tau \cdot \alpha \cdot I - U_L (T_f - T_a) \right) \quad (4.3)$$

Donde; **Q_u** Color Útil (w – h), **Ac** Área del colector (m²), **F_R** Factor de remoción de calor (adimensional), **τ** Transmitancia de la cubierta (adimensional), **α** Absortancia de la placa colectora (adimensional), **I** Radiación solar promedio total incidente (W – h/m²día), **U_L** Coeficiente de pérdidas totales (W / m² °k), **T_f** Temperatura promedio del fluido de ingreso (°k), **T_a** Temperatura promedio del ambiente (°k), **tr** Tiempo de aprovechamiento de la energía solar incidente (h).

El factor de remoción de calor **F_R**, relaciona la ganancia útil real del fluido con la ganancia que se obtendría si toda la superficie del colector estuviera a la temperatura del fluido de ingreso.²⁴

$$F_r = \frac{ma \cdot cp}{Ac \cdot UL} \cdot \left(1 - e^{-\left[\frac{Ac \cdot UL \cdot F^1}{ma \cdot cp} \right]} \right) \quad (4.4)$$

Donde: **ma** Flujo másico de aire (Kg /s), **cp** Calor específico del aire (j / Kg °c), **AC**, es el área del colector (m²), **F'** es el factor de eficiencia del colector (adimensional), que representa la relación entre la ganancia actual de energía útil captada por el colector y la que captaría si la placa absorbente estuviera a la temperatura del fluido. **F'** depende de la geometría del colector y del caudal másico de fluido. La dependencia con la temperatura es reducida. Para el caso del colector de placa plana que estamos utilizando, este se calcula de la siguiente forma:

$$F^1 = \frac{1}{1 + \frac{UL}{h1 \frac{1}{\frac{1}{h2} + \frac{1}{hr}}}}} \quad (4.5)$$

²⁴DUFFIE J, BECKMAN W, Solar Engineering Thermal Processes, Jhonn Wiley, Inc, 1980 pag. 164

Para el cálculo del coeficiente de radiación, placa cubierta, se tiene:

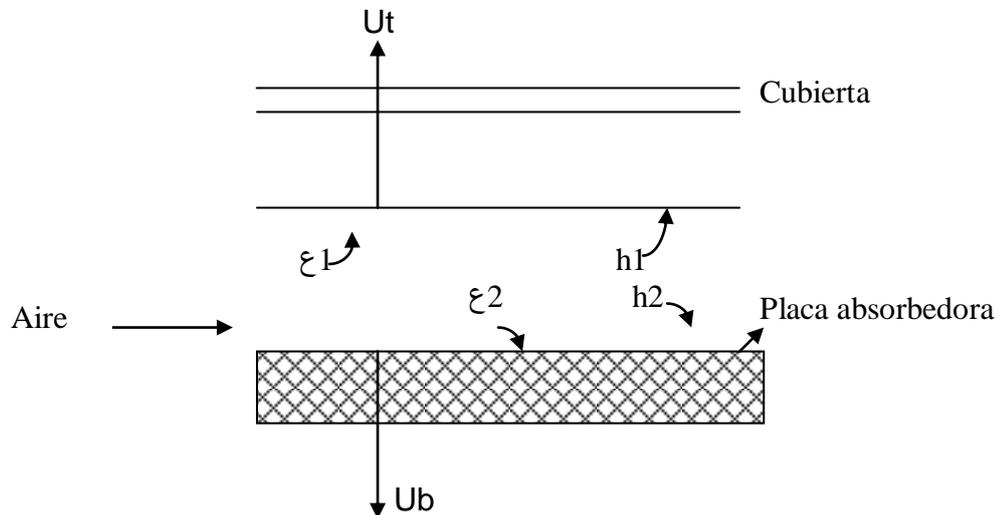


FIGURA 4.2 Colector solar con placa plana. Esquema de los coeficientes de transferencia de calor

Donde: h_1 Coeficiente de transferencia de calor entre la placa colectora y el aire circundante ($W / m^2 \text{ } ^\circ C$), h_2 Coeficiente de transferencia de calor entre la placa posterior y el aire circundante ($W / m^2 \text{ } ^\circ C$), h_r Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa posterior y la placa colectora ($W / m^2 \text{ } ^\circ C$)

$$h_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\xi_1} + \frac{1}{\xi_2} - 1}$$

(4.6)

Donde: σ constante de Stefan – Boltzmann, ξ_1 Emisividad placa colectora (adimensional), ξ_2 Emisividad placa posterior (adimensional), T_1 Temperatura de la placa colectora ($^\circ C$), T_2 Temperatura de la placa posterior ($^\circ C$).

Las temperaturas son aproximadamente iguales y las distancias con las mismas en las dos placas del ducto, por lo que:

$$hr = \frac{4\sigma T_p^3}{\frac{2}{\varepsilon_p} - 1} \quad (4.7)$$

Donde: T_p Temperatura promedio de la placa ($^{\circ}k$); ε_p Emitancia de la placa colectora (adimensional); $h_1 = h_2$ Coeficiente de transferencia de calor para la convección natural en el interior del panel.

$$h_1 = \frac{Nu \cdot k_a}{D_h} \quad (4.8)$$

Donde: k_a Conductividad térmica del aire ($W / m^2 \text{ } ^{\circ}k$); Nu número de Nusselt (adimensional); D_h Diámetro hidráulico del conducto para el paso del aire (m).

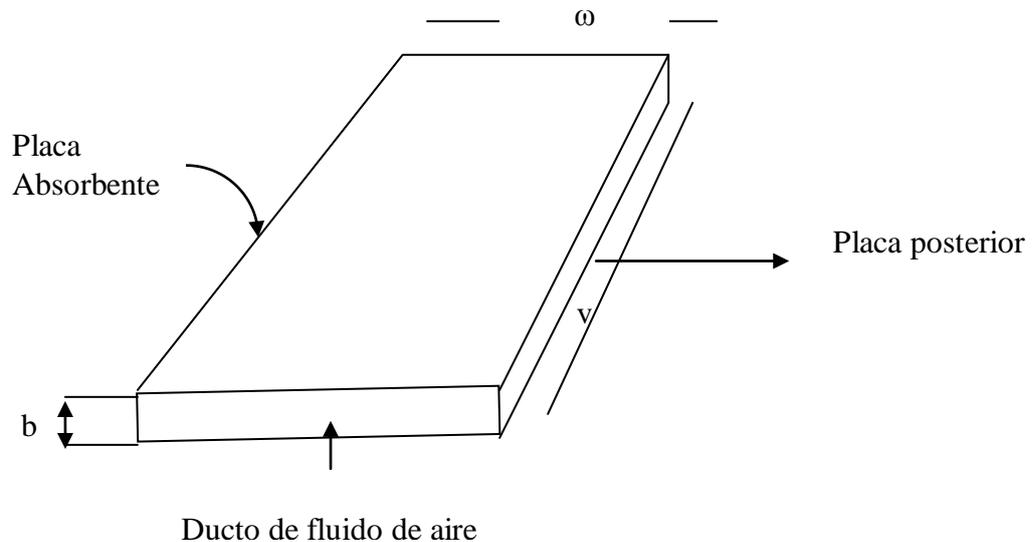


FIGURA 4.3 Relación del diámetro hidráulico con el espesor.

En ductos planos, la longitud característica o diámetro hidráulico viene dada por:

$$D_h = 2 \cdot b \quad (4.9)$$

Tomando en cuenta que el número de Nusselt (Nu) es la relación entre el gradiente de temperatura del fluido evaluado inmediatamente en contacto con la superficie del sólido y un gradiente de temperatura de referencia; así como también en el análisis de paneles solares, es importante poder evaluar el flujo de calor que se produce mediante convección natural entre dos placas, separadas por aire, y que se encuentran inclinadas un ángulo con respecto a la horizontal, por lo que se propone la siguiente ecuación para evaluar el número de Nusselt. ²⁵

$$Nu = \left(0,060 - 0,017 \cdot (\Theta / 90^\circ) \right) Gr^{1/3} \quad (4.10)$$

Donde: Θ Ángulo de inclinación con respecto a la horizontal, **Gr** Número de Grashof (adimensional).

$$Gr = \frac{9B\Delta T D h^3}{u^2} \quad (4.11)$$

Donde: **g** aceleración de la gravedad (m/s²), **B** Coeficiente de expansibilidad térmico del aire, en este caso:

$$B = \frac{1}{T} = \frac{1}{300^\circ k} \quad (4.12)$$

Donde: ΔT , Diferencia de temperatura (° k) ; **Dh**, Diámetro hidráulico (m); **u**, Viscosidad absoluta del aire (N.s / m²).

- CÁLCULO DE UL. COEFICIENTE DE PÉRDIDAS TOTALES (W/m² °k)

$$UL = Ut + Ub + Ue \left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K} \right] \quad (4.13)$$

Donde; **Ut** es la tasa de transferencia de calor perdida a través de la cubierta transparente, **Ub** es la tasa de transferencia de calor perdida a través

del fondo del colector, **Ue** es la tasa de transferencia de calor perdida a través de los lados del colector.²⁶

²⁶DUFFIE J, BECKMAN W, Solar Engineering Ofthermal Processes, Jhonn Wiley, Inc, 1980 pag. 164

²⁶PROYECTO UTA – INE Diseño y Construcción de un colector solar Plano para el secado de granos en silos estacionarios. 1990 pag. 18

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_p} \left[\frac{T_p - T_a}{N + f} \right]^e} + \frac{1}{hw} \right\}^{-1} + \frac{\sigma \cdot (T_p + T_a) \cdot (T_p^2 + T_a^2)}{[E_p + 0.00591 \cdot N \cdot hw]^{-1} + \frac{2 \cdot N + f - 1 + 0.133 \cdot E_p}{E_g} - N}$$

(4.14)

Donde: **N** es el número de cubiertas transparentes, **Ep** es la transmitancia de la placa colectora es adimensional, **hw** es el coeficiente de pérdidas debido al viento en (W/m²°K), así se tiene que:

$$hw = 5.7 + 3.8 \cdot V_v \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$$

(4.15)

Donde; **V_v** es la velocidad del viento en m/s **Eg** es la transmitancia de la cubierta transparente es adimensional, **Tp** es la temperatura media de la placa en °K, **Ta** es la temperatura media ambiente en °K, **C** se calcula de la siguiente forma: ²⁷

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

(4.16)

Para 0° ≤ β ≤ 70°, y para 70° ≤ β ≤ 90° usar β = 70° y e = 0.43 (1 - 100/Tp), **σ** es la constante de Stefan – Boltzmann, **β** es el ángulo de inclinación del colector con respecto a la horizontal en grados.

f es igual a:

$$f = (1 + 0.089 \cdot hw - 0.1166 \cdot hw \cdot Ep) \cdot (1 + 0.07866 \cdot N) \quad (4.17)$$

²⁷PROYECTO UTA – INE Diseño y Construcción de un colector solar Plano para el secado de granos en silos estacionarios. 1990 pag. 18

Para verificar el coeficiente de pérdida a través de la cubierta, se puede recurrir, al símil eléctrico.

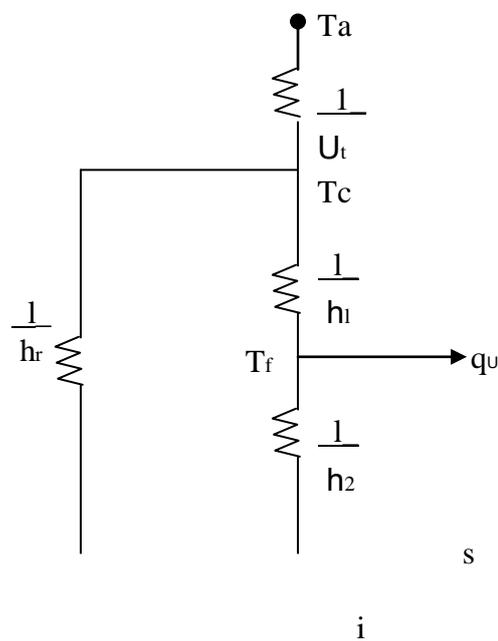
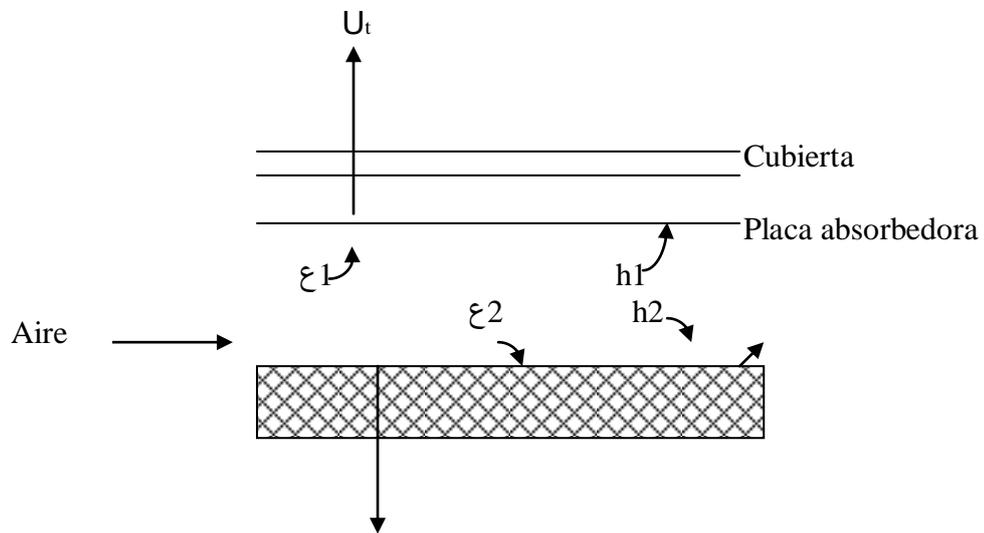




FIGURA 4.4 Símil eléctrico colector.

De acuerdo al símil eléctrico el cálculo de U_t queda de la siguiente manera, (Método de Holland).²⁸

²⁸GUASUMBA JOSÉ, Aplicaciones solares de media y alta temperatura, 2002 – 2006.

$$U_t = \left(\frac{1}{h_1 + h_r} + \frac{1}{h_w + h_{r2}} \right)^{-1} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right] \quad (4.18)$$

Donde; h_1 es el coeficiente de transferencia de calor entre la placa colectora y el aire circulante ($W/m^2 \cdot ^\circ k$), h_r es el coeficiente de radiación placa cubierta ($W/m^2 \cdot ^\circ k$), h_w es el coeficiente de pérdidas debido al viento ($W/m^2 \cdot ^\circ k$), h_{r2} es el coeficiente de radiación cubierta ambiente ($W/m^2 \cdot ^\circ k$).

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor entre la placa colectora y el aire circulante h_1 se tiene:²⁹

$$h_1 = \frac{Nu \cdot K_1}{d} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right] \quad (4.19)$$

Donde; K_1 es la conductividad térmica del aire (w/m^0k), d es la longitud entre cubierta transparente y placa absorbidora (m), Nu es el número de Nusselt (adimensional) y su cálculo se realiza con la siguiente expresión: ³⁰

$$Nu = 1 + 1.44 \cdot \left(1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right)^+ \cdot \left[1 - \frac{(\sin(1.8 \cdot \beta))^{1.6} \cdot 1708}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos(\beta)}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \quad (4.20)$$

Donde; β es el ángulo de inclinación del colector con respecto a la horizontal en grados, Ra es el número de Rayleigh (adimensional) y se determina con la siguiente ecuación:

$$Ra = \frac{g \cdot \frac{1}{(T_p + T_c)} \cdot (T_p - T_c) \cdot d^3 \cdot Pr}{\gamma^2} \quad (4.21)$$

²⁹ - ³⁰ GUASUMBA JOSÉ, Aplicaciones solares de media y alta temperatura, 2002 – 2006.

Donde; **g** es la gravedad (m/s²), **T_p** es la temperatura de la placa absorbidora (°K), **T_c** es la temperatura de la cubierta transparente (°k), **d** es la longitud entre la cubierta transparente y la placa absorbidora (m), **Pr** es el número de Prandtl (adimensional), **γ** es la viscosidad cinemática del aire (m²/s).

Para el cálculo del coeficiente de radiación placa cubierta se aplica la ecuación (4.6)

$$hr = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2) \cdot (T_p + T_c)}{\frac{1}{E_p} + \frac{1}{E_g} - 1} \quad \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (4.22)$$

Donde; **σ** es la constante de Stefan – Boltzmann, **T_p** es la temperatura de la placa absorbidora (°k), **T_c** es la temperatura de la cubierta transparente (°k), **E_p** es la emitancia de la placa colectora (adimensional), **E_g** es la emitancia de la cubierta transparente (adimensional).

Para determinar el coeficiente de radiación entre la cubierta y el ambiente se aplica:

$$hr2 = \sigma \cdot (T_c + T_s) \cdot (T_c^2 + T_s^2) \cdot E_g \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (4.23)$$

Donde; **σ** es la constante de Stefan – Boltzmann, **T_c** es la temperatura de la cubierta transparente (°k), **E_g** es la emitancia de la cubierta transparente (adimensional), **T_s** es la temperatura de cielo (°k) y se la calcula con la

siguiente ecuación (para la provincia de Pichincha se puede asumir que es de 16,2 °C):

$$T_s = 0.0522 \cdot T_a^{1.5} \quad (^\circ K) \quad (4.24)$$

Donde; T_a es la temperatura media ambiente ($^\circ k$).

Para la temperatura de la cubierta transparente se tiene la siguiente expresión:

$$T_c = T_p - \frac{U_t \cdot (T_p - T_a)}{h_1 + h_r} \quad (^\circ K) \quad (4.25)$$

Donde; T_p es la temperatura media la placa colectora ($^\circ k$), T_a es la temperatura media ambiente ($^\circ k$), h_1 es el coeficiente de transferencia de calor entre la placa colectora y el aire circulante ($W/m^2 \ ^\circ k$), h_r es el coeficiente de radiación placa cubierta ($W/m^2 \ ^\circ k$).

Los coeficientes de pérdidas a través del fondo del colector U_b y el coeficiente de pérdidas a través de los lados del colector U_e están dadas por³¹:

$$U_b = \frac{K}{L} \left[\frac{W}{m^2 \ ^\circ K} \right] \quad (4.26)$$

$$U_e = \frac{\frac{K}{L_1} \cdot A_1}{A_c} \left[\frac{W}{m^2 \ ^\circ K} \right] \quad (4.27)$$

Donde: K es la conductividad del aislamiento (adimensional), L es el espesor del aislamiento de la parte posterior (m), A_1 es el área lateral del colector (m^2), A_c es el área del colector (m^2), L_1 es el espesor del aislamiento lateral (m).

La temperatura de placa **T_p** al principio de los cálculos es supuesta, por lo que se la calcula con la siguiente expresión matemática, para validar este valor:

$$T_{p2} = T_{fi} + \frac{Q_u}{\left(\frac{A_c}{UL \cdot Fr}\right) \cdot (1 - Fr)} \text{ } ^\circ K \quad (4.28)$$

³¹PROYECTO UTA – INE Diseño y Construcción de un colector solar Plano para el secado de granos en silos estacionarios. 1990 pag. 18

Donde: T_p es la temperatura de la placa absorbidora ($^\circ K$), T_{p2} es la temperatura de placa resultante de los cálculos ($^\circ K$), T_{fi} es la temperatura de ingreso del aire ($^\circ K$), A_c es el área del colector (m^2), Fr es el factor de remoción de calor.

4.2. – DISEÑO DEL DUCTO DE ALIMENTACIÓN Y TRANSPORTE DEL AIRE POR CONVECCIÓN NATURAL.

- Se debe analizar las caídas o incrementos de presión en cada tramo o sección del secador, de tal forma que sus dimensiones permitan obtener el flujo de aire requerido. En la figura 4.5 se indican los puntos entre los cuales se aplicará la ecuación de Bernoulli, o ecuaciones que determinen la caída de presión en colectores solares, para determinar las variaciones de presión existentes.

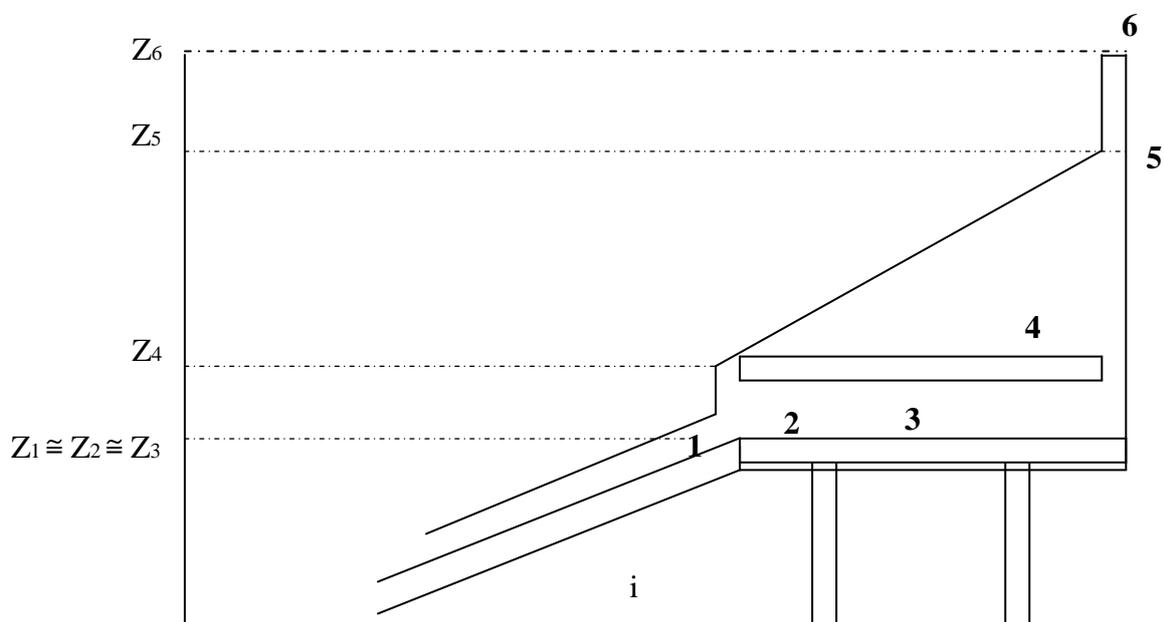




Figura 4.5 Puntos de caída de presión en el secador

TRAMO 0-1.

$$P_0 - P_1 = (Z_1 - Z_0) (\bar{\delta}_0 - \bar{\delta}_{01}) g + \frac{V_1^2 - V_0^2}{2} + H_p \quad (4.29)$$

Donde: **P** Presión, **Z** Altura, (m), **$\bar{\delta}$** Densidad, (Kg / m³), **g** Gravedad, (m / s²), **V** Velocidad del aire, (m / s), **H_p** Altura de pérdidas.

$$H_p = \frac{f \cdot L \bar{V}_{01}^2 \delta}{2Dh} \quad (4.30)$$

Donde: **f** Factor de fricción (adimensional), **L** Longitud del ducto (m), **Dh** Diámetro hidráulico (m), **\bar{V}_{01}** , Velocidad media del fluido (m/s).

$$\bar{V}_{01} = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (4.31)$$

Como V_0 es pequeño; $\bar{V}_{01} = \frac{V_1}{2}$ (4.32)

De la salida del aire del colector (punto 1), a la entrada del horno (punto 2) la variación de presión se debe únicamente a la fricción en un ducto de sección rectangular por lo que: ³²

$$P_1 - P_2 = - \frac{\bar{V}_{12}^2 \delta L f_r}{2Dh} \quad (4.33)$$

Donde: **\bar{V}_{12}** , Velocidad media del fluido (m/s). **$\bar{\delta}$** , Densidad media del fluido (Kg / m³). **f_r**, Factor de forma (adimensional). **L**, Longitud del ducto (m). **D**, Diámetro hidráulico (m).

Para el diseño del ducto de acople se debe tener en cuenta, que la caída de presión sea la mínima posible, así como la relación de forma, por esto se

escogió un ducto de sección transversal cuadrado, es decir de relación de forma 1:1

De la salida del ducto de acople a la parte inferior de las bandejas (2 - 3), la variación de presión se debe únicamente a la expansión existente, por lo que la ecuación de Bernoulli queda reducida a:

$$P_2 - P_3 = \frac{V_3^2 - V_2^2}{2} \delta_{12}$$

(4.34)

³² KURT GIECK Manual de Formulas Técnicas 18 edición, Pag. 6

Puesto que el área del lecho del producto será mucho mayor que la sección transversal del ducto de acople, la velocidad 3 será despreciable con respecto a la velocidad 2 por lo que:

$$P_2 - P_3 = -2 \frac{V_2^2}{2} \delta_{1-2}$$

$$V_2 = V_1$$

(4.35)

$$P_2 - P_3 = -2 V_{01}^2 \delta_{23}$$

La caída de presión a través de la cámara de secado (3-4-5-6), para un proceso de convección natural por efecto de la chimenea se lo puede calcular aplicando la ecuación siguiente:³³

$$\Delta P = (H_1 + H_2) (\delta - \delta^1)g$$

(4.36)

Donde; **H₁** Altura desde la entrada de aire al fondo de la cama de secado, **H₂** Altura desde la superficie de la cama de secado al fin de la chimenea, **δ** Densidad del aire ambiental, **δ¹** Densidad del aire dentro del secador, **ΔP** Diferencia de presión, **g** Gravedad.

Para calcular
$$\delta_1 = \delta_0 + \frac{1}{1 + \frac{T}{273}}(1 + NA)$$

(4.37)

Donde; $\delta_0 = 1,29 \text{ Kg / m}^3$, **T** Temperatura °c, **HA** Humedad absoluta en Kg agua / Kg aire seco.

De esta forma, si conocemos la caída de presión en la cama de secado, debido a las pérdidas por el flujo a través del producto, se puede dimensionar la altura de la chimenea que tendrá el secador.

³³INE Secado Solar 1995 Documento N. – 20 pag. 17

4.3. – DISEÑO DE LA CÁMARA DE SECADO Y BANDEJAS.

4.3.1. – CÁMARA DE SECADO.

Para determinar el volumen de la cámara de secado (Horno tipo invernadero), se debe determinar el volumen del producto a ser secado.

La densidad promedio de los productos a secarse es de 200 Kg/m^3 , se tiene una masa de producto de 5 kg; por lo que $V \text{ producto} = 5 / 200 = 0,025 \text{ m}^3$.

El volumen de la cámara de secado debe ser 4 veces el volumen³⁴ del producto, lo que implica que volumen de esta (Vcs), debe tener un valor próximo a $0,10 \text{ m}^3$.

Como se mencionó anteriormente, uno de los aspectos primordiales en el secado, es evitar en lo posible alterar la calidad de las hierbas aromáticas, obteniendo un secado adecuado, como se va a secar hojas con una pequeña porción de tallo, estas tienen que colocarse en bandejas, y el aire debe fluir a través y entorno a dichas bandejas; a fin de lograr una mayor superficie de

contacto; por lo que el secado será por lotes (discontinuo), y secado directo; esto es tomando en cuenta el volumen de producto y la fragilidad del mismo.

La cámara de secado es un horno invernadero, ya que permite el paso de la radiación solar, la cual incide sobre las hojas, ayudando a que mantengan sus aceites esenciales, y además proporcionando un calor adicional.

La circulación del aire calentado previamente en el colector, a través de la cámara de secado, se logra por diferencia de densidades, por lo que el aire más caliente tiende a subir hacia los estratos superiores, razón por la cual el horno – invernadero tiene una cúpula o chimenea, lo que permite que se tenga una circulación natural del aire.

³⁴INCOMAQ, Italia, 1990

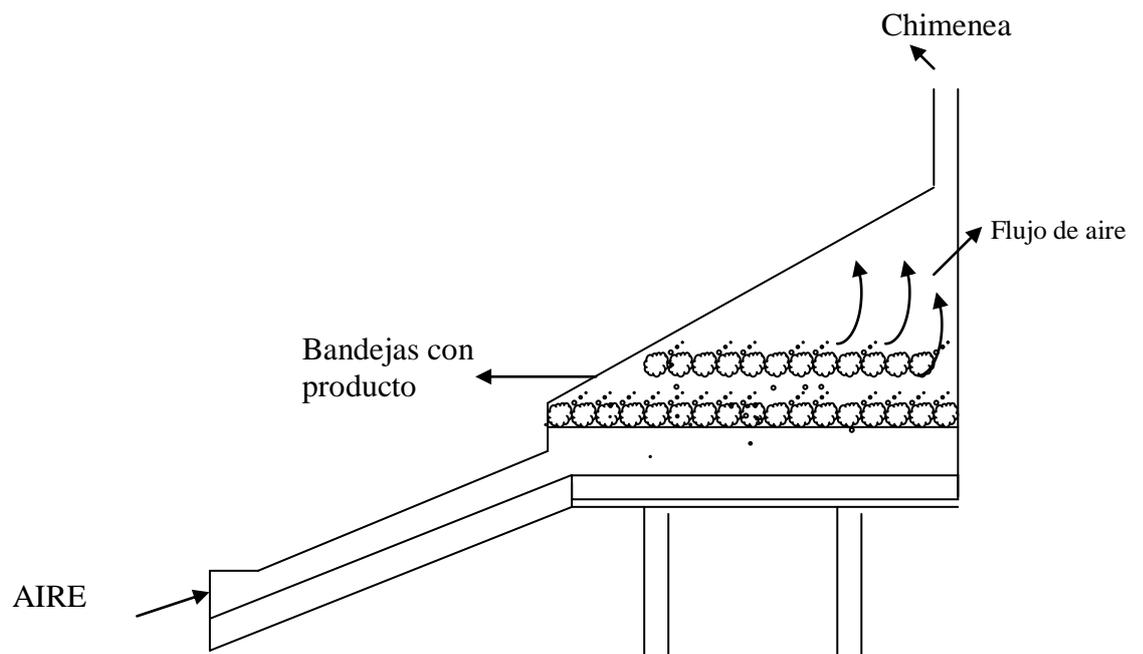


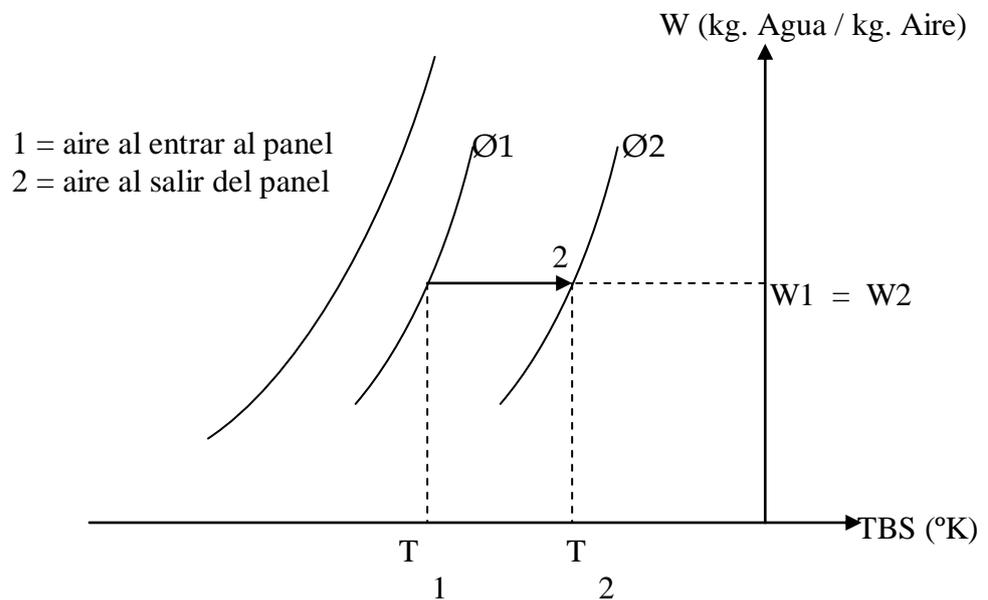
Figura 4.6 Flujo de aire en el prototipo.

El aire ambiental al calentarse en el colector disminuye su humedad relativa, por lo que aumenta su capacidad de absorber humedad, este aire

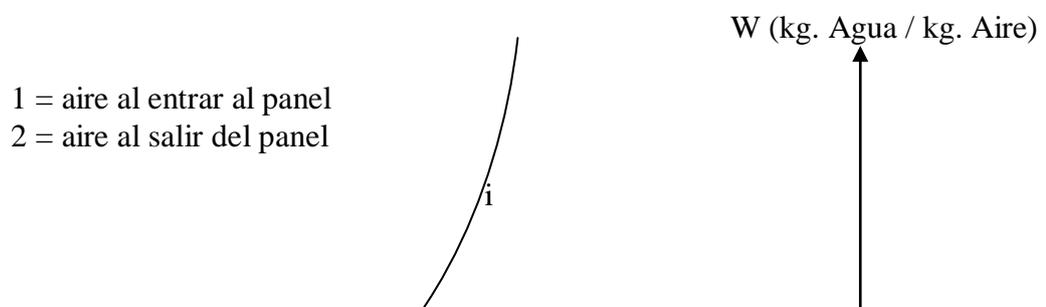
calentado en el colector entra a la cámara de deshidratación y al atravesar la cama de producto, absorbe humedad de este.

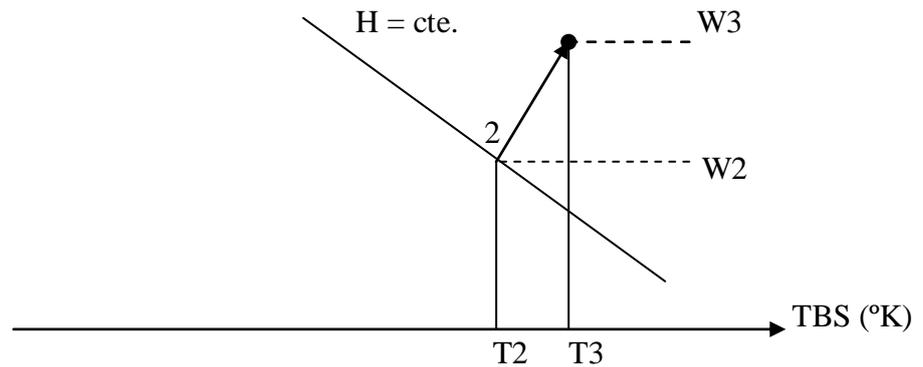
La radiación solar que incide en el producto hace que se incrementé su temperatura y en consecuencia la del interior del secador, proporcionando calor adicional en el proceso de secado, con lo que se mejora el flujo de humedad desde el interior de las hojas hacia el exterior. En la figura 4.3.2 se indican estos procesos, en función de la carta psicométrica.³⁵

³⁵MARQUES JOSÉ / MARCIAL DANIEL, Principios de secado de Granos Psicometría Higroscopia F.U.O. 1991 pag. 14-15



a) Proceso de calentamiento del aire en el colector





b) Proceso de calentamiento del aire en la cámara de deshidratación.

Figura 4.7 Proceso calentamiento aire (colector – secador)

El agua evaporada por el flujo del aire caliente se determina por la diferencia de las humedades absolutas de este a la entrada (W_2) y salida del invernadero (w_3); cuan mayor sea esta diferencia más rápido se realizará el proceso de secado.

La forma de la cámara de secado (figura 4.6), tiene un dimensionamiento básico interior de: 365 mm. de ancho; 560 mm. de profundidad y una altura promedio de 625 mm.

La cámara de secado será hecha en lámina metálica y aislada térmicamente con lana de vidrio (50mm de espesor), los detalles de esto se encuentran en los planos colocados en el anexo D.

4.3.2. – BANDEJAS PARA PRODUCTO.

Para la determinación del tamaño de las bandejas se ha recorrido a la Norma Española FDA. GMP, (la separación entre bandejas debe ser aproximada a 2"; recomendable 4 cm. de alto).

Densidad del producto $200 \text{ (Kg / m}^3\text{)}$; con una masa de producto húmedo de 5 kg , se tiene un volumen de $0,025 \text{ m}^3$.

Si el ancho interno de la cámara de secado es 360 mm . y la profundidad de 500 mm ., se tiene una bandeja con unas medidas iniciales de: 310 mm . ancho; 410 mm . de profundidad, y 40 mm . alto.

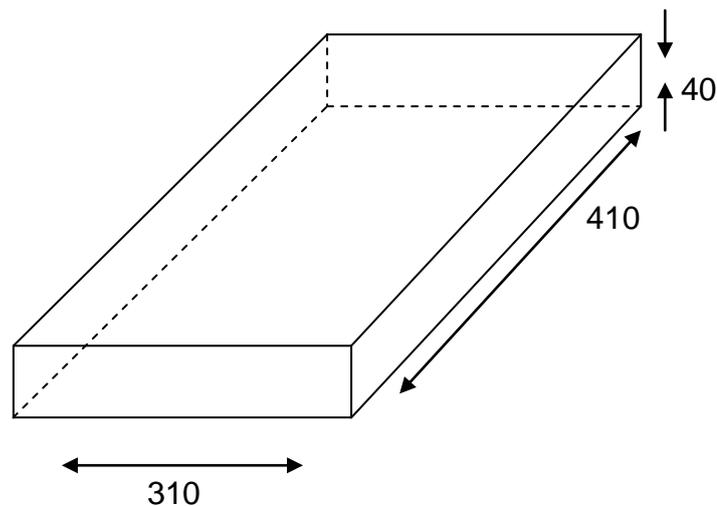


FIGURA 4.8 Esquema bandeja

Las medidas anteriores nos dan un volumen de bandeja (V_b) igual a $0,0050 \text{ m}^3$. Si el volumen del producto es de $0,025 \text{ m}^3$, esto implica que se necesita 5 bandejas.

Este tamaño de bandeja nos facilita la operación de carga y descarga del secador, las bandejas serán hechas con un marco de acero inoxidable y el

fondo será de malla de acero galvanizado; cada bandeja se hallará separada la una de la otra a una altura de 80 a 100 mm.

4.4. – SELECCIÓN DE MATERIALES.

TABLA 4.4.1. Materiales de construcción colector

ORDEN	PARTE	MATERIAL	JUSTIFICACIÓN
1	Base colector	Acero ASTM A - 36	Soportar corrosión.
2	Laterales y refuerzos	Acero ASTM A - 36	Soportar corrosión
3	Aislamiento térmico	Lana de vidrio espesor 2".(Kapok)	Reducir pérdidas térmicas
4	Placa absorbedora	Aluminio con pintura color negro mate	Buena conductividad térmica
5	Placa inferior	Tol espesor 1/32 "	Soportar corrosión
6	Cubierta transparente	Vidrio templado de e= 5 mm.	Actuar como barrera, provocar efecto invernadero. Protección de elementos inferiores
7	Ductos	Tol espesor 1/32 "	Bajo peso y facilidad manipulación
8	Soporte	Acero estructural A 36	- Resistencia a esfuerzos mecánicos

TABLA 4.4.2. Materiales de construcción secadora

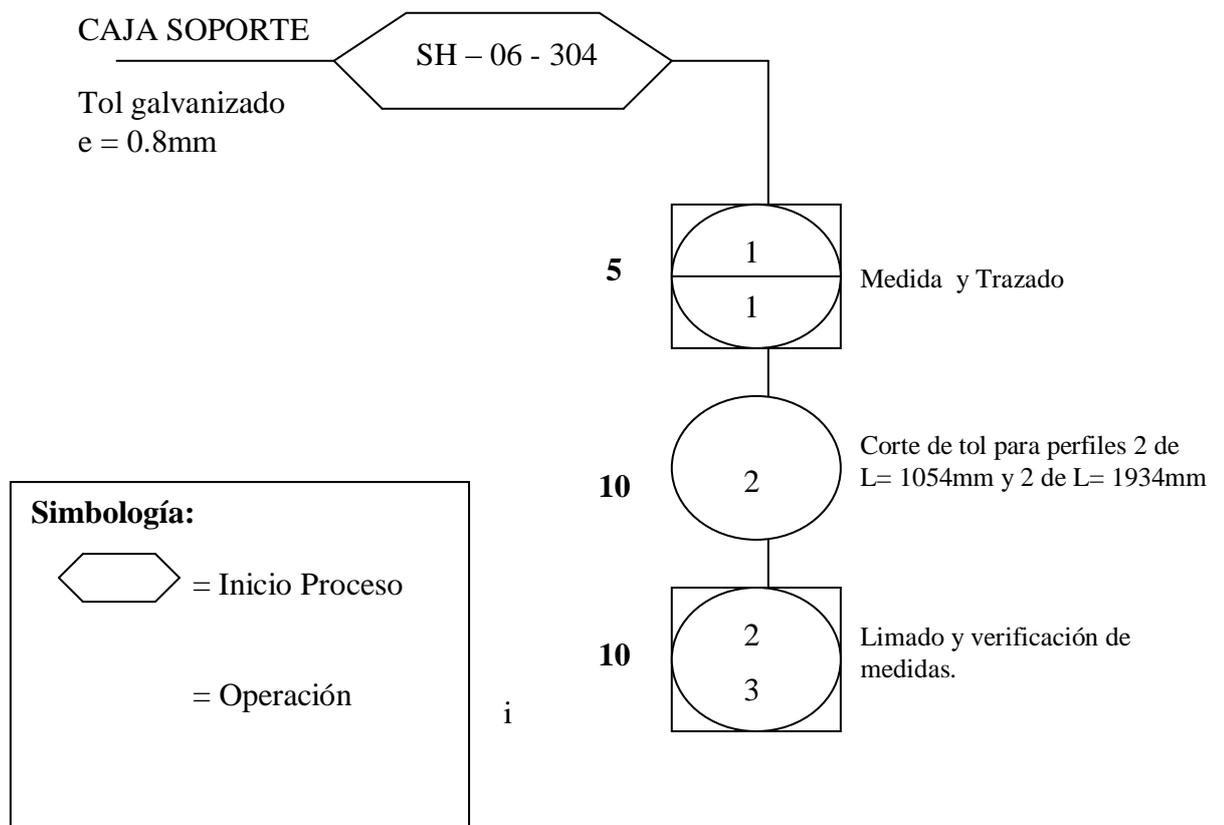
ORDEN	PARTE	MATERIAL	JUSTIFICACIÓN
1	Paredes laterales y base inferior (Termolábil)	Acero INOX 306	Conservar la calidad del producto.

2	Aislamiento térmico	Lana de vidrio 2"	Reducir pérdidas térmicas
3	Cubierta exterior	Aluminio e = 1/32 "	Bajo peso estética
4	Ducto salida del aire	Aluminio e = 1/32 "	Bajo peso; evitar la corrosión
5	Cubierta superior	Vidrio templado de e = 5 mm	Provocar efecto invernadero

TABLA 4.4.3. Materiales de construcción bandejas.

ORDEN	PARTE	MATERIAL	OBSERVACIONES
1	Pared lateral	Acero INOX 306	Conservar la calidad del producto. Bajo peso
2	Base	Malla de acero galvanizado	Facilitar transferencia de calor, Conservar producto.

FIG. 5.1 Diagrama de proceso del colector solar.(1/5)



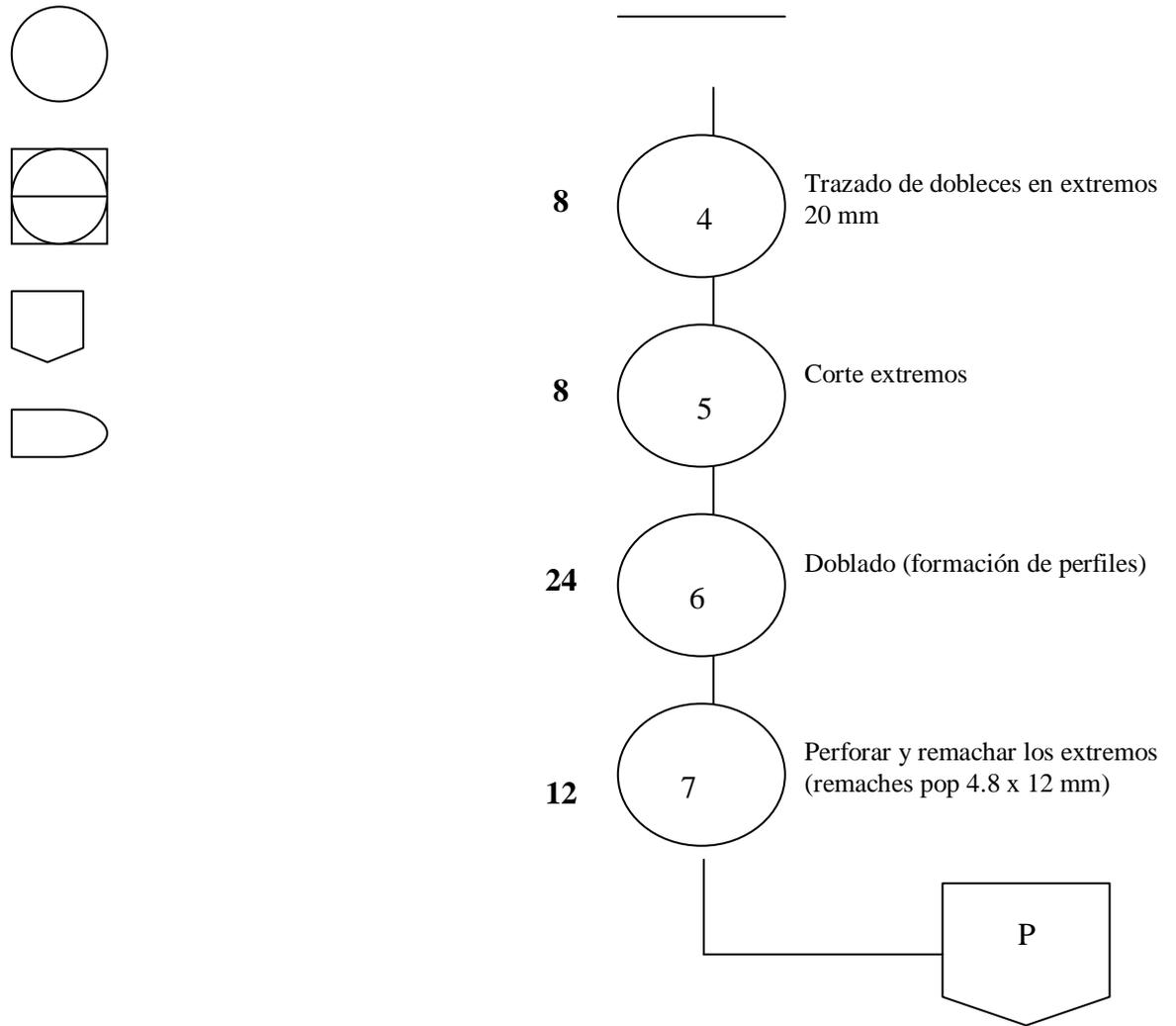
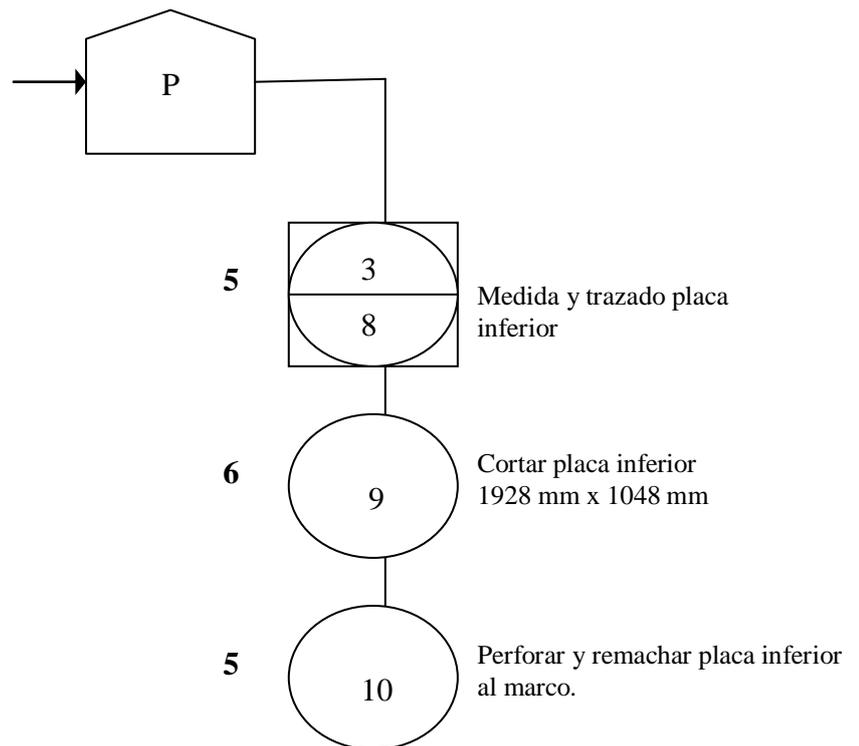


FIG. 5.1 Diagrama de proceso del colector solar.(2/5)



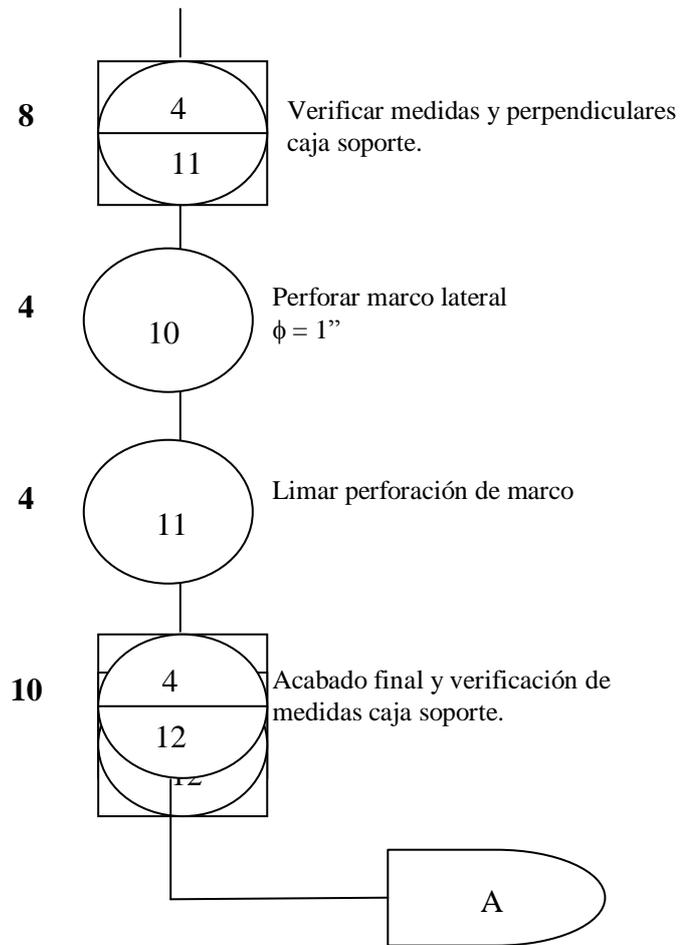
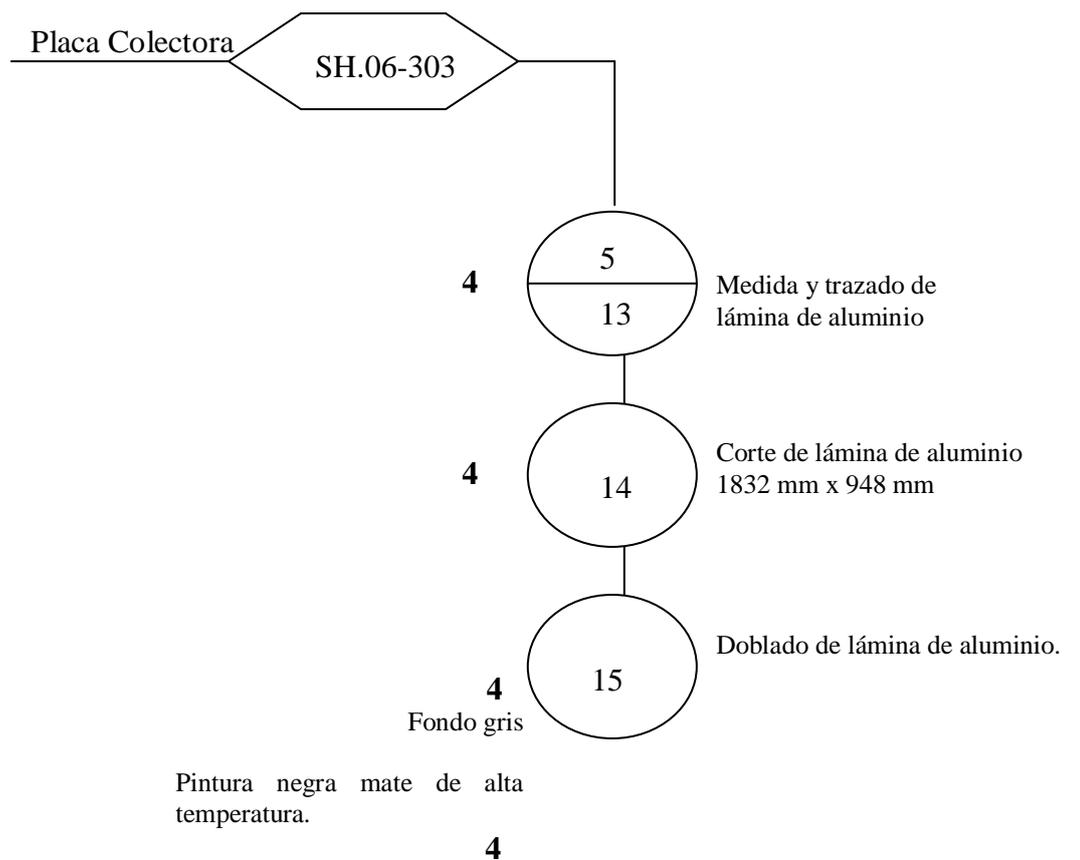


FIG. 5.1 Diagrama de proceso del colector solar.(3/5)



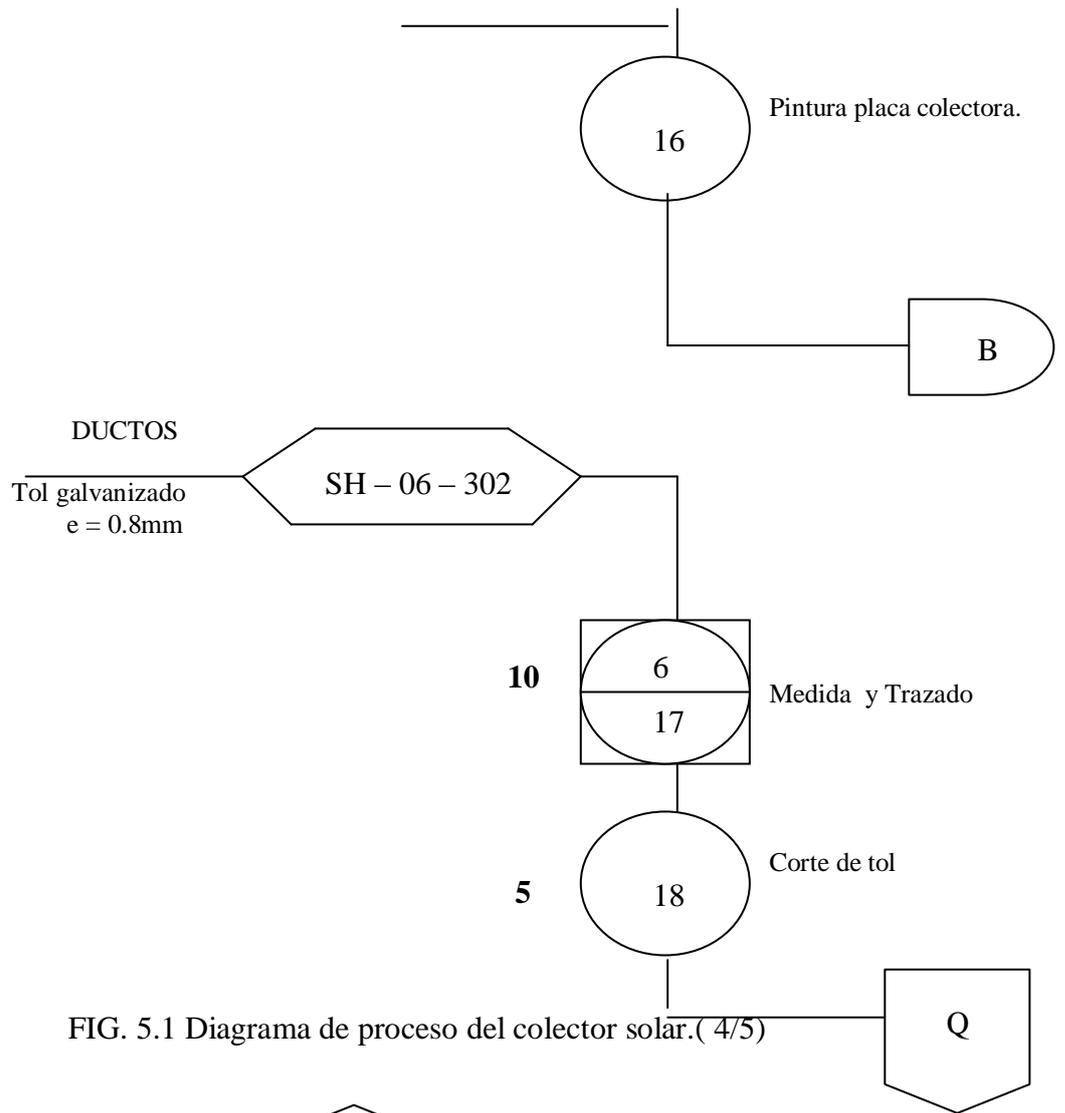
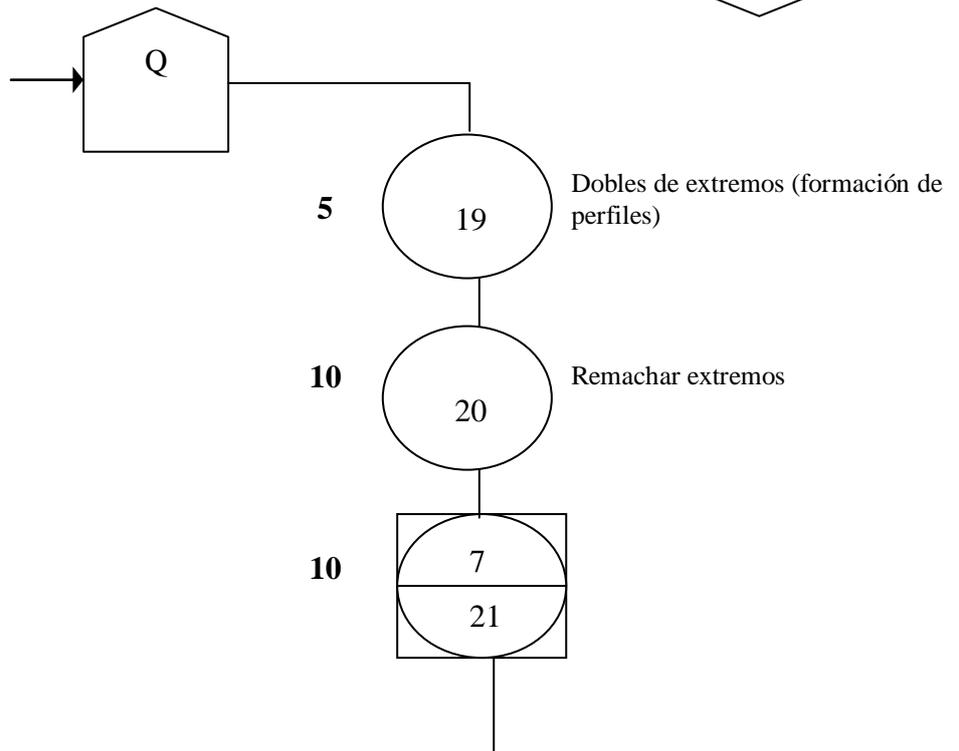


FIG. 5.1 Diagrama de proceso del colector solar.(4/5)



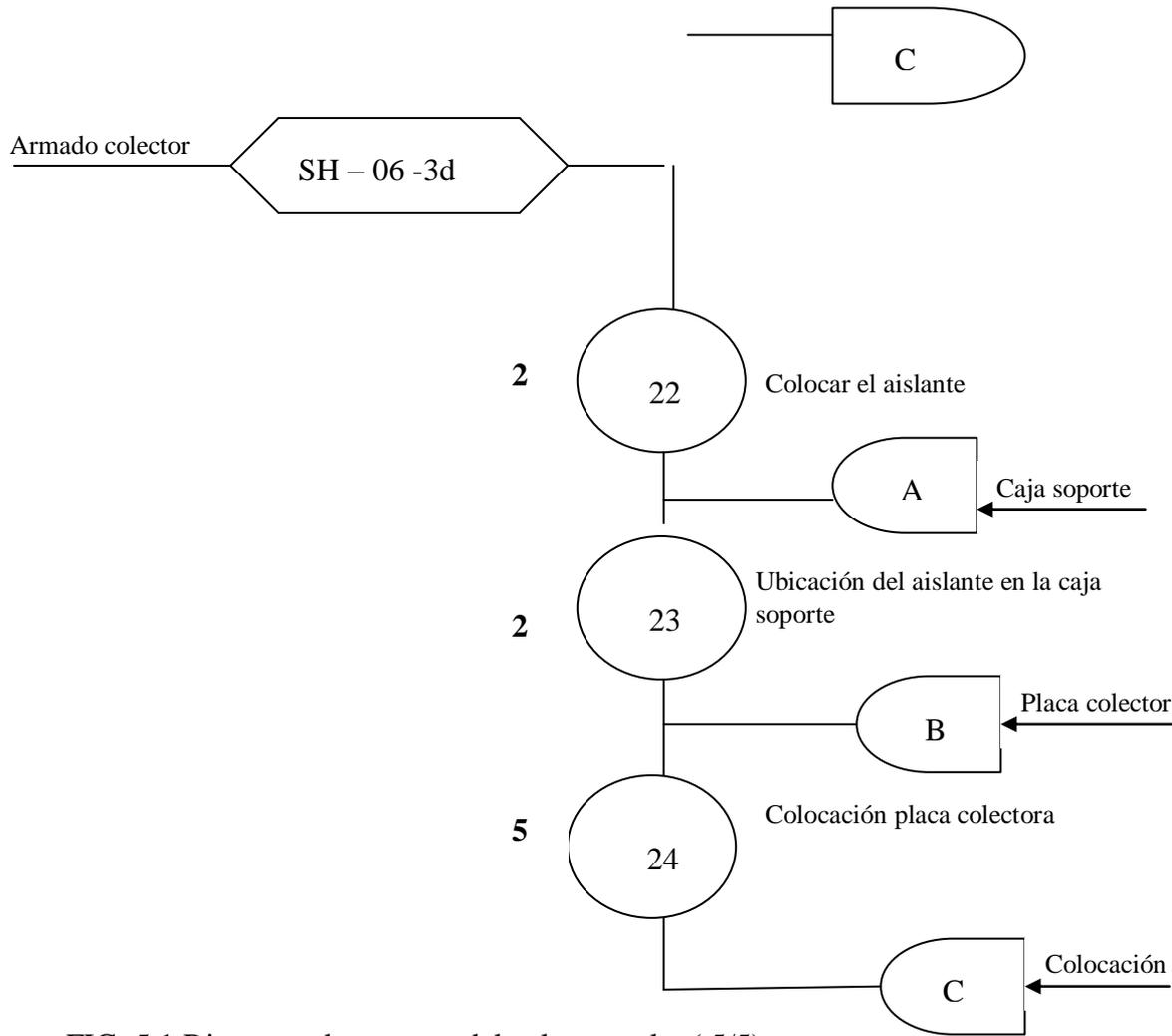
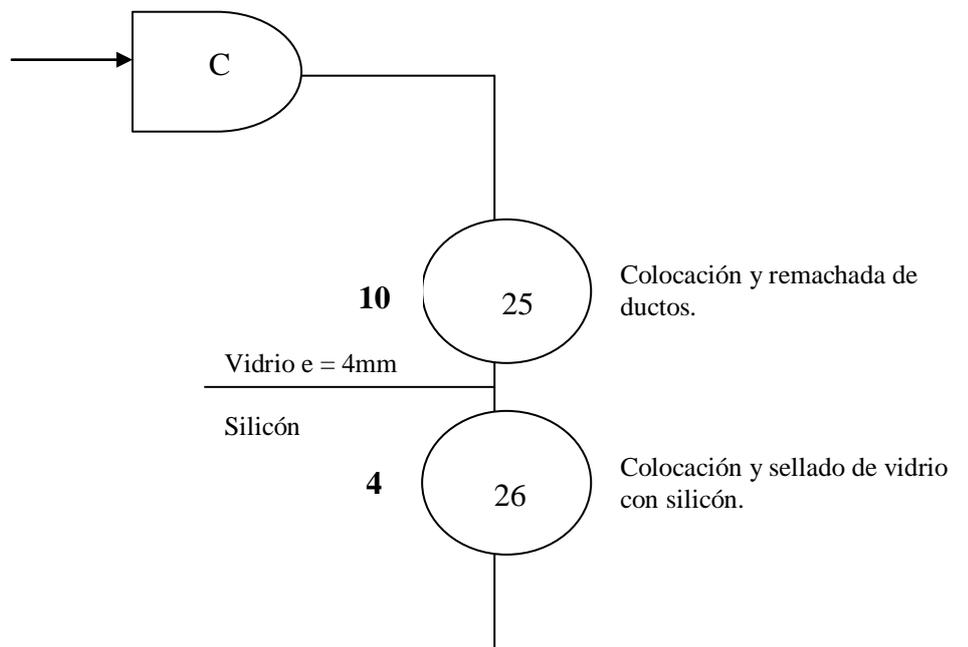


FIG. 5.1 Diagrama de proceso del colector solar.(5/5)



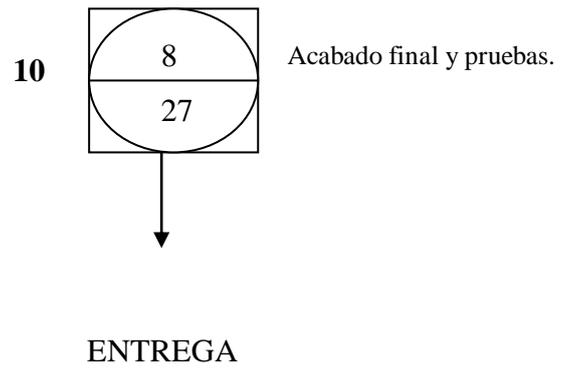
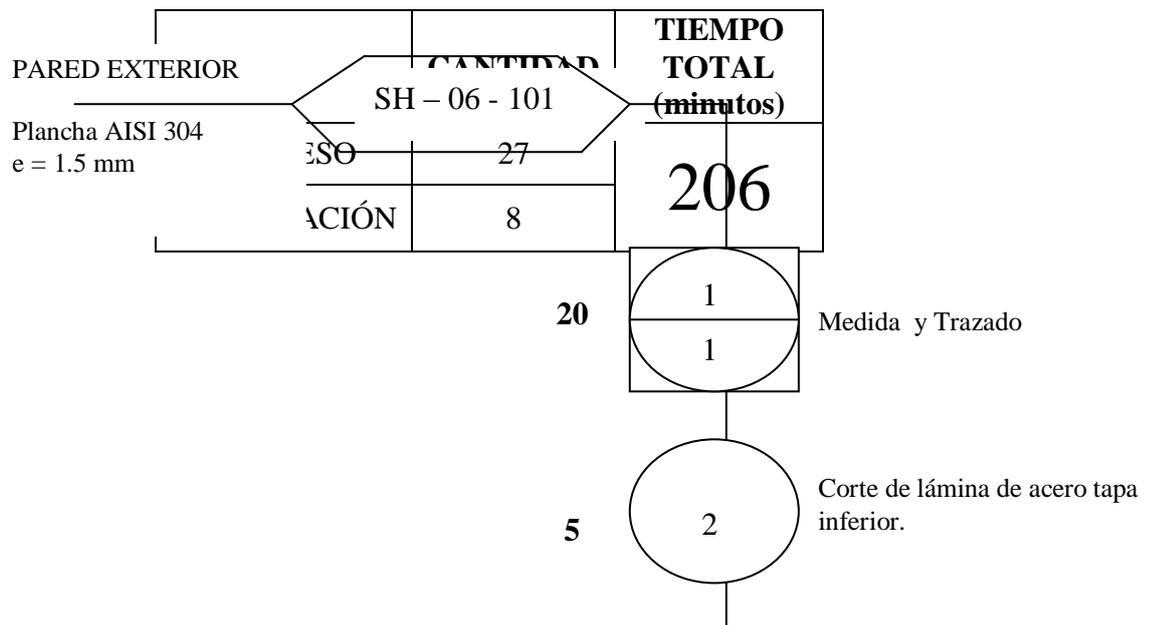


FIG. 5.2 Diagrama de proceso del horno.(1/8)



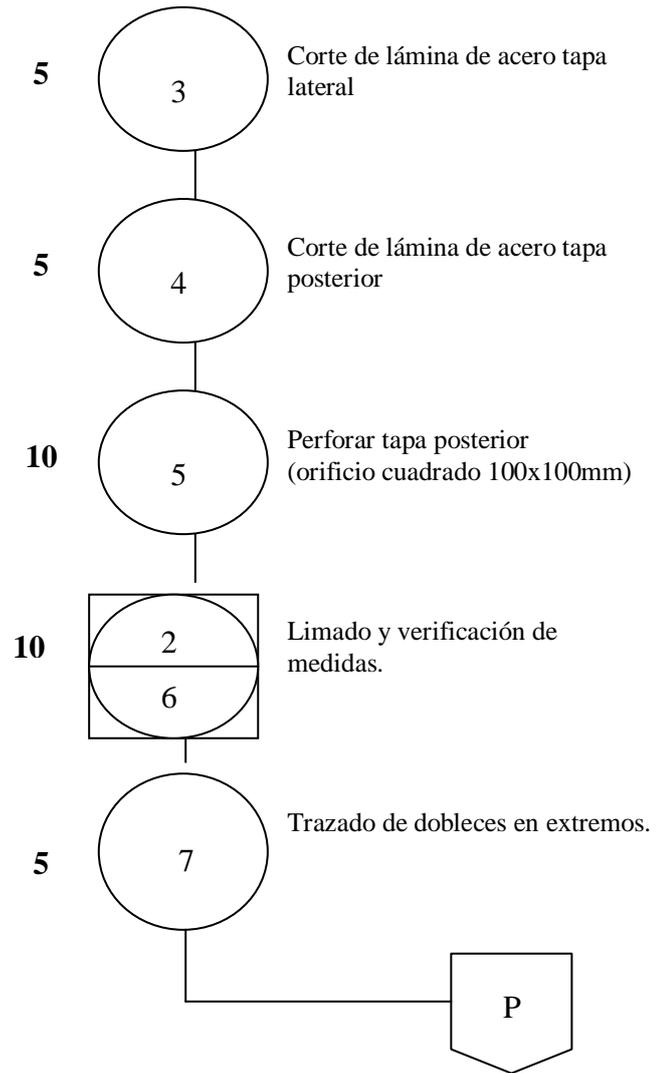
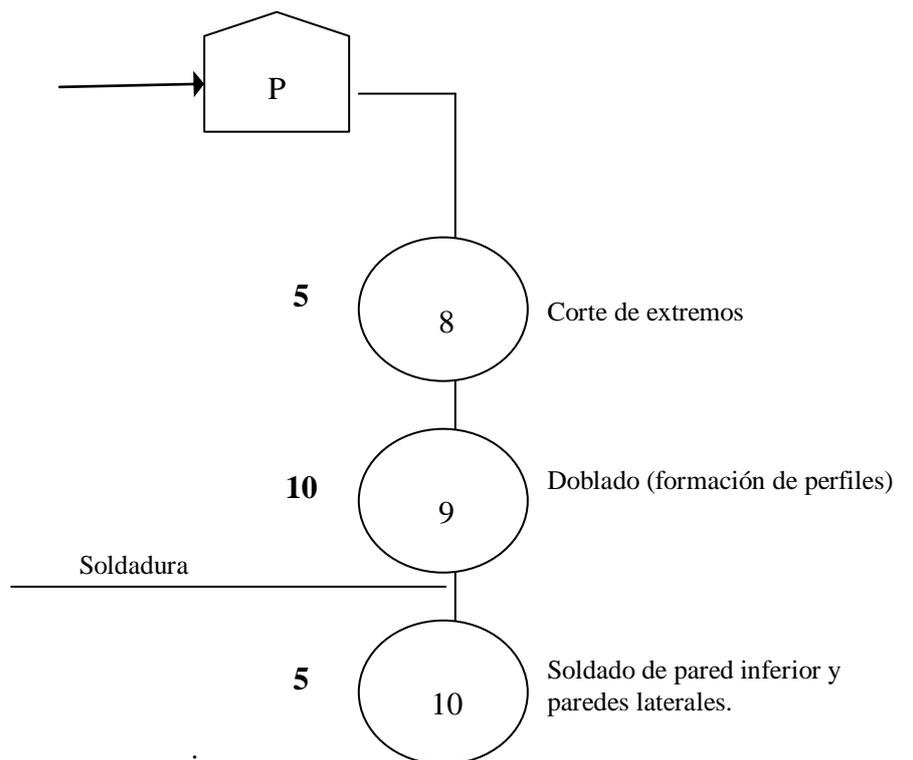


FIG. 5.2 Diagrama de proceso del horno (2/8)



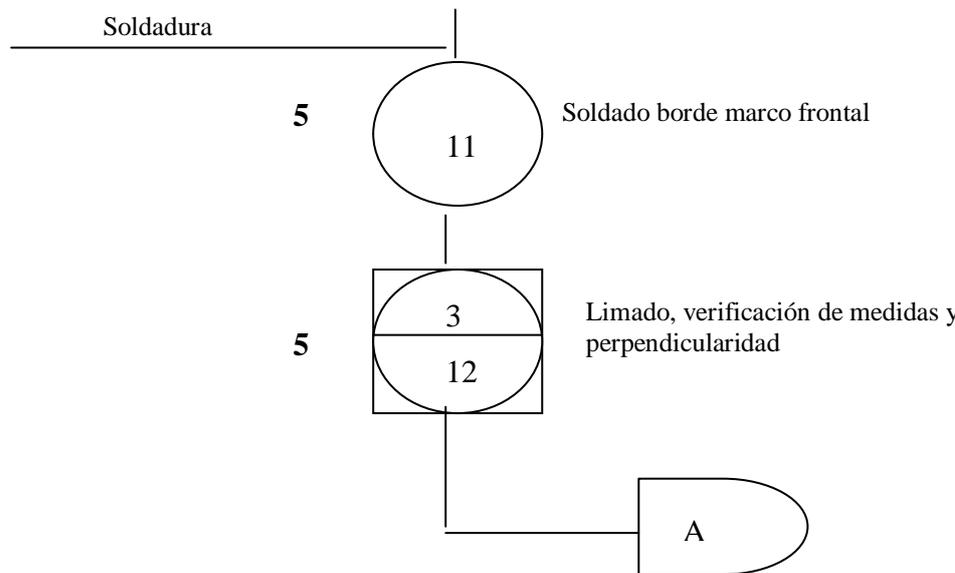
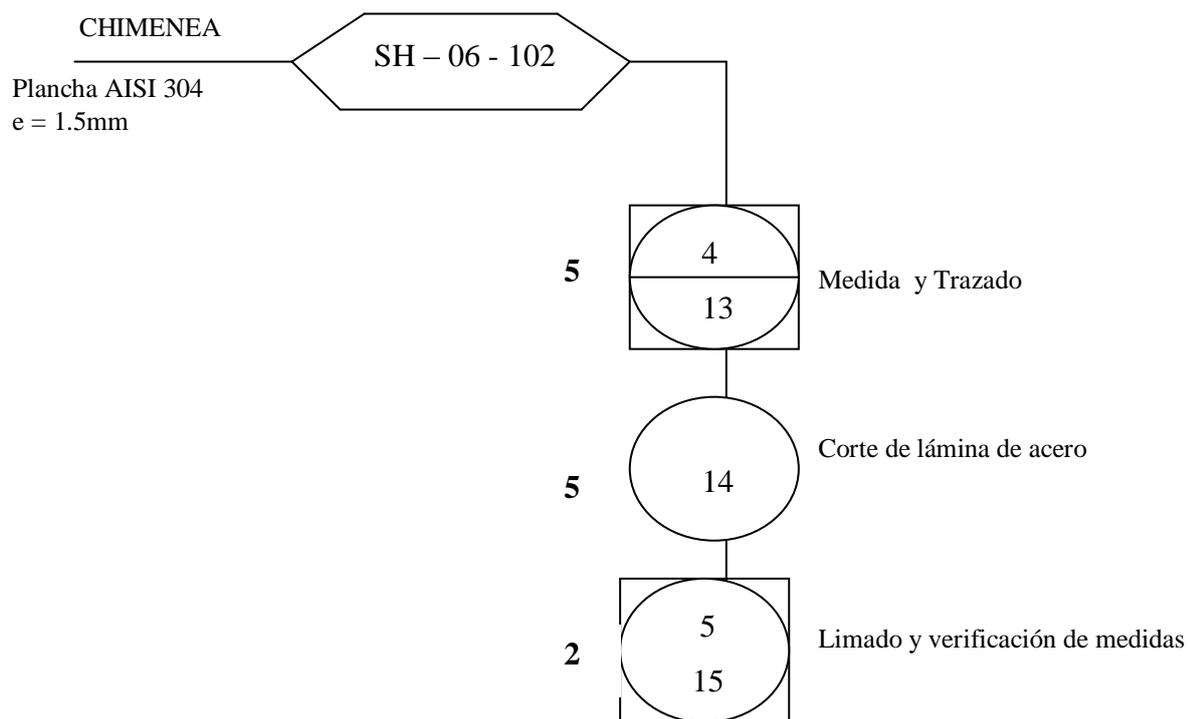


FIG. 5.2 Diagrama de proceso del horno.(3/8)



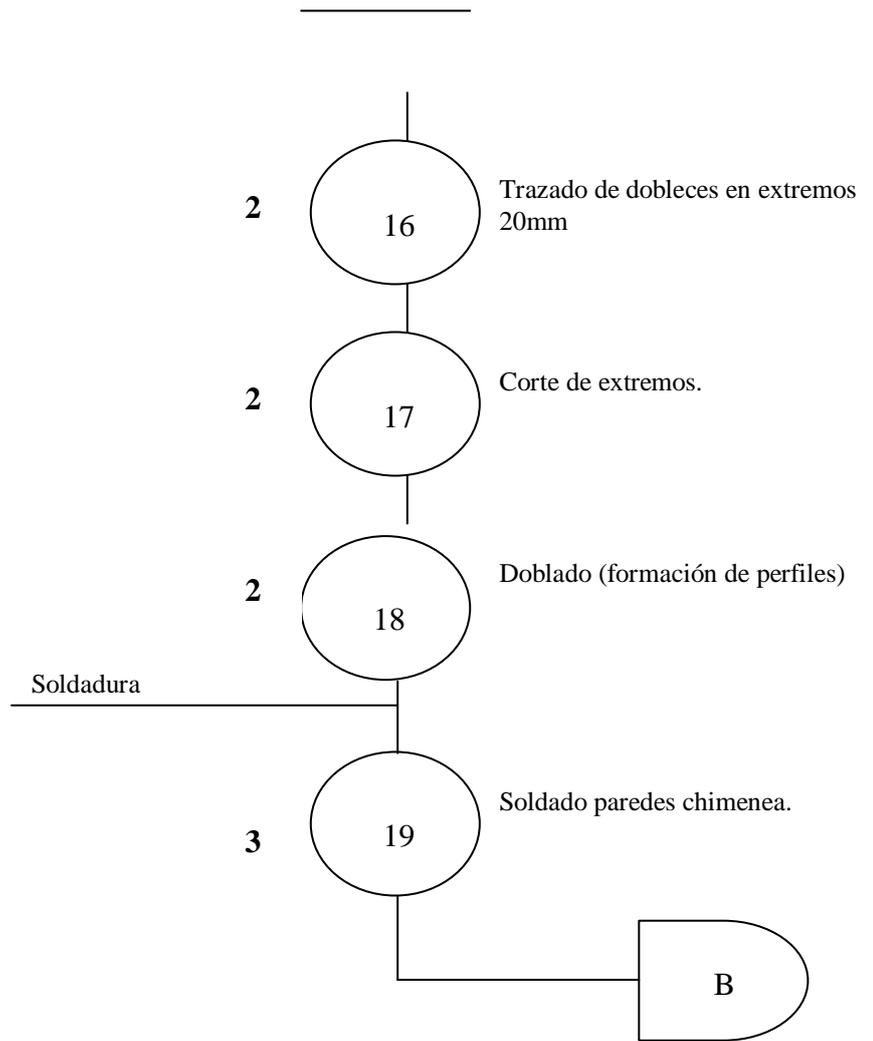
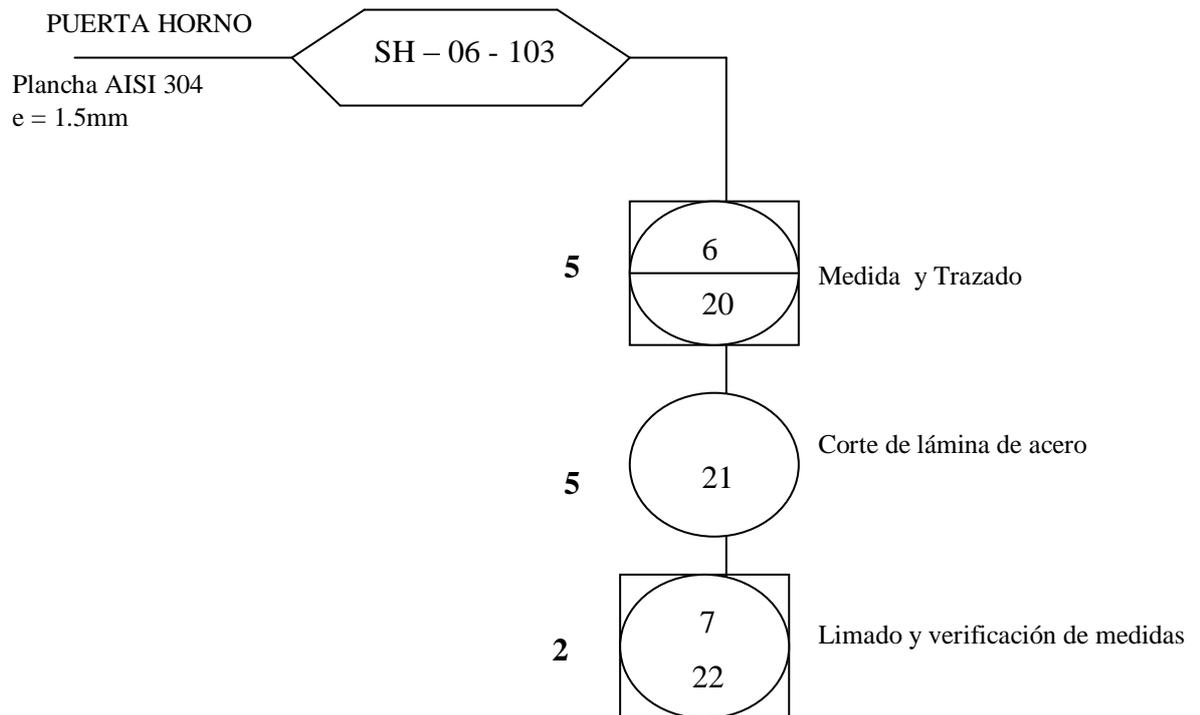


FIG. 5.2 Diagrama de proceso del horno.(4/8)



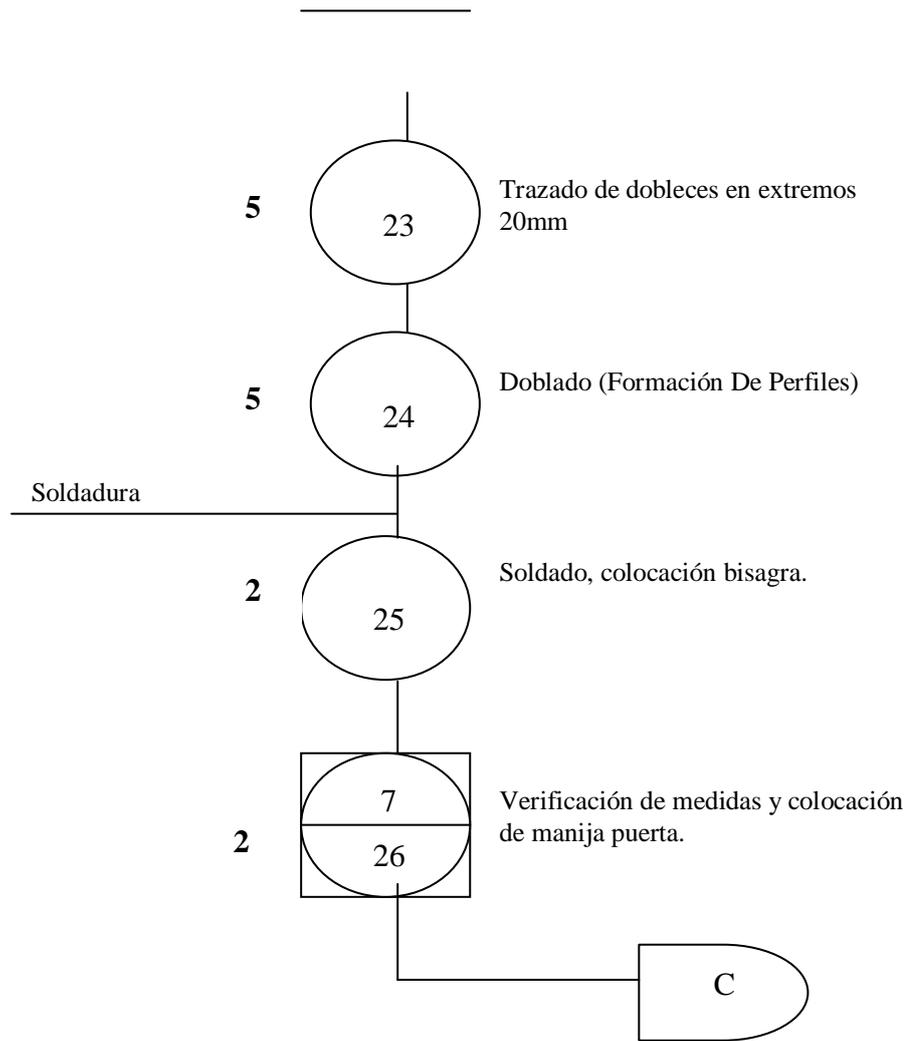
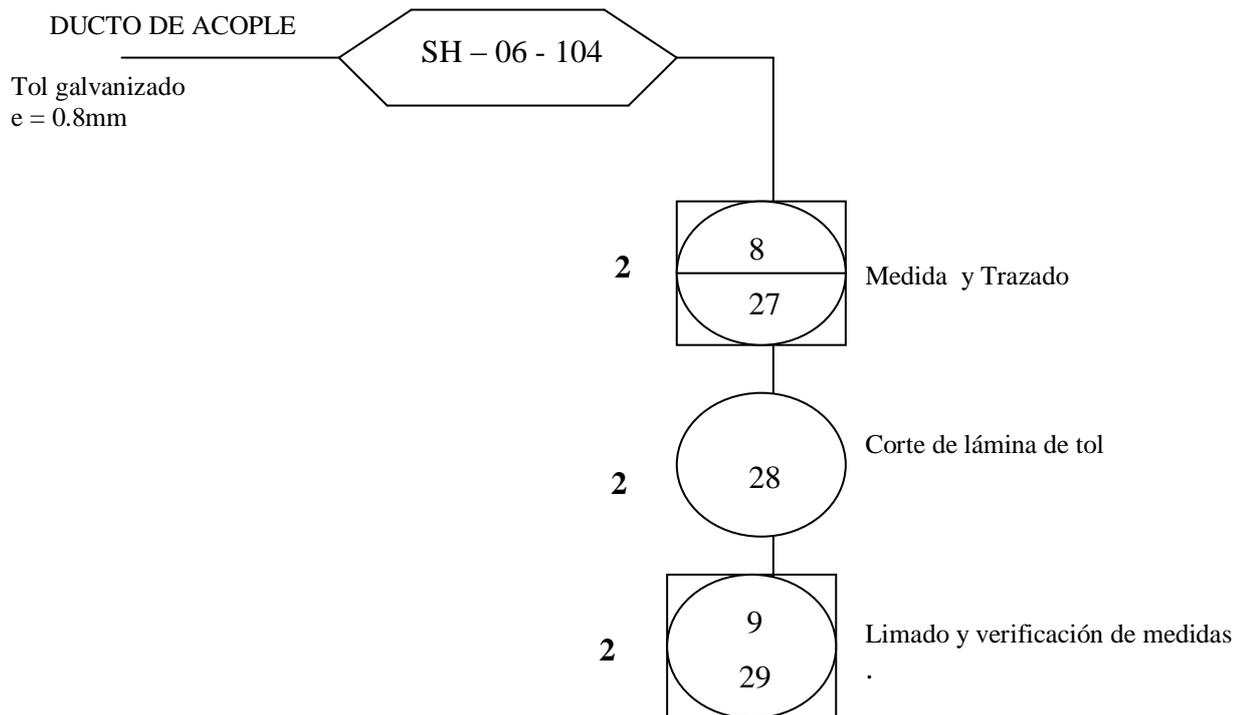


FIG. 5.2 Diagrama de proceso del horno.(5/8)



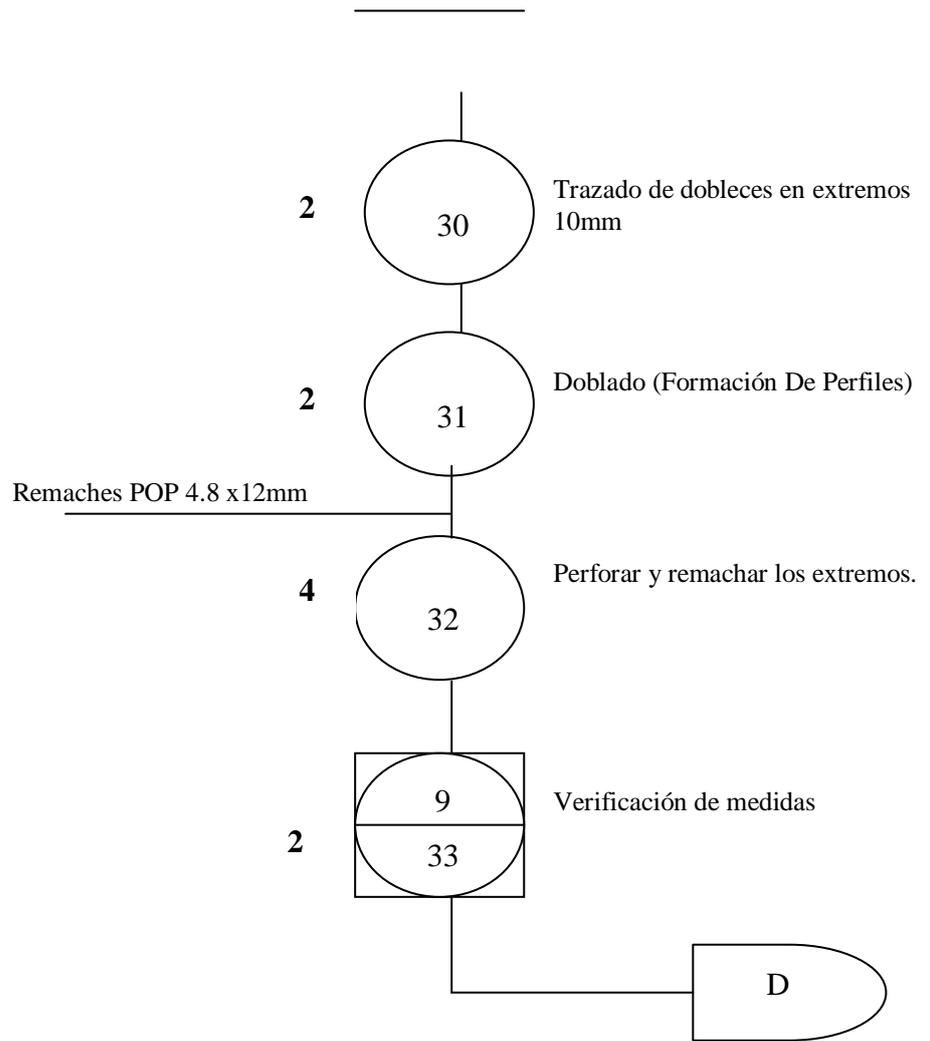
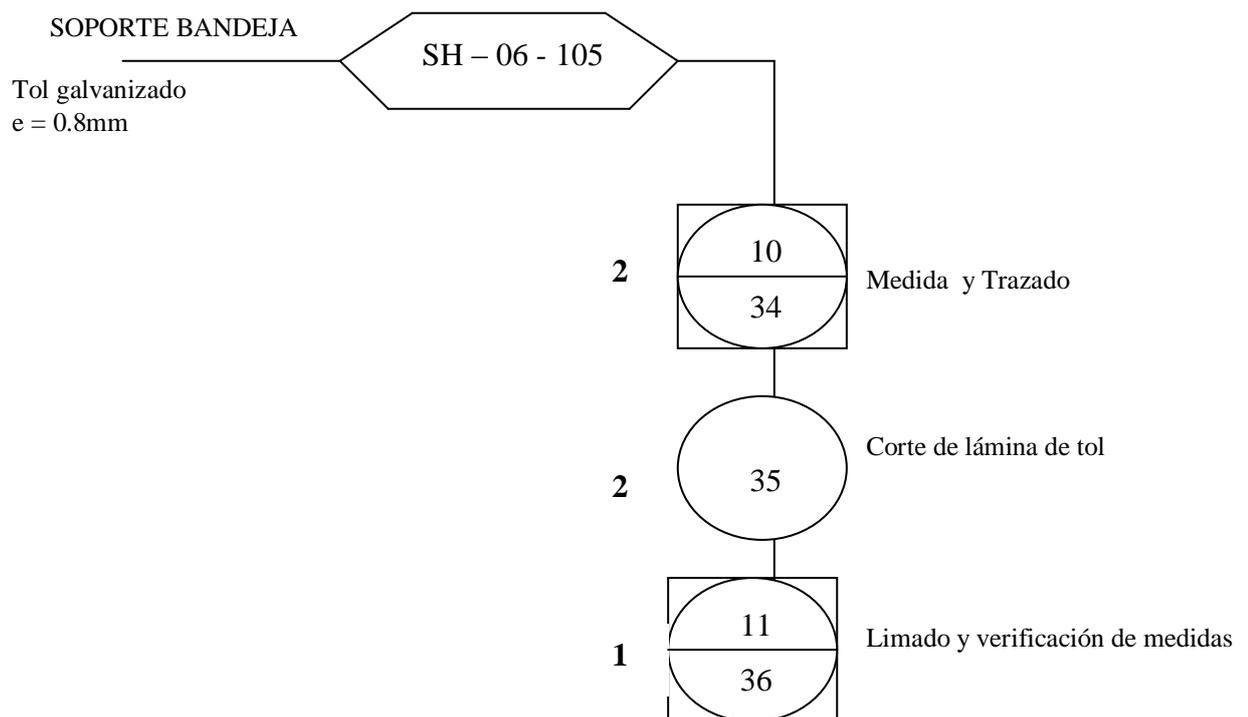
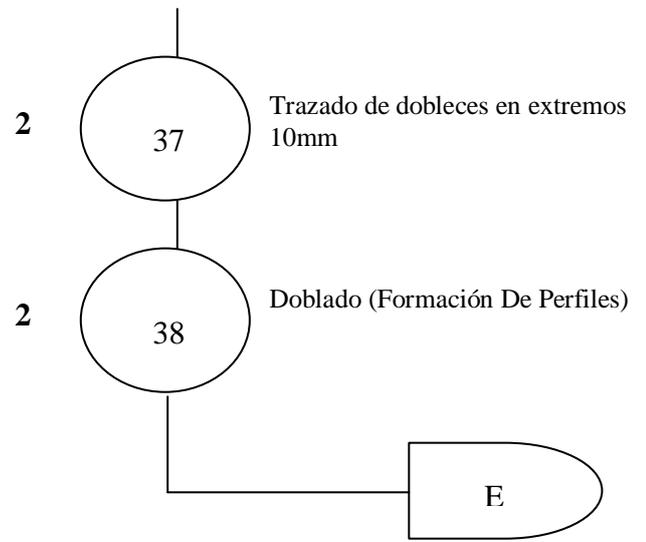


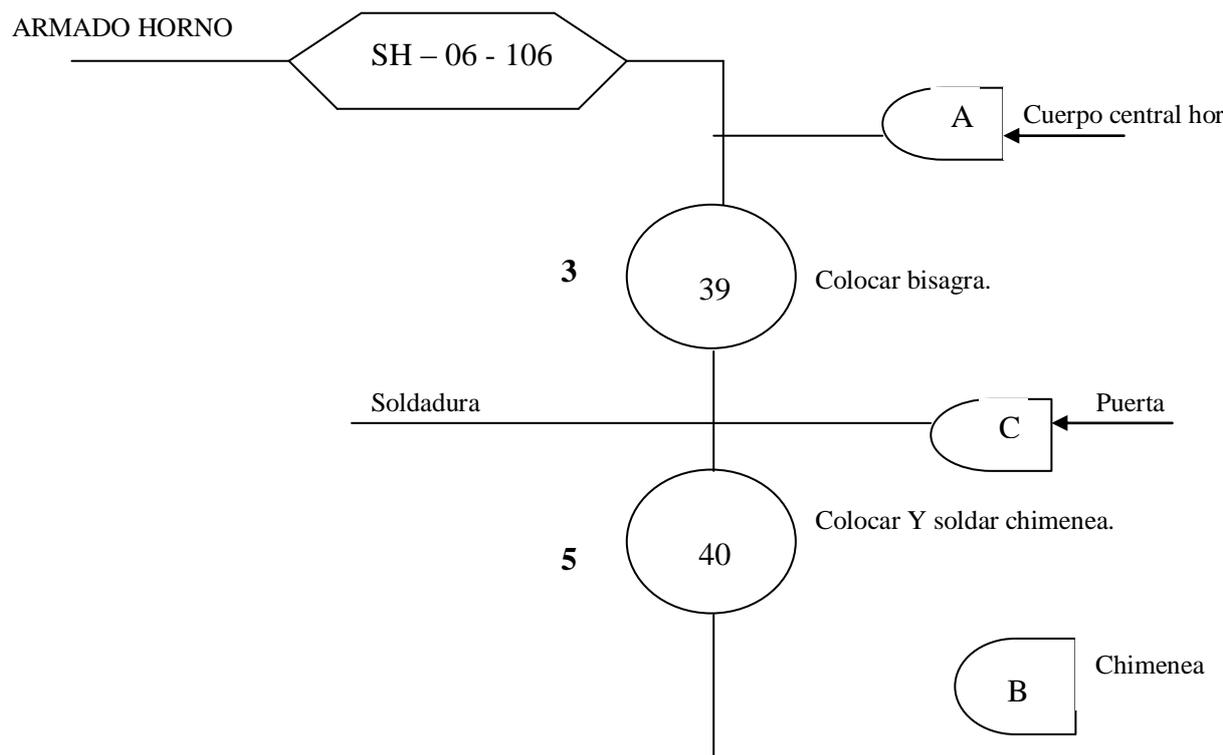
FIG. 5.2 Diagrama de proceso del horno.(6/8)

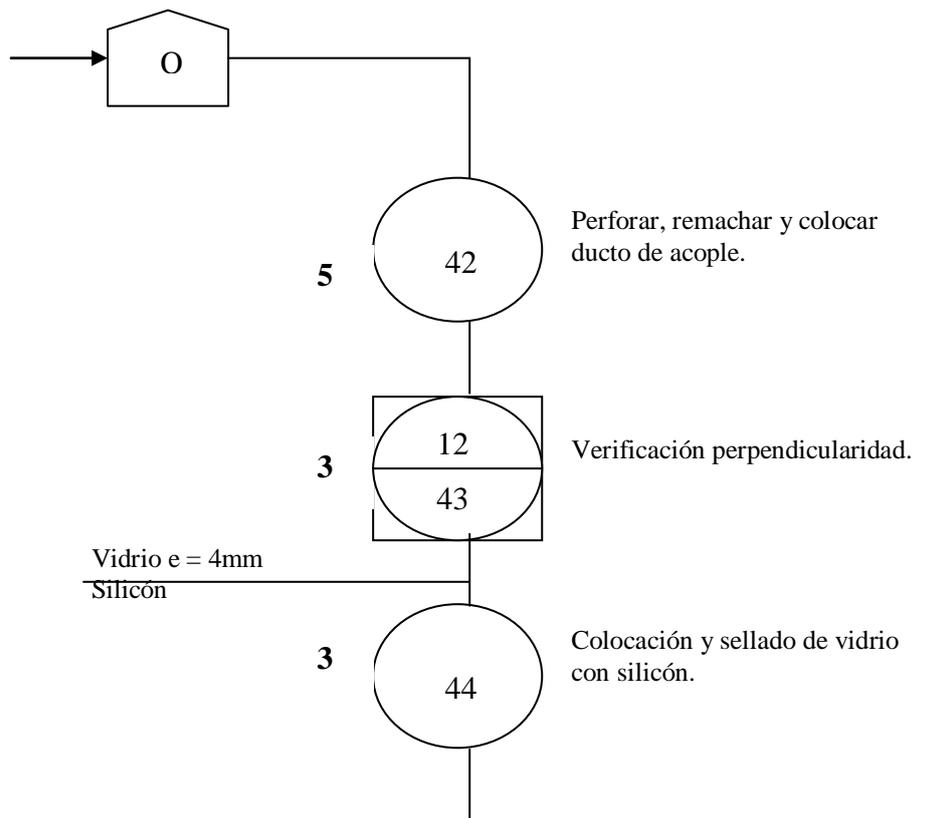
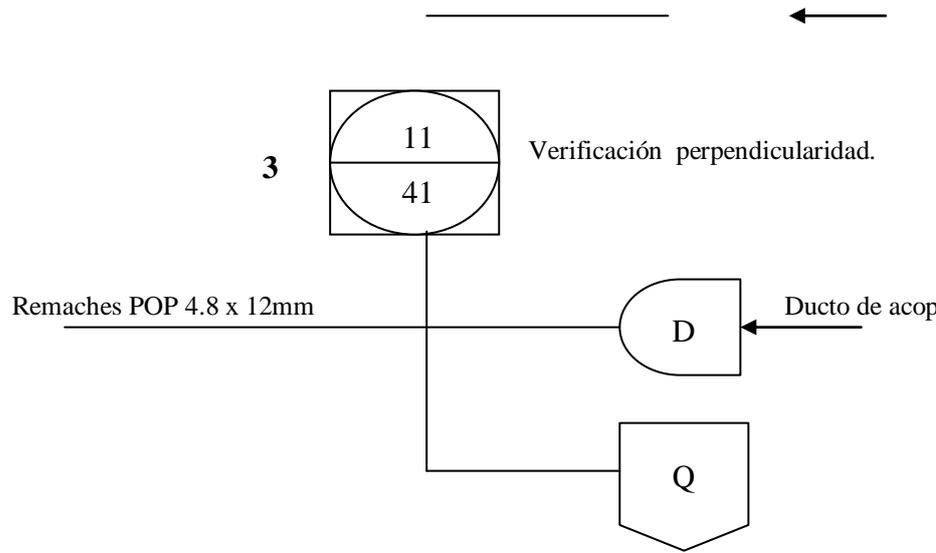




Cantidad: 5 soportes

FIG. 5.2 Diagrama de proceso del horno.(7/8)





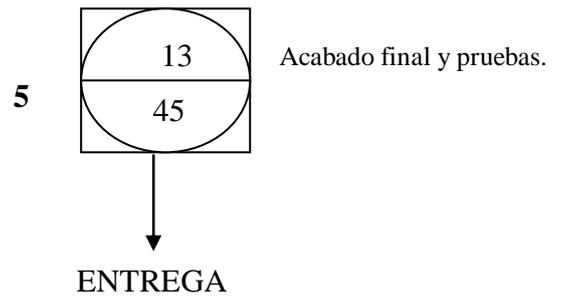
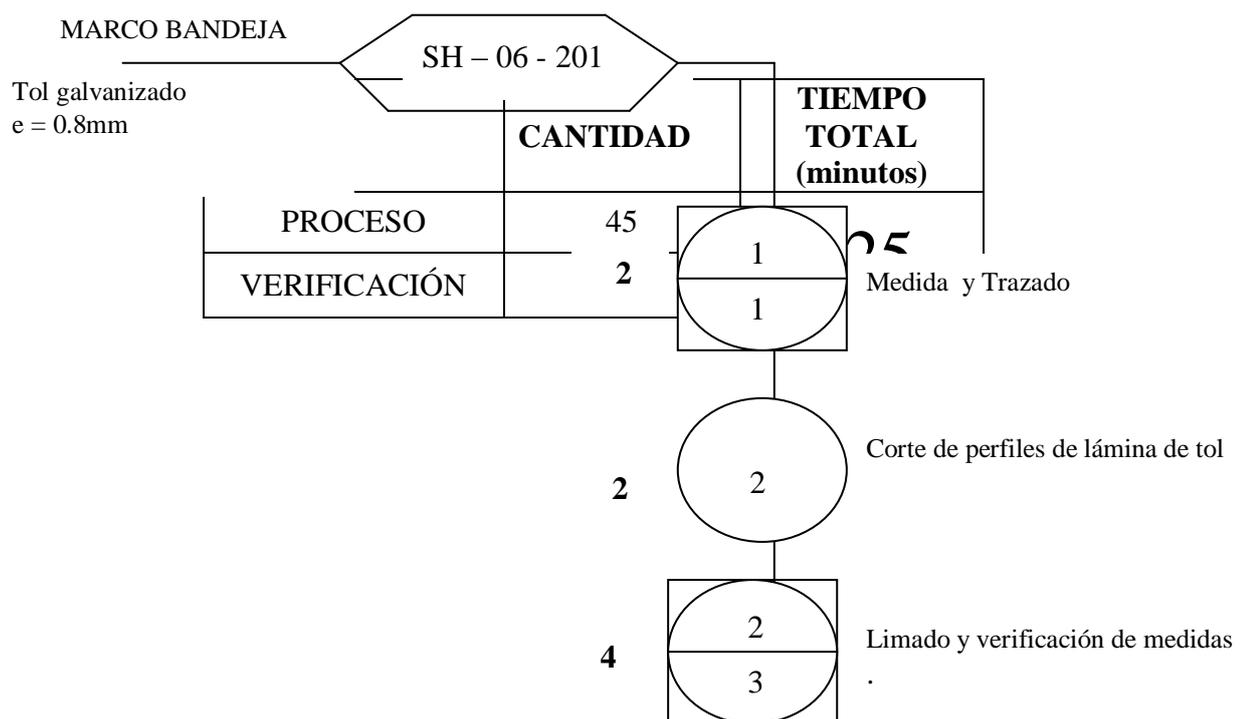
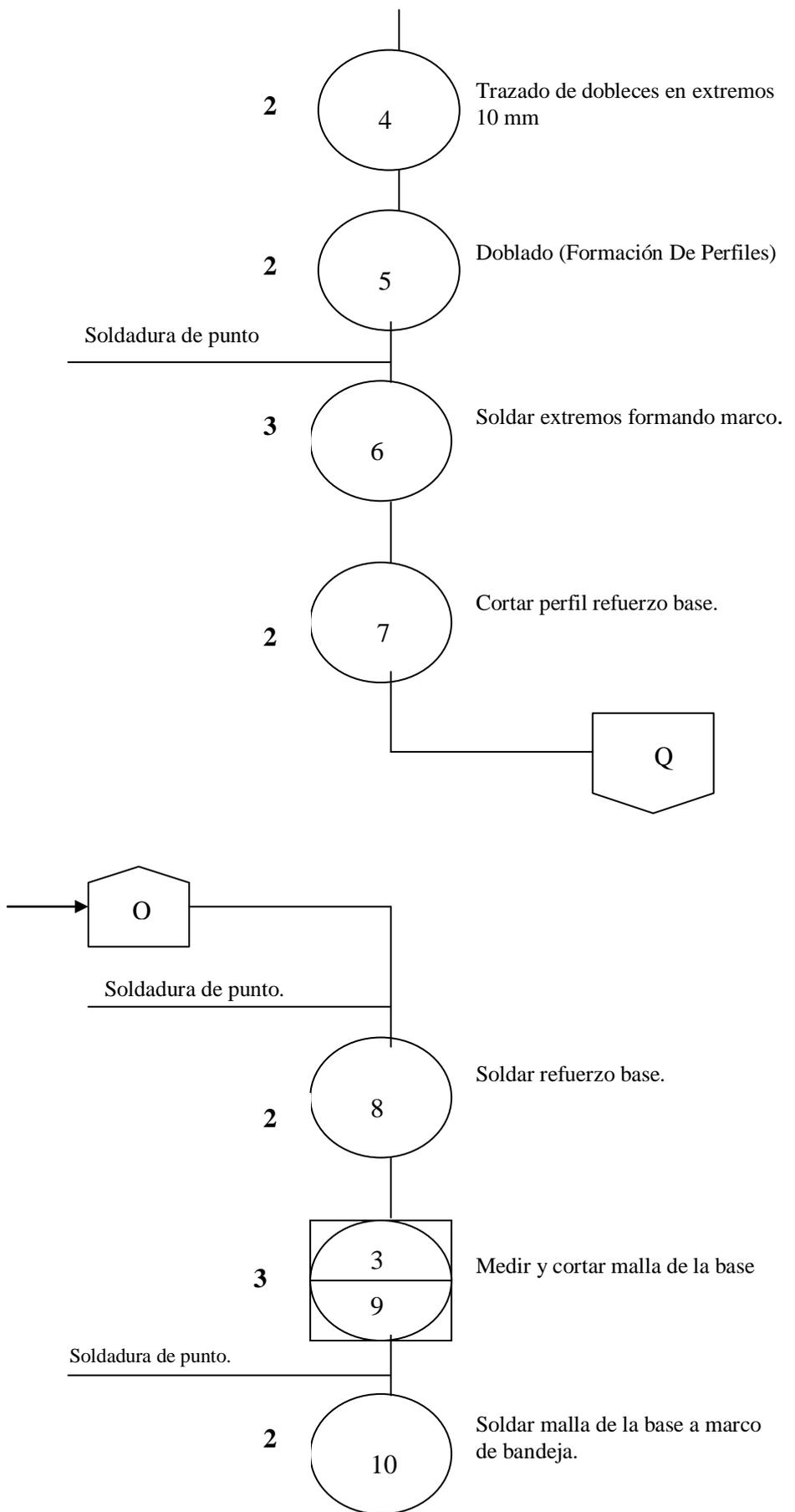
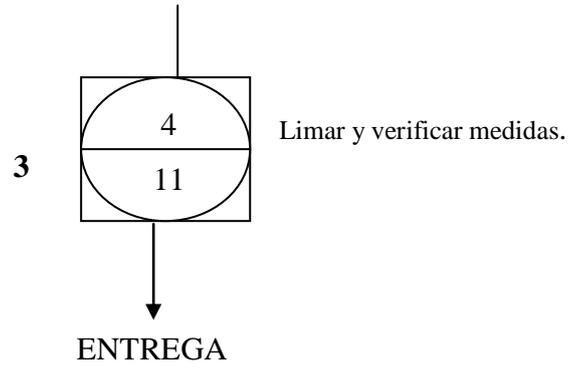


FIG. 5.3 Diagrama de proceso de las bandejas.(1/2)







Cantidad: 5 soportes

5.1.2. – MANO DE OBRA NECESARIA:

Comprende al trabajador involucrado directamente con la elaboración del prototipo; en este aspecto, para lo que es trazos, corte, se necesita una sola persona; en la parte que corresponde al armado, tanto del colector como del deshidratador, se necesita de dos personas, esta se lo realiza con la ayuda de un maestro mecánico.

5.1.3. –
TALLERES
LABORATORIOS:

	CANTIDAD	TIEMPO TOTAL (minutos)
PROCESO	11	135
VERIFICACIÓN	4	

Y

Para la fabricación del secador de hierbas aromáticas, se utilizará las instalaciones y equipos del laboratorio de máquinas herramientas de la FIME, en cuanto a los equipos de medición como termómetros, anemómetro, se los solicita al laboratorio de termodinámica de la FIME.

5.2. – MONTAJE:

Una vez fabricados cada una de las piezas y partes que conforman el deshidratador, se procede a su montaje, a continuación se indica la secuencia de montaje.

Ensamblaje del colector solar:

- Ensamblar la caja del colector (perfil).
- Remachar la placa inferior a la caja del colector.
- Colocar la placa colectora.
- Asegurar la placa colectora a la caja del colector.
- Pintar de color negro mate la placa colectora.
- Asegurar la cubierta transparente (vidrio templado), a la caja del colector.
- Colocar y asegurar el ducto de entrada, tobera y ducto de secado al cuerpo central del colector.



Fotografía 5.1. Colector armado

Ensamblaje del horno:

- Ensamblar paredes exteriores.
- Asegurar paredes posteriores.

- Colocar aislamiento térmico, lona de vidrio.
- Colocar y asegurar tapas interiores.
- Colocar y remachar perfiles para sostener las bandejas.
- Colocar y asegurar puerta del horno.
- Colocar y asegurar ducto de acople.



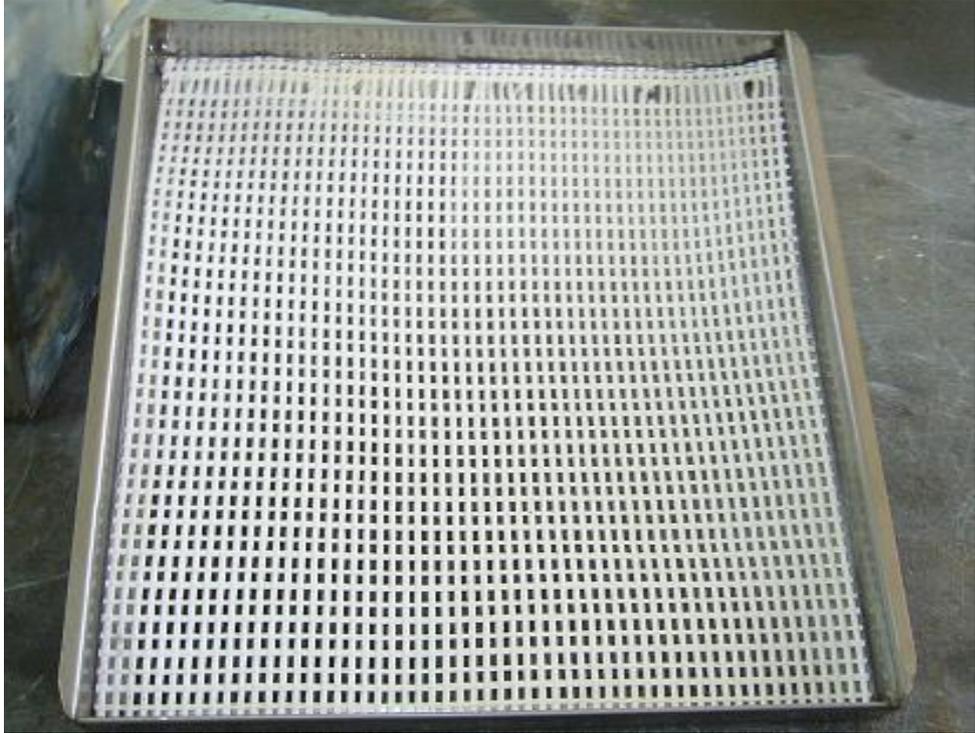
Fotografía 5.2. Interior cámara de secado

Ensamblaje bandeja:

- Asegurar – soldar paredes laterales de las bandejas.
- Soldar platina refuerzo en la base.

- Colocar y asegurar malla metálica en la base de la bandeja.

Los planos de montaje e instalación se encuentran en los Anexos D.



Fotografía 5.3 Bandeja para colocar producto.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS DE OPERACIÓN DE LA SECADORA

Se realizaron pruebas de secado para las tres variedades de hierbas aromáticas, manzanilla, menta y orégano, para realizar las pruebas del deshidratador, y por ende definir los parámetros y variables. Para esto se plantea los siguientes objetivos.

- Comprobar el funcionamiento del colector solar. Para determinar la temperatura de trabajo del aire de secado.
- Comprobar el funcionamiento del horno (cámara de secado). Para establecer la temperatura de secado de funcionamiento del mismo.
- Obtener las curvas de secado de cada una de las hierbas aromáticas. A fin de comprobar las variaciones de estas con los modelos teóricos.

6.1. – DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y VARIABLES:

Antes de entrar a definir los parámetros y variables, se determinará los instrumentos que serán utilizados para realizar las pruebas de secado y estos son:

- Anemómetro digital (0.01 m/s).
- Panel fotovoltaico (43 W).
- Multímetro digital (600 v, 400 Ω , 400 A).
- Termómetro de termocuplas (de -10 a 200 °C, apreciación de 0,2 °C)
- Termómetro láser (-20 A 1000 °C).
- Balanza de precisión (0.1g.)

Los parámetros y variables que se van a determinar son:

- Intensidad del panel fotovoltaico (A)
- Voltaje del panel fotovoltaico (V)
- Temperatura ambiente (°C)
- Temperatura media de la placa (°C)
- Temperatura a la entrada del horno (°C)
- Temperatura al inicio de la chimenea (°C)

6.2. – PLAN DE PRUEBAS EN EL PROTOTIPO CONSTRUIDO

El procedimiento general que se aplicará para las pruebas, se puede resumir de la siguiente manera:

- Determinar la humedad inicial del producto; en caso de no hallarse tabulado, es decir sin tener una referencia teórica, se sugiere la siguiente forma de determinar esta; tomar una muestra de 100g. de producto para determinar su peso inicial, para luego someterle a un proceso de secado rápido, en un horno eléctrico, controlando que la temperatura no pase de 100 °C, para cada 15 minutos sacar la muestra del horno y pesarla, este procedimiento se suspenderá cuando la variación del peso de la muestra con respecto al tiempo sea nula. De esta manera se obtiene la masa seca, por lo que la humedad inicial se determina con la aplicación de la siguiente formula.

$$\text{Hbh inicial} = \frac{\text{M inicial} - \text{M seca}}{\text{M inicial}} \times 100 (\%) \quad (6.1)$$

Donde: **Hbh inicial**, humedad inicial del producto (%), **M inicial**, masa húmeda del producto (Kg), **M seca**, masa del producto seco (Kg).

- Colocar un termómetro con termocupla en el ingreso del aire caliente al horno (punto 3). Termómetro de bulbo seco – bulbo húmedo.

- Colocar un termómetro con termocupla al inicio de la chimenea (punto 4). Termómetro bulbo seco – bulbo húmedo.
- Cargar el secador con la masa del producto a secarse (pesándolo previamente), colocarlo en las bandejas de tal forma que la altura del lecho del producto sea uniforme.
- Instalar el panel fotovoltaico, para determinar la intensidad y voltaje, a fin de poder determinar la ración solar.

En el gráfico 6.1 se observa un esquema general de los puntos determinados para las diversas medidas.

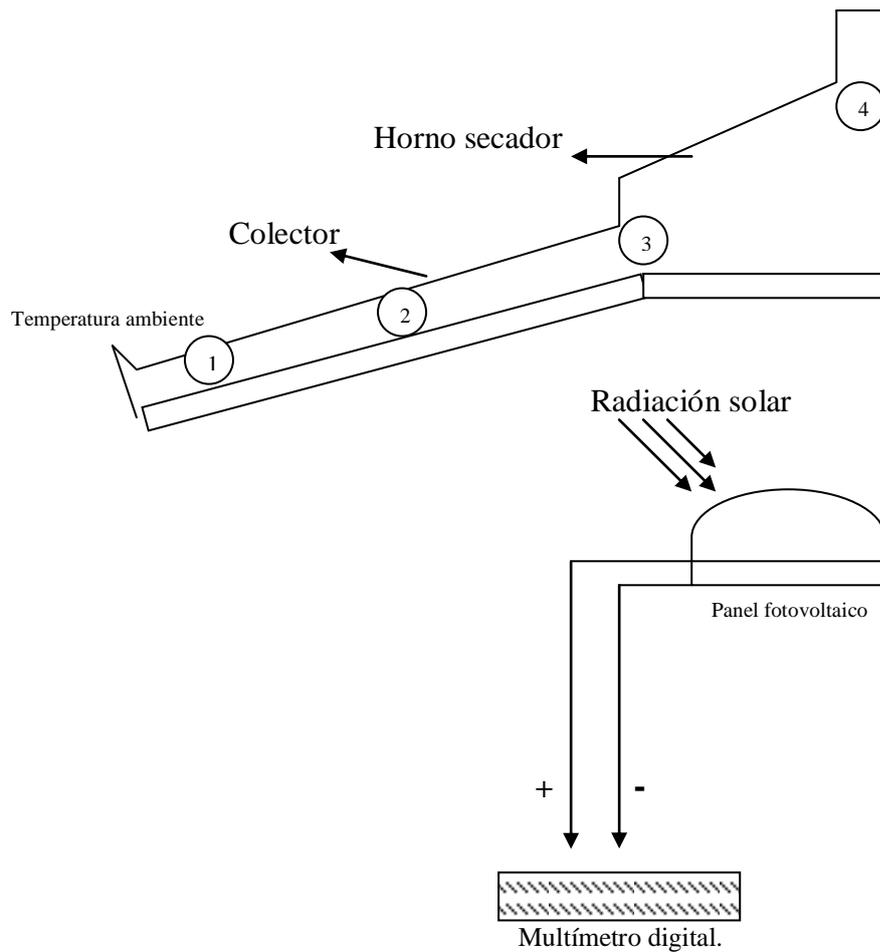


Figura. 6.1: Puntos de toma de datos.

6.2.1. – MEDIDAS REALIZADAS.

La periodicidad de las medidas fue de cada 10 minutos durante el día de secado y se midieron los siguientes parámetros.

- Peso inicial de la masa de producto.
- Peso final de la masa producto.
- En caso de no contar con la humedad inicial de producto, determinar esta mediante el procedimiento de secado rápido.
- Medir intensidad y voltaje del panel fotovoltaico.
- Temperatura ambiente.
- Temperatura a la entrada del colector (punto 1).
- Temperatura media de la placa colectora (punto 2)
- Temperatura al ingreso del horno (punto 3).
- Temperatura al ingreso de la chimenea (punto 4).
- Peso del producto cada hora; a fin de determinar su porcentaje de humedad, y así lograr graficar la curva de secado.

A partir de todas las variables anteriormente mencionadas se obtiene los siguientes parámetros.

- Humedad final del producto ³⁶ (la cual debe estar de 10 a 15 %)
- Humedad parcial (cada hora, al inicio y al final del día del secado)
- Radiación total diaria, este parámetro se le determina en base a los valores de radiación instantánea.
- Temperatura promedio del horno (temperatura media entre los puntos 3 y 4)

³⁶SUQUILANDA V MANUEL B. Plantas Medicinales y Hierbas Aromáticas UPS 1995 pag. 37.

6.3. – ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

- EL funcionamiento del colector solar presenta una eficiencia del 39 %, (Anexo C.2), lo que deja ver que el colector se encuentra dentro de los parámetros establecidos para su diseño, esto se debe principalmente a que mediante el proceso de convección natural no presenta eficiencias altas como en el caso de la convección forzada, por lo que se sugiere que para una próxima adecuación del prototipo se coloque un ventilador a fin de mejorar la eficiencia del mismo.
- Las temperaturas en el horno demuestran que la temperatura en el punto 4 es menor que la temperatura del punto 3, esto es como resultado de la progresión del secado, y del hecho de que el aire al ingreso de la cámara de secado presenta una menor humedad relativa, (ver Anexo E.7, Tabla No. 4).
- La temperatura promedio del horno debe estar entre 35 a 40 °C, por lo que si la temperatura es mayor se deberá abrir la puerta del horno, a fin de conseguir una disminución de la temperatura con el propósito de no alterar las propiedades físico – químicas de la planta.
- En el gráfico disminución del peso vs. tiempo de secado se puede apreciar un período de ajuste, en el cual existe muy poca variación del peso, este semejante para la menta y el orégano, no así en la manzanilla en la cual este período de ajuste se produce un tiempo mayor, (Anexos E).
- La variación en el contenido de humedad de las hierbas aromáticas depende directamente de la cantidad de radiación solar disponible, (Anexo E.6).

- Las temperaturas medias de la placa, del aire en el invernadero, y la del ambiente, varían en forma proporcional a la radiación solar, (Anexos E).
- La humedad relativa del ambiente y en el interior del invernadero varían de manera inversa a las variaciones de la radiación solar, (Anexo E.7).
- No se tubo problema de condensado en el interior del horno, esto es por que las temperaturas del horno resultaron mayores a las del punto del rocío dependientes de la humedad relativa del aire dentro de la cámara, por lo que se puede manifestar que el aislante térmico fué el adecuado, y por lo tanto la selección de los parámetros del secado.

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS ECONÓMICO

7.1. – COSTOS DIRECTOS.

Aquí se encuentran involucrados los desembolsos de aquellas materias primas, materiales, equipos o accesorios que intervienen directamente en la elaboración del prototipo.

7.1.1. – MATERIALES

Para el sistema de secado de hierbas aromáticas se requiere de un colector solar para calentamiento de aire, y de un horno tipo invernadero, los materiales directos involucrados en la construcción se hallan en el anexo F.

Tabla 7.1. Costos totales de materiales directos utilizados en el sistema de secado de hierbas aromáticas.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	MATERIALES COLECTOR	1	170.17	170.17
2	MATERIALES SOPORTE COLECTOR	1	31.41	31.41
3	MATERIALES HORNO	1	170.17	170.17
4	MATERIALES SOPORTE HORNO	1	24.06	24.06
			NETO	395.81
			I.V.A	47.49
			TOTAL	443.30

7.1.2. – MANO DE OBRA DIRECTA:

La mano de obra directa es aquella que interviene personalmente en el proceso de producción, refiriéndose específicamente a los obreros.

Tabla 7.2. Costo de mano de obra directa.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Maestro Metal Mecánico	1	200,00	200,00
2	Personal instalación sitio de prueba	2	15,00	30,00
			NETO	230,00
			I.V.A	27,60
			TOTAL	257,60

7.2. – COSTOS INDIRECTOS:

Comprende personal, materias primas, equipos, materiales o accesorios utilizados dentro de la investigación, pero que no se considera directos en el sistema de secado solar de hierbas aromáticas.

Tabla 7.3. Costos de materiales y accesorios indirectos utilizados en la valoración del proyecto.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Producto a ser secado	3 Kg.	20,00	60,00
2	Fundas plásticas negras	10 u.	0,15	1.50
3	Rollo de cinta térmica	1 u.	6.75	6.75
			NETO	68.25
			IVA	8.19
			TOTAL	76.44

7.2.1. – MATERIALES FUNGIBLES:

Comprende aquellos materiales que se consumen con el uso, y que son utilizados dentro de la elaboración del proyecto.

Tabla 7.4. COSTO DE MATERIALES FUNGIBLES.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Gasolina	3 gl.	1.46	4.38
2	Maskin	3 u.	1.50	4.50
3	Thinner	1 gl.	4.00	4.00
			NETO	12.88
			IVA	1.55
			TOTAL	14.43

7.2.2. – IMPREVISTOS:

Se considera aquellos costos urgentes no programados, y se asume un 10% del costo del proyecto.

Tabla 7.5. Costo de Imprevistos.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	10 % costo proyecto	1	.10 x 709.94	70.99
			NETO	70.99
			IVA	8.51
			TOTAL	79.50

7.3. – COSTO TOTAL DEL PROYECTO:

Tabla 7.6. Costo total

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Materiales directos	1	398.81	398.81
2	Mano de obra directa	1	230.00	230.00
3	Materiales indirectos	1	68.25	68.25
4	Materiales fungibles	1	12.88	12.88
5	Imprevistos	1	70.99	70.99
			NETO	780.93
			IVA	93.71
			TOTAL	874.64

7.3.1. – COSTO DE MAQUINARIA Y EQUIPOS.

Este rubro debe reflejar el costo del uso de la maquinaria y herramientas utilizadas para la elaboración del prototipo. Las principales máquinas herramientas que se necesitaron para este tipo de trabajo son:

- Cortadora de tol, dobladora de tol, soldadora MIG, soldadora de punto, taladro manual, taladro de banco, remachadora manual, amoladora, compresor de aire, pistola para pintura, herramienta de banco, instrumentos de medida.

Tabla 7.7. Costo de maquinaria y equipos.

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD HORAS	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	Maquinaria y herramientas	40	6,00	240, 00
2	Instrumentos de medida	60	3.00	180,00
			NETO	420,00
			IVA	50.40
			TOTAL	470.40

7.3.2. – TIR – VAN.

Estos dos métodos de evaluación económica toman en cuenta el valor del dinero a través del tiempo. El Valor Actual Neto (VAN) es el valor monetario que resulta de restar la suma de los flujos descontados a la inversión inicial,³⁷ es decir es la diferencia entre todos los ingresos y todos los egresos actualizados al período actual. Para aceptar un proyecto, las ganancias

deberán ser mayores que los desembolsos, lo cual dará como resultado que el VAN sea mayor que cero.

La Tasa Interna de Retorno (TIR), es la tasa de descuento para la cual el (VAN) es igual a cero; es la tasa que iguala la suma de los flujos descontados a la inversión inicial. Para aplicar la (TIR) se debe aplicar las siguientes reglas:

- Si la TIR es mayor que la tasa de interés, el rendimiento que obtendrá el inversionista es mayor que el mínimo fijado como aceptable, la inversión es económicamente rentable.
- Si la TIR es menor que la tasa de interés, el proyecto debe rechazarse.

³⁷ Baca Urbina Gabriel "Evaluación de proyectos" Instituto Politécnico Nacional México, 2001 pag. 213 – 214 - 215 - 216

- Si la TIR es igual a la tasa de interés queda a criterio del inversionista el aceptar o rechazar la inversión.

Para realizar el cálculo del TIR y del VAN, se considera como ingresos el valor de la cantidad de hierbas aromáticas deshidratadas a lo largo de cada año.

El precio de cada gramo de hierba aromática deshidratada se establece en base al costo de este producto en los centros comerciales, para el presente estudio se toma como referencia el costo que da la empresa Preconsumo C.A; en la que cada gramo de producto tiene un costo de \$ 0.025.

Para determinar la cantidad de producto deshidratado que se genera en un año, se asume que en cada parada del horno se deshidratará 3 Kg. de producto, (3 Kg. de producto se deshidratan en un período de 4 a 5 días, ver anexo E. 7), durante cuatro ocasiones al mes. Este es un valor promedio, ya que habrá ocasiones en que no se podrá utilizar el secador debido al mal tiempo.

También asumiremos que el promedio de humedad inicial es del 75%, y la humedad final es del 18%.

Tabla 7.8. Ingreso anual del proyecto.

MASA PRODUCTO INICIAL HÚMEDO (Kg)	MASA PRODUCTO FINAL SECO (Kg)	CARGAS POR AÑO	MASA PRODUCTO SECO POR AÑO (Kg)	PRECIO POR (Kg) PRODUCTO SECO	INGRESOS POR AÑO
3	1.1	48	52.8	\$ 25,00	\$ 1320,00

Como egreso se considera el valor del producto húmedo, y el valor de trabajo de una persona que realiza la carga y descarga del secador, así como el control del secado. Esta persona necesitara para cada carga, descarga y control 3,75 horas de trabajo.

Tabla 7.9. Egreso anual del proyecto.

DESCRIPCIÓN	CONSUMO	PRECIO U.	EGRESO POR AÑO
OBRERO 180 hr x año	1	\$ 1.50 (hr)	\$ 270,00
PRODUCTO HÚMEDO (Kg)	144 (Kg)	\$ 3.50	\$ 504
TOTAL			\$ 774,00

Como se puede apreciar al analizar las tablas 7.8 y 7.9 se tiene un ingreso anual de \$ 1320,00 y un egreso de \$ 774,00 al primer año, utilizando el interés pasivo del Banco Central de Ecuador de 4.13 % (del 25 al 29 de junio de 2006), se realiza el flujo de caja para los primeros 5 años, ver tabla 7.10.

Tabla 7.10. Flujo de caja del proyecto.

Utilizando la siguiente expresión se realiza el cálculo del VAN:

$$VAN = -P + \sum_{i=1}^n \frac{FN_i}{(1+tasa)^i} \quad (7.1)$$

Donde, **P** es el costo actual, **FN** es el flujo neto para cada año, **tasa** es la tasa de descuento, (llamada así porque descuenta el valor del dinero en el futuro a su equivalente en el presente), **n** es el número de flujos de caja.

De la ecuación (7.1) el valor del VAN para el periodo de cinco años es:

$$VAN = -874,64 + \frac{546,00}{(1,0413)^1} + \frac{568,55}{(1,0413)^2} + \frac{592,03}{(1,0413)^3} + \frac{616,48}{(1,0413)^4} + \frac{641,94}{(1,0413)^5}$$

Años (n)	Egresos Estimados	Ingresos Estimados	Flujos Netos (FM)
0	\$ 874,64		-\$ 874,64
1	\$ 774,00	\$ 1320,00	\$ 546,00
2	\$ 805,96	\$ 1374,51	\$ 568,55
3	\$ 839,25	\$ 1431,28	\$ 592,03
4	\$ 873,91	\$ 1490,39	\$ 616,48
5	\$ 910,00	\$ 1551,94	\$ 641,94

$$VAN = 1747,69$$

El cálculo del **TIR** se obtiene cuando el **VAN** es igual a cero, en este instante el valor de la tasa es el TIR. De la ecuación 7.1 se tiene:

$$874,64 = \frac{546,00}{(1+i)^1} + \frac{568,55}{(1+i)^2} + \frac{592,03}{(1+i)^3} + \frac{616,48}{(1+i)^4} + \frac{641,94}{(1+i)^5}$$

El valor de i que iguala la suma de los flujos descontados, a la inversión inicial P es: $i = 0,6078$, entonces se tiene que después de cinco años el TIR es de 60,78 %, (el interés activo es de 8,39 % según la base del Banco Central del Ecuador).

De lo anterior se puede observar que el VAN es mayor que cero, el TIR es mayor que el interés activo del Banco Central del Ecuador, por lo que la inversión es económicamente rentable, por ende el proyecto es conveniente.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1.- CONCLUSIONES.

- Se ha logrado construir un prototipo, que utilizando la energía solar, es capaz de deshidratar las hierbas aromáticas (manzanilla, menta, orégano), como lo demuestran los datos tabulados en el anexo E.2. Con el desarrollo y culminación del mismo, se aporta a la técnica de la utilización de colectores solares planos para calentamiento de aire y su aplicación en el secado de productos agrícolas, estableciéndose los fundamentos básicos, pero necesarios para su aplicación en el sector rural.
- Las hierbas aromáticas deshidratadas por el prototipo alcanzaron una humedad final comprendida desde el 15 al 18 % (ver anexo E.7), que es la humedad que permite su conservación y por ende desfavorece el desarrollo de microorganismos perjudiciales para este tipo de productos.

- Analizando las curvas de secado (anexo E, gráficos 1,2,3) se establece que el proceso de secado de la manzanilla, menta, orégano, se realiza en dos períodos; un período constante y luego un período postcrítico, teniendo este último el mayor porcentaje del tiempo total del secado.
- Al realizar las pruebas de secado en el prototipo, se puede determinar que el secador trabaja en una temperatura promedio entre 35 a 40 °C (anexos E), que es la temperatura óptima que se requiere para deshidratar hierbas aromáticas.
- La construcción de la cámara de secado tipo invernadero, con bandejas removibles, permite que el aire caliente circule a través de las bandejas, con lo que se consigue una mejor transferencia de calor; pero de igual forma se observa que las bandejas intermedias deben rotar en su posición, por lo menos cada 2 horas, ya que las de los extremos, especialmente la cercana a la chimenea presentan un producto más seco.

La aplicación de la energía solar, conjuntamente con la construcción de un secador óptimo, hacen de este un instrumento práctico y de fácil operación en el sector rural de nuestro país, predominantemente agrícola. La eficacia mostrada por el secador en las pruebas (anexos E), debería invitarnos a promover su utilización en el sector rural.

A pesar de que el costo inicial del prototipo es alto (tabla 7.3), su tasa de retorno es cercana a los dos años, lo que deja ver que su rentabilidad es del 60.78 % para los primeros cinco años, (tabla 7.10), esto indica que sería un buen negocio para el productor del sector rural incursionar en este tipo de aplicación para sus productos, por lo que conseguiría mejorar su nivel de vida.

8.2.- RECOMENDACIONES .

Se recomienda tapar el equipo en la noche, por cuanto, cuando la planta empieza a estar seca, es fácil que absorba humedad del ambiente especialmente en la noche, lo que genera un desfase en la curva de secado,(ver gráficos 1,2,3 anexo E).

Para conseguir un secado adecuado, se deberán rotar las bandejas del producto, colocando las de los extremos en el centro y viceversa, a fin de obtener un producto final apropiado para salir al mercado.

Se recomienda mantener limpia la cámara de secado, luego de cada parada, a fin de controlar la formación de hongos, esporas o bacterias.

Para futuros proyectos de secado, se recomienda ampliar el estudio a formas de almacenamiento, con el fin de obtener la forma más adecuada de conservar el producto deshidratado.

En nuestro país se debe incentivar la deshidratación de productos agrícolas, como una forma de conservarlos, generando un valor agregado al producto, lo que es una forma de dejar de vender solo materia prima.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. – BRINKWORTH. B.J. “Energía solar para el hombre”. Madrid, H. Blume 1989, 244 p.
2. – COLECCIÓN COOPERACIÓN Y TECNOLOGÍA, “Energía solar fotovoltaica y cooperación al desarrollo”. Andalucía IEPALA. Universidad internacional de Andalucía 1999, 210 p.
3. - DUFFIE, J y BECKMAN, W. solar Engineering of Thermal Processes. 2da ed. EEUU, Wiley-Interscience, 919 p.
4. – ECUADOR. INSTITUTO NACIONAL DE ENERGÍA INE “Estudio de alternativas para los colectores solares, para calentamiento de aire”. INE 1988, 27 p.
5. - ECUADOR. PROYECTO UTA – INE. “Diseño y construcción de un colector solar plano para el secado de granos en silos estacionarios. 1990, 69 p.
6. - FARRINGTON, D.” Uso directo de la Energía Solar”. Traducción Enrique Zoido. 2da ed. Madrid, H. Blume Ediciones, 305 p.
7. – FONT QUER P. “Plantas medicinales. El dioscórides renovado”. Madrid. Editorial Labor s.a. 1982, 900 p.
8. - GUASUMBA JOSÉ. “Curso energías alternativas para el desarrollo sustentable”. 2005.

9. - HANS, R. "Energía Solar, aplicaciones prácticas". Traducido por Roberto Fuchs. 1a ed. España, Marcombo, S.A., 215 p.
- 10.- INCROPERA F – DE WITT D. "Fundamentos de transferencia de calor" 4ta edición. Traducción Ricardo Cruz. México. Prentice Hall. 1999, 874 p.
- 11.- MANRIQUE, J. Termodinámica. 3ra ed. México, Oxford University Press, 544 p.
- 12.– MARQUEZ PEREIRA – MARCAL DE QUEIROZ. " Principio de secado de granos, Psicrometría. Higroscopia". Chile. FAO 1991.79 p.
- 13.– NACIONES UNIDAS. "Tecnología para aprovechar la energía solar". Publicaciones de las naciones unidas 1994. 170 p.
14. POUS MAS TERESA. "Tratado de plantas medicinales". Madrid, Editorial Alas 1979.
15. SALGADO R / GUTIÉRREZ F. "Ingeniería de la energía solar". México, el colegio Nacional. 1994. 416 p.
16. SING. P. / HELDMAN D. "Introducción a la ingeniería de los alimentos" España. Editorial Acribia s.a. 1998.
- 17.– SUQUILANDA V. M. "Plantas medicinales y hierbas aromáticas" Ediciones UPS. Fundagro 1995. 39 p.
- 18.– WILSON J. I. B. "La energía solar". España. Editorial Alambra. 1982. 224 p.

PUBLICACIONES:

1. GUASUMBA, J. Cocina Solar Portátil de tipo parabólico para uso en campo, Mérida – Venezuela, 2004.

DIRECCIONES DE INTERNET:

1. http://sky.net.co/energia/Radiacion_solar_1.htm#manH, Radiación Solar Extraterrestre, Diciembre 2005.
2. http://www.portalplanetasedna.com.ar/central_solar.htm. Instalaciones de media Temperatura, Diciembre 2005.