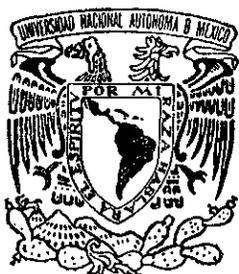


01173  
2  
Ley



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

**T E S I S**

DETERMINACION DEL CAMPO DE TEMPERATURAS  
DE UN DISPOSITIVO SOLAR PARA EL SECADO  
DE PASTO KENTUCKY (POA PRATENSIS L.)

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
**MAESTRIA EN INGENIERIA MECANICA**  
P R E S E N T A  
**JACINTO RICARDO MENDEZ BANDA**

ASESOR: DR. LUIS REYES AVILA

COASESOR: M. EN I. EUSEBIO JIMENEZ LOPEZ

GRUPO DITAI



CIUDAD UNIVERSITARIA

1999

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

1999  
272921  
H



Universidad Nacional  
Autónoma de México



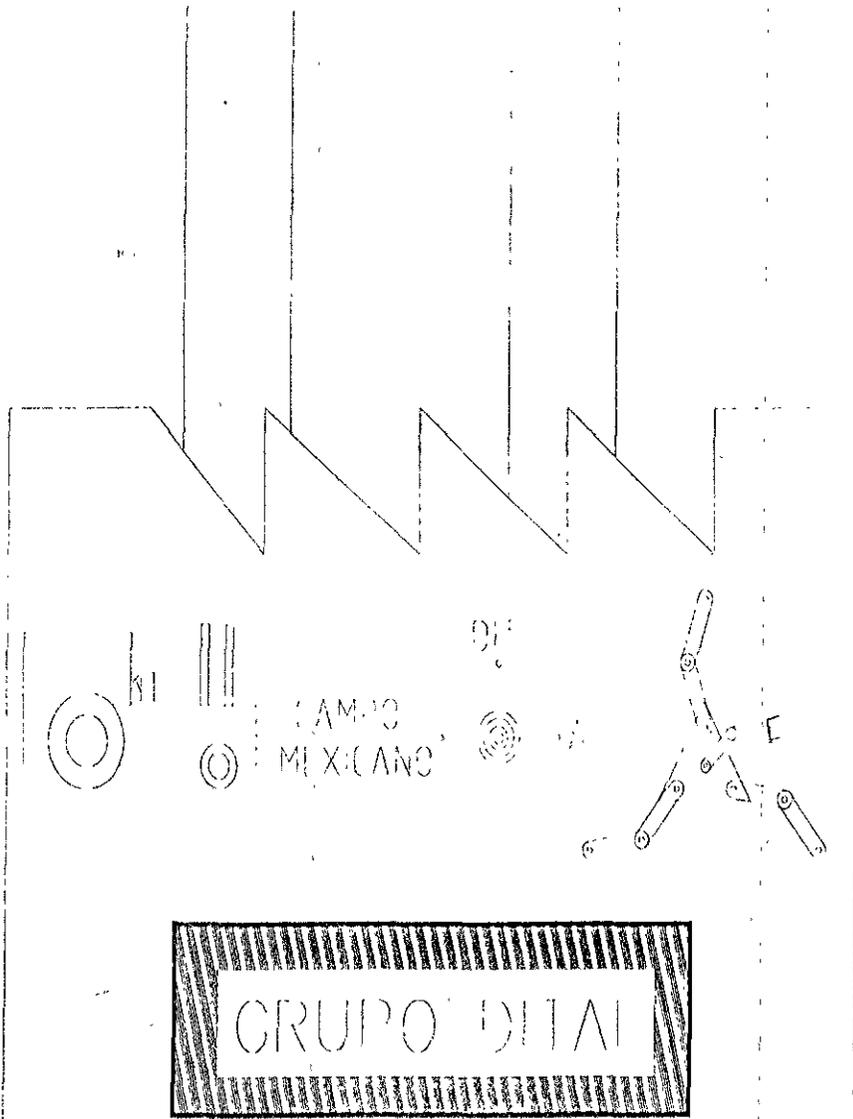
**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

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

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

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

# EL GRUPO DITAI



*Muy pocos poseen valor para ser juiciosos, pues serlo implica olvidarse de la seguridad personal y entregarse al riesgo de vivir; aceptar el dolor como condición de la existencia, cortejar la duda y la obscuridad, armarse de tenacidad en el conflicto y aceptar siempre las consecuencias de vivir y de morir.*

*Morris West.*

*Si cada vez que te tropiezas te sabes levantar, llegará el momento en que no caerás jamás.*

*Anónimo.*

*No busques el camino que deba conducirte, busca el sendero que te permita dejar tu huella.*

*Anónimo.*

Agradecimientos:

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

A LA FACULTAD DE INGENIERIA.

AL POSGRADO DE INGENIERÍA.

A LA SECCION DE MECÁNICA.

AL DR. LUIS REYES AVILA.

AL JURADO.

AL GRUPO DITAI.

A todos aquellos con quién compartí tiempo y espacio.

## Prólogo

México es un país en continuo crecimiento poblacional, por lo tanto es necesario proporcionar más alimentos entre los que destacan los pecuarios, tanto para consumo local como nacional. Uno de los caminos más directo y efectivo es incrementar los volúmenes que actualmente se producen, para lograr este fin, se debe de tecnificar la ganadería.

Algunos de los recursos económicos más importantes con que cuenta el ganadero, son las hierbas de pasto y los forrajes obtenidos en las praderas de temporal; abundantes en algunas épocas del año y escasas en otros, para poder tener un suministro constante durante todo el año es importante cortar todo el forraje posible en primavera y verano, deshidratarlo y almacenarlo para usarlo en otoño e invierno, de esta manera se reducirían las pérdidas post-cosecha que son de un 30% aproximadamente por ciclo agrícola.

Bajo estas premisas se puede tener 3 opciones para este fin:

- a) Henificación, donde se pierde entre un 25 a 30% de su valor biológico;
- b) Ensilado, donde se tiene que controlar la fermentación;
- c) Deshidratado, donde el costo inicial es muy alto.

Una nueva posibilidad es la implementación de secadores solares para forrajes, la cual es técnicamente posible, económicamente viable y ecológicamente adecuada. El único inconveniente es que sólo puede operar cuando hay sol, y en regiones donde la humedad relativa sea menor a 80%, en caso contrario se puede acoplar un sistema para hacer vacío parcial que podrá suplir este inconveniente.

Por otro lado, quiero agradecer a los integrantes del Grupo DITAI\* su colaboración y revisión en este trabajo particularmente del M. en I. Eusebio Jiménez López. El grupo DITAI es un conjunto de jóvenes ingenieros que trabajan en las áreas de ingeniería, que se formó con la finalidad de realizar desarrollos acordes a nuestra economía y cultura de la cual formamos parte.

\* DITAI Desarrollo e Integración Tecnológica y Asesoría en Investigación.

Prólogo	V
Índice	VI
Introducción	VII
Capítulo I    Construcción del dispositivo	1
1.1 Especificaciones	1
1.2 Construcción del prototipo	3
1.3 Pruebas y refinamiento	5
1.4 Propuestas técnicas	7
1.5 Selección del concentrador	8
1.6 Selección de materiales	9
1.7 Construcción de secador solar completo	10
1.8 <i>Calculo del campo de temperaturas</i>	12
Capítulo II   Resultados y discusión	15
2.1. Descripción del experimento	15
2.2 Resultados experimentales	15
2.3 Resultados teóricos	16
2.4 Análisis de resultados	16
3. Conclusiones	20
4-A. Apéndice. Metodología de diseño	21
4-B. Apéndice. Fundamentos de tecnología solar.	32
4-C. Apéndice. Transporte de calor.	48
4-D. Apéndice. Planos del prototipo.	65
4-E. Apéndice. Unidades de medición.	80
4-F. Apéndice. Glosario	80
4-G. Apéndice. Taxonomía del pasto <i>Poa Pratensis</i> L.	81
4-H. Apéndice. Tabla de humedad	82
5. Bibliografía	83

## Introducción

Los objetivos principales del presente trabajo son:

- Diseño y construcción de un dispositivo de secador solar para secado del pasto *Poa Pratensis* L. que sea capaz de secar 100 gramos de pasto por hora.
- Bajar el contenido de humedad del pasto que originalmente es de 80-85% al intervalo de 10 a 15%.
- Solución mediante la técnica del elemento finito, el problema de transporte del calor en dos dimensiones, del interior de la cámara de secado para determinar el campo de temperaturas de este dispositivo.

Se tomó como caso de estudio al pasto *Poa Pratensis* L., por las siguientes razones:

1. Es de un diámetro promedio de 3 milímetros, al ser más grueso que otros pastos podemos estar seguros que el prototipo podrá secar a los pastos de menor grosor.
2. Es común en México.
3. Es accesible para la experimentación.

La tendencia actual en los dispositivos que emplean Tecnología Solar consiste en: concentrar la energía en una superficie pequeña; transferir la energía a un fluido apropiado, y de éste a un equipo que realiza algún trabajo.

El dispositivo tiene una concepción diferente a la tendencia actual en Tecnología Solar, porque, en vez de emplear un fluido para el transporte de energía desde el colector a la cámara de secado, usa una barra sólida de acero de una pulgada de diámetro.

El dispositivo consiste de tres partes:

1. Colector solar. Es un espejo parabólico construido en fibra de vidrio, de 1.2 metros de diámetro, en cuya superficie emplea una película reflejante base aluminio.
2. Una barra sólida de acero que transporta la energía del colector a la cámara de secado.
3. La cámara de secado es un colector pasivo tipo invernadero, con doble pared, tiene un volumen de  $171\,750\text{ cm}^3$ . Fué fabricado con una estructura de perfil cuadrado de

una pulgada de lado, soldada a tope, las paredes están remachadas. Cuenta con: puerta, ventana, lamina conductora, charola, dos válvulas y cuatro ruedas.

El prototipo funciona de la siguiente forma, el colector se enfoca para que el haz de luz solar concentrada incida en un extremo de la barra sólida de acero, en la barra se genera una diferencia de temperatura, pues, en el otro extremo tiene una lámina delgada de acero galvanizado sobre sí, que calienta el aire de la cámara de secado, al calentar el aire naturalmente aumenta su capacidad para contener humedad, y por la diferencia de las presiones parciales de vapor de agua en el pasto y su entorno, se lleva a cabo el secado del pasto, este volumen de aire se sustituye cada 8 minutos por aire fresco y con baja humedad, con esto, se mantiene la diferencia de temperatura.

Por otra parte la cámara de secado cuenta con una doble pared lo que le permite un cierto grado de aislamiento térmico con lo que se evitan pérdidas de calor. El enfoque del paraboloide se realiza de manera manual.

Este trabajo proporciona las bases para futuros desarrollos, bajo una nueva concepción de dispositivos desarrollados con tecnología solar.

En el Capítulo I se describe la construcción del dispositivo, donde empleamos como una guía a la Metodología de Diseño del Producto; incluye las pruebas y el refinamiento del concepto, selección de materiales; además del cálculo del campo de temperaturas

Es muy importante conocer el campo de temperaturas del interior de la cámara de secado porque al conocerlo, es posible mejorar el diseño de la cámara de secado del prototipo; para este fin se usa el método del elemento finito, por ser una técnica de interpolación adecuada para sentar las bases de futuros desarrollos en la materia.

El Capítulo II presenta los resultados experimentales y su discusión; incluye: la descripción del experimento, el cálculo teórico del campo de temperatura y la comparación de ambos.

Finalmente se presentan las conclusiones de este trabajo, se enumeran los logros más importantes: diseño y construcción de un prototipo de secador solar para el Pasto Poa Pratensis L., que es capaz de secar 100 g de pasto en 40 minutos, y la determinación del campo de temperaturas de la cámara de secado.

El trabajo tiene 7 apéndices, en el primero describimos la Metodología del Diseño, el segundo los fundamentos de la Tecnología Solar. En el tercero presentamos la teoría del transporte de calor, la deducción de la ecuación de calor que aplicamos a nuestro problema, así como, su solución por medio de la técnica conocida como elemento finito, el cuarto contiene los planos de fabricación del dispositivo, el quinto proporciona un glosario de términos empleados en la tesis, el sexto informa sobre la taxonomía del pasto en estudio y el último tiene una tabla de humedad.

# Capítulo I      Construcción del prototipo.

En el presente Capítulo presentamos los resultados de: la aplicación del Proceso de Diseño para la creación de un dispositivo solar y la selección de materiales; tanto para el dispositivo original, como, su adecuación. También mostramos la descripción de: primeras pruebas, propuestas técnicas a los inconvenientes descubiertos, los cambios al prototipo original y el campo de temperaturas del dispositivo.

El Proceso de Diseño es una metodología para el diseño, construcción y lanzamiento al mercado de un bien físico, consiste de 12 pasos; en el presente trabajo se adapta para nuestros fines, hasta el paso número ocho. Su descripción y empleo lo presentamos en el apéndice uno. Seguimos la metodología para la selección de materiales desarrollada por F. M. Ashby (16).

Como se menciono antes, la adaptación del Proceso de Diseño a nuestro problema dio como fruto un dispositivo, que al ser probado para cantidades de pasto inferiores a 50 g funcionó bien; pero cuando se elevó a 100 g. El resultado no fue satisfactorio; por lo tanto, se identificaron 5 problemas y presentamos propuestas técnicas para superar los inconvenientes. Una vez implementadas las propuestas se procedió a plantear el problema de la conducción de calor dentro de la cámara de secado del dispositivo.

Debido a la geometría y condiciones a la frontera resultó un modelo bidimensional en estado estable, el cual fué resuelto por medio de la técnica de interpolación llamada elemento finito, ésta técnica es muy adecuada para sentar las bases de futuros desarrollos en esta área. La solución nos dio a conocer el campo de temperaturas dentro de la cámara de secado del dispositivo solar.

## 1.1 Especificaciones.

Nuestro objetivo es construir un secador solar capaz de secar 100 gramos de pasto por hora, para lograr esto requerimos de un volumen de  $171\ 750\text{ cm}^3$  de aire, este aire lo requerimos para realizar el proceso de secado.

A continuación se describen las especificaciones técnicas del prototipo secador solar de pasto, motivo de nuestro estudio. Esto es:

a) Diseño.

1. Volumen:  $171\,750\text{ cm}^3$ .
2. Visibilidad para observar el proceso.
3. Maximizar la absorción de radiación solar.
4. Evitar fugas térmicas.

b) Ergonomía

1. Que sea móvil.
2. Facilidad para el manejo del pasto.

De acuerdo con estas especificaciones la geometría que cumple con éstas, es la presentada en la figura 1.1. En función al volumen requerido para poder llevar a cabo el proceso de secado, ( $171\,750\text{ cm}^3$ ) las dimensiones serán:  $75\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 43.3\text{ cm}$ .

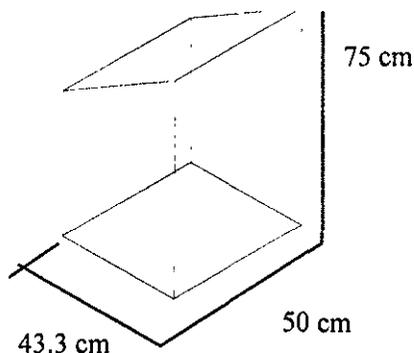


Figura 1.1 Vista isométrica de la cámara de secado.

Para maximizar el área de observación del proceso de secado la ventana deberá tener un área de 2500 cm<sup>2</sup>, por lo tanto su tamaño será de 50 cm X 50 cm. Es necesario mejorar la captación de los rayos solares por un lado y a la vez evitar reflejos solares durante su observación, por consiguiente, la ventana deberá tener un ángulo de 30 ° respecto a la horizontal.

La charola para contener el pasto será de las siguientes dimensiones: 47.8 cm x 34.8 cm, el manejo del pasto requiere de una puerta frontal cuyas dimensiones deberán ser: 50 cm x 44.8 cm, además, como necesitamos que sea versátil el prototipo, contará con cuatro ruedas de giro completo.

Deberá contar con doble pared, para evitar fugas térmicas. Además, para poder absorber la mayor cantidad de radiación solar, deberá ser pintado de color negro.

## **1.2 Construcción del dispositivo.**

Para la construcción del secador solar se requirió de la selección de materiales que cumplieran con siguientes criterios:

1) Para la estructura:

- a) Relación alta entre el peso y la rigidez.
- b) Facilidad de unión por más de un medio.
- c) Baja conductividad térmica.
- d) Facilidad de compra en el mercado nacional.
- e) Resistente a la corrosión.
- f) Bajo coeficiente de dilatación.
- g) Menor precio posible.

2) Paredes:

- a) Alta formabilidad.
- b) Baja conductividad térmica.
- c) Facilidad de unión por más de un medio físico.
- d) Resistente a la corrosión.

- e) Bajo coeficiente de dilatación.
- f) Menor precio posible.

3) Superficie de control:

- a) Transparente.
- b) Resistente a la corrosión.
- c) Bajo coeficiente de dilatación.
- d) Facilidad de corte.
- f) Menor precio posible.

Los materiales seleccionados en función de las características antes mencionadas se observan en la tabla siguiente:

Función	Material
Estructura	Perfil cuadrado de 1 pulgada y 1/16 espesor
Pared	Lámina galvanizada de 0.6 mm espesor
Superficie de control	Vidrio plano transparente

Tabla 1.1. Material seleccionado.

La estructura del secador fue soldada a tope con un equipo de soldadura de arco eléctrico, empleando soldadura código 6013 y se usaron las dimensiones que se muestran en el apéndice D. Las paredes se acoplaron con remache "pop", se colocaron 4 ruedas y una puerta.

El diseño de concepto del prototipo de secador solar es diferente a los secadores comerciales, ambos equipos operan bajo el mismo principio termodinámico, pero la forma en conseguirlo es diferente.

### 1.3 Pruebas y refinamiento.

Se realizaron algunas pruebas para poder evaluar su funcionamiento; los experimentos se dividieron en dos partes: la primera consistió en evaluar la capacidad de concentración de energía, el experimento consistió en colocar el prototipo de secador solar orientado este-oeste, con dos termómetros de mercurio, uno adentro del prototipo y otro afuera en sombra; se midió la temperatura a diferentes horas del día, las lecturas obtenidas se realizaron el 14 de abril de 1997, con cielo despejado, realizadas en el municipio de Chimalhuacan Estado de México, (cerca del D.F.) los resultados se presentan en la Tabla 1.2.

La segunda parte se realizó el día siguiente, que fué un día despejado, el experimento consistió en: colocar el prototipo orientado este-oeste, pesar 10, 20, 30 y 100 gramos de pasto *Poa Pratensis* L. y colocar cada porción en el prototipo durante 40 minutos, tiempo en que se alcanza el equilibrio meta-estable, durante este tiempo en el interior del prototipo se llevaba acabo el proceso de deshidratación del pasto, se inició a las 11.00 horas para la primera pesada, las muestras posteriores se iniciaban cada hora, pues se requerían de 40 minutos de estancia en el secador y posteriormente se invertía de tiempo en pesar de nuevo y limpiar el prototipo, cada pesada se iniciaba a la hora siguiente, para determinar el porcentaje de humedad, se uso la ecuación [B.14], que se puede consultar en el apéndice B. Con esto, se evaluó la eficiencia del prototipo. Los resultados los presentamos en la Tabla 1.3.

Hora	Temperatura ambiente	Temperatura prototipo
11:22 hrs.	22°C	22°C
12:40 hrs.	25°C	44°C
15:00 hrs.	26°C	48°C
16:00 hrs.	26°C	45°C
18:00 hrs	20°C	40°C

Tabla 1.2 Resultados de la primera evaluación del prototipo de secador solar de forraje.

Estos resultados fueron obtenidos una vez alcanzado el equilibrio meta-estable, tiempo de 40 minutos por prueba, con cielo despejado.

Peso pasto Húmedo en Gramos	Pasto seco en gramos	% de Humedad	Condición
10	1.4	12.28%	Adecuada
20	2.9	12.66%	Adecuada
30	4.3	12.53	Adecuada
100	37.6	27.32%	No adecuada

Tabla 1.3 Resultados de la segunda evaluación del prototipo.

Por los resultados del segundo experimento, el deshidratador solar presentó inconvenientes al aumentar la cantidad de pasto a secar debido a los factores siguientes:

1. Efecto de masa. Hay más cantidad de agua que se debe evaporar con la misma cantidad de energía.
2. Deshidratación irregular. Debido a que el flujo de calor no se distribuye de manera uniforme dentro de la masa de pasto.
3. Con tiempos de exposición al sol superior a los 35 minutos dentro del secador se llega a un punto de saturación, que se condensa en la parte superior del deshidratador y empieza a precipitar dentro del deshidratador.
4. A tiempos muy grandes se hace poco atractivo este proceso por tender a no ser rentable.
5. Al aumentar la temperatura del deshidratador cercana a los 50 °C se empiezan a notar fugas térmicas.

Estos problemas en conjunto dan como resultado un producto con una humedad de 27.32%, un pasto con esta humedad es susceptible de ataque biológico, (hongos y

bacterias) puesto que el nivel de humedad todavía es adecuado para el desarrollo y crecimiento de ellos, por tanto, no se puede conservar este pasto como alimento para su consumo posterior.

#### 1.4 Propuestas técnicas.

En la mayoría de los sistemas de ingeniería donde se involucre fenómenos de transporte de masa y energía, la velocidad del proceso está determinada por la etapa más lenta y ésta será la velocidad límite. Sin embargo, si dividimos el proceso en etapas, podríamos optimizar la velocidad de cada etapa, al aumentar la velocidad en cada paso nos quedará la velocidad de la etapa más lenta, como la velocidad límite del proceso total de deshidratación.

Para nuestro caso la velocidad de deshidratación del forraje, es la más lenta la cuál no se puede modificar, pues si se hace, se alteran las propiedades bromatológicas del forraje obteniendo un producto de poca calidad nutricional.

Las etapas del proceso son las siguientes:

1. Concentrar la luz solar y transformarla en calor.
2. Transportar la energía calorífica.
3. Transformar la energía calorífica en aire caliente.
4. Secar el pasto.

Resumimos el proceso en la figura 1.2.

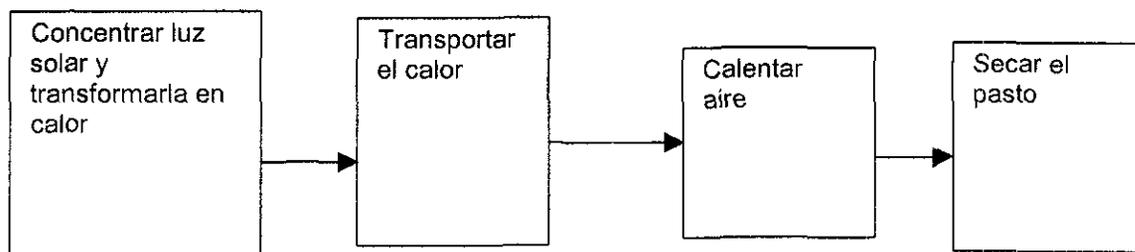


Figura 1.2 Proceso de secado de pasto.

Por lo tanto se plantea una adecuación al diseño original del prototipo, que va a consistir de lo siguiente:

1. Acoplar un concentrador solar para convertir luz solar en energía térmica y transmitirla al secador.
2. Construir un sistema para disipar el calor uniformemente dentro del secador solar.
3. Acoplar un sistema de válvulas para el control de ciclos de secado.
4. Construir un conjunto de charolas intercambiables para que pueda entrar en los ciclos de secado.
5. Aislar térmicamente el secador solar.

Estas propuestas técnicas son la solución a los 5 problemas anteriormente caracterizados.

### **1.5 Selección del concentrador.**

Al tener la necesidad de acoplar al secador solar un concentrador de energía solar para aumentar su eficiencia, se discutieron varias propuestas las cuales se presentan a continuación:

- a) diseñar un colector plano;
- b) dos espejos en V;
- c) concentradores compuestos estacionarios;
- d) parabolóide de revolución de absorbedor móvil;
- e) espejos Fresnel;
- f) concentrador cilíndrico parabólico (2).

La elección fue construir un concentrador parabolóide de revolución por que tiene las siguientes ventajas:

1. La cantidad de energía colectada sobre la superficie de absorción por unidad de área se aumenta, con lo cuál se pueden alcanzar temperaturas mayores.
2. Se reducen las pérdidas de calor al utilizar un absorbedor de menor área.

3. Se incrementa la productividad en los criterios de tiempo, calidad y costo.

Este diseño también presenta las desventajas siguientes:

1. El dispositivo trabaja sólo con la componente directa de la radiación solar. La componente directa son los rayos directos que provienen del Sol, no aquellos que por tener un ángulo distinto a los primeros se difunden en la atmósfera, perdiendo intensidad.
2. La calidad óptica de la superficie reflectora requiere de mantenimiento y protección contra la intemperie.
3. Se requiere de un mecanismo de seguimiento del sol para mantener en foco al absorbedor. Es decir, un mecanismo para que el reflejo del parabolóide sea sobre la superficie de barra absorbedora, para calentar a ésta.

La elección se basó en el rango de temperaturas deseadas para nuestro propósito, que es convertir la energía solar en calor para después poderlo transferir al secador.

El objetivo principal de los concentradores parabólicos, es que exista un buen enfoque sobre el tubo conductor que se encuentra en el foco del parabolóide, se espera alcanzar concentraciones de entre 15 a 50 veces más con respecto a la energía que capta una superficie de igual área y temperaturas de trabajo entre 100 y 200°C.

### **1.6 Selección de materiales.**

Los materiales requeridos para la construcción del protipo completo se basaron en varios criterios los cuales se presentan a continuación:

1) Selección de materiales para la barra conductora, esta barra deberá satisfacer estos criterios:

- a) Alta conductividad térmica;
- b) bajo coeficiente de dilatación;

c) menor costo;

Para este caso, la selección fue una barra redonda de una pulgada de acero calidad ASTM 1018.

2) Concentrador.

a) superficie especular con la mayor reflejancia posible;

b) la mayor rigidez posible con el menor peso;

c) alta formabilidad;

d) resistente a la corrosión;

f) menor costo posible.

En este caso se seleccionó resina epóxica reforzada con fibra de vidrio como estructura del parabolóide el cuál se recubrió de una película especular de aluminio fabricada por la compañía 3M cuya reflejancia es de 86%.

### 1.7 Construcción del secador solar completo.

A la estructura del secador se le adecuó la doble pared para poder usar una capa de aire estacionario como aislante térmico del secador, además de dos válvulas de control de una pulgada para el control del flujo de aire dentro de la cámara de secado.

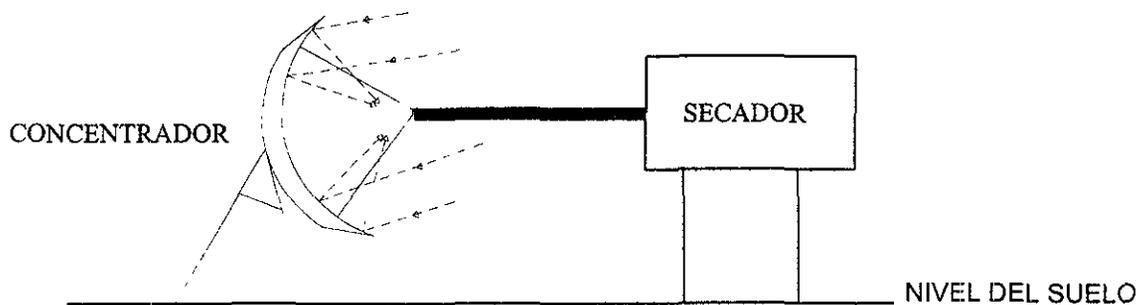
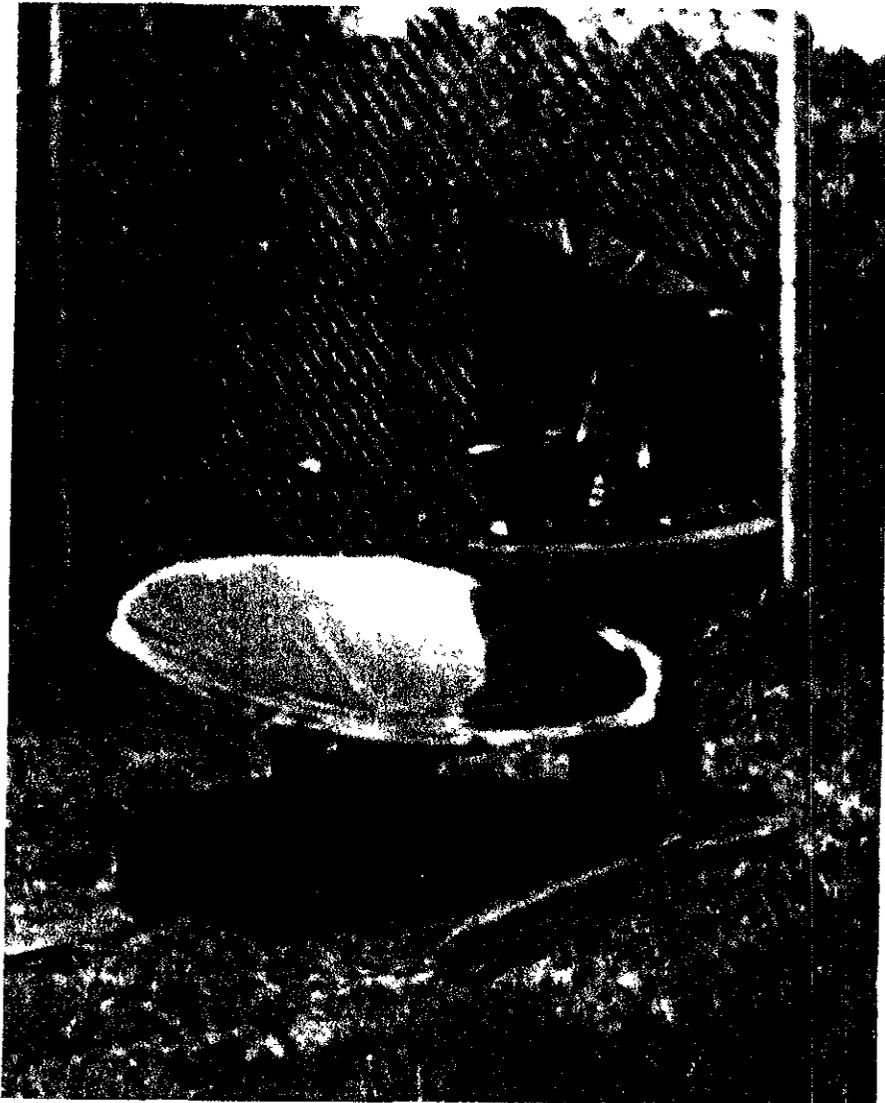


Figura 1. 3. Esquema del concentrador.

El secador es un concentrador solar tipo parabolóide que concentra en una pequeña área los rayos solares que capta. En el foco de esta parábola se colocó una barra que por radiación solar se calienta. Este calor es transmitido al secador donde se encuentra una lámina de 0.6 mm de espesor, que se calienta por conducción y a su vez la lámina calienta al aire. El aire caliente modifica el equilibrio de las presiones parciales de vapor de agua a las temperaturas del material y del aire lo cual seca el pasto de la charola; el ciclo de secado se controlará por medio de las dos válvulas que tiene el secador, una en la parte inferior y otra en la parte superior como se aprecia en la fotografía 1.1.



Fotografía 1.1.

## 1.8. Cálculo del campo de temperaturas.

Se resuelve el caso estable del problema térmico, no se considera la fuente de calor, debido a que, cuando ocurre el cambio de fase, de líquido a vapor de agua; la temperatura no aumenta en la región donde se encuentra el pasto; por que, alcanza un equilibrio meta-estable en ese momento, es conveniente conocer el campo de temperaturas de la cámara de secado.

En el prototipo la cámara de secado está limitada en la parte de inferior por una placa conductora de calor, que recibe a éste de la barra conductora. En el extremo opuesto de la barra, donde se localiza el foco del concentrador, la placa se calienta homogéneamente hasta los 55°C. Las cuatro paredes de la cámara están aisladas y se mantienen a 40 °C. El límite superior de la cámara lo marca la charola donde se encuentra el pasto a 52 °C. Las temperaturas expresadas con anterioridad constituyen las condiciones a la frontera de nuestro problema. Por ser un sistema meta-estable, se toma un corte de la cámara de secado teniendo un sistema bidimensional. Ver figura 1.4.

Por la naturaleza del problema podemos simplificarlo a un problema bidimensional, por lo tanto, nuestro problema se reduce a encontrar el campo de temperaturas de la figura 1.5.

Nuestro problema térmico bidimensional, en estado estable lo podemos expresar como sigue:

$$\text{div}(k\text{grad}T)=0 \quad [1]$$

Y lo resolvemos para poder determinar el campo de temperaturas en la cámara de secado del secador solar.

En apéndice C, resolveremos la ecuación [1] utilizando el método del elemento finito como una técnica de interpolación, los modelos variacionales serán construidos, así también, los modelos de aproximación y matricial, el dominio de nuestro problema será un rectángulo que representa un corte del interior del secador solar. Ver figura

1.4 y la fotografía 1.2 .

Empleamos el software MODULEFF para la solución numérica del problema [1].

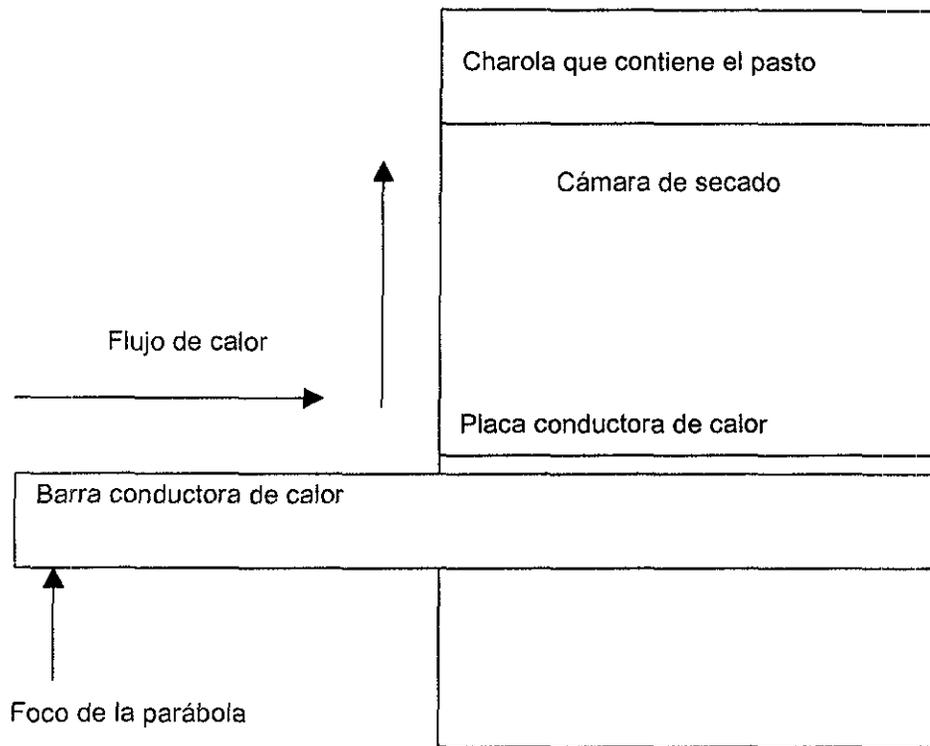
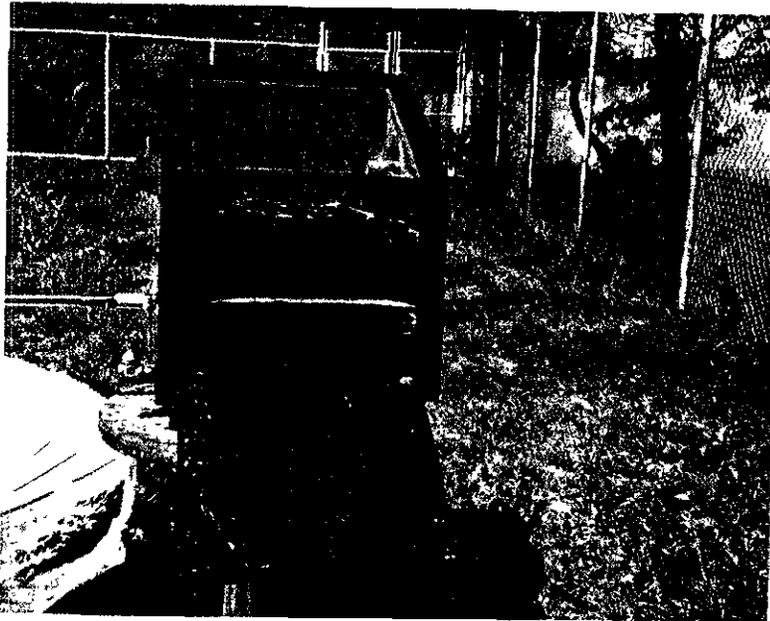


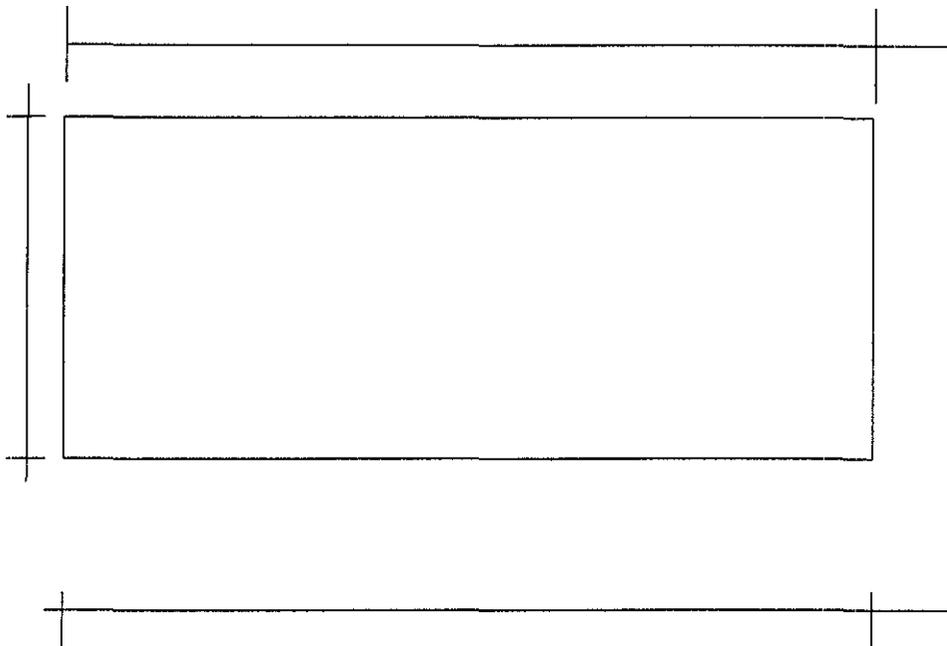
Figura 1.4 Cámara de secado del prototipo



Fotografía 1.2

55 cm , temperatura 52°C

20 cm  
Temp.  
40°C



55 cm Temperatura. 55°C.

Figura 1.5. Parte seccionada de la cámara de secado.

## **Capítulo II      Resultados y discusión.**

En este capítulo se describen los experimentos realizados en el secador solar comparando los resultados teóricos con los experimentales, además se presenta una discusión de los mismos.

### **2.1 Descripción del experimento.**

Una vez construido el equipo completo, se procedió a probarlo, entre el 14 de octubre y el 11 de diciembre de 1998.

Procedimiento de prueba:

Se seleccionó un día claro, a las 10.00 hrs, se buscó que el foco del concentrador, coincidiría con un extremo de la barra conductora de calor; buscando que en esa región aumentará la temperatura (120-145 °C) creando en la barra una diferencia de temperatura, la cual, favoreció el flujo de calor a través de la barra hacia la cámara de secado. Cada hora se ajustó el concentrador para mantener en foco a un extremo de la barra, y el otro en contacto térmico dentro de la cámara de secado con la lámina conductora.

Se pesó 100 gramos de pasto y fué introducido a la cámara de secado, al cerrar la puerta, el conteo de tiempo inició; cada 8 minutos se abría las válvulas para dejar salir el aire saturado, a los 40 minutos el pasto se había secado.

### **2.2 Resultados experimentales.**

Considerando como origen de un plano cartesiano a la esquina inferior izquierda del rectángulo en estudio. Los puntos en los que se midió la temperatura corresponden a las coordenadas que se marcan en la Tabla 2.1.

Coordenadas	Temperatura medida en ° C	Temperatura calculada en °C	% Error
(5,0)	55	54.922	0.14
(5,4)	52.4	52.062	0.64
(5,8)	51.3	50.511	1.54
(5,12)	49.7	49.045	1.32
(5,16)	50.7	50.281	0.83
(5,20)	52	51.68	0.62

Tabla 2.1. Comparación de los valores experimentales con los valores teóricos.

### 2.3 Resultados teóricos.

La cámara de secado esta formada por un rectángulo limitado en la parte inferior por una lámina de 0.6 mm de espesor, donde se alcanza una temperatura de 55 °C y las paredes de 40 °C. El perfil de temperatura en esté momento, cuando alcanza el equilibrio meta-estable es evaluado por el programa MODULEF y los resultados son presentados en la figura 2.1.

### 2.4 Análisis de Resultados.

El porcentaje de error que encontramos, por ser muy pequeño nos conduce a sostener, que coincide un conjunto de puntos discretos del campo de temperaturas medido, con el calculado. Es posible que las lecturas demasiado alejadas del cálculo teórico sean debido a errores involuntarios de índole experimental, a los cuales siempre estaremos expuestos.

El estado inicial del secador esta definido en equilibrio termodinámico con respecto a sus alrededores, y las variables involucradas así como su valor se muestran en la Tabla 2.2.

# Fortran 3D Modulef

MODULEF : stancie

17/02/99

rept@mail

rept@mail

rept@mail

26 POINTS  
 26 NODES  
 25 ELEMENTS  
 25 QUADRANGLES

INCONJUE : 1 MEMO VN

—	55.00	55.00
—	53.64	
—	52.66	
—	51.68	
—	50.70	
—	49.72	
—	48.74	
—	47.76	
—	46.78	
—	45.80	
—	44.82	
—	43.84	
—	42.86	
—	41.88	
—	40.90	
—	40.00	

200 NODALES

CONTINUE : 1  
 VUE SUIVANTE : 2  
 VUE PRECEDENTE : 2  
 RAFFRAICHIR : 4  
 ZOOM : 5 M  
 ZOOM : 6  
 VALEUR : 7 SFZA2 W  
 COPY SOFTWARE : 8 9

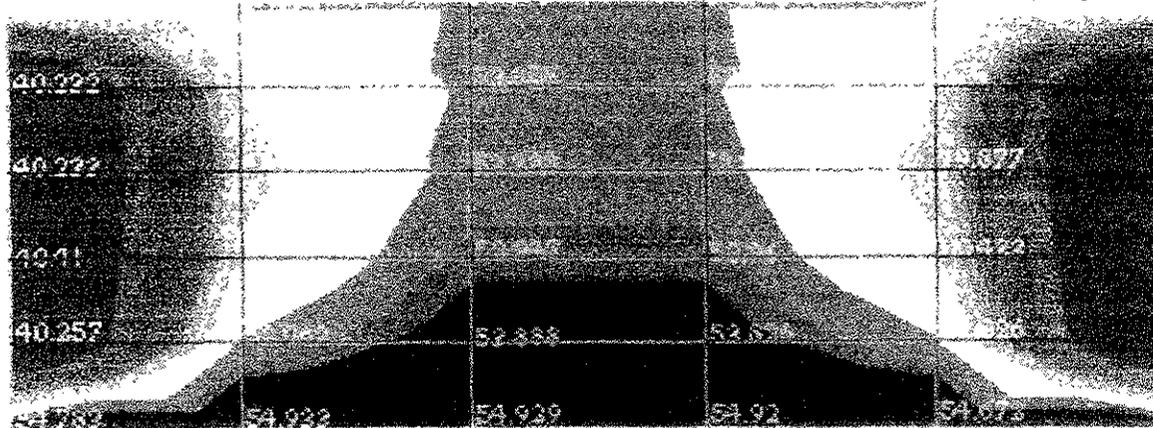


Figura 2.1. Perfil de temperaturas obtenido por el programa MODULEF.

Condiciones iniciales	Medición
Temperatura	19°C
Presión	855 mm de Hg
Humedad relativa	40%
Volumen de aire	0.162375 m <sup>3</sup>
Densidad del aire	1.1614 kg/m <sup>3</sup>
Masa de aire	0.1886 Kg

Tabla 2.2. Estado inicial.

Inicialmente en la cámara la cantidad de vapor de agua que tiene el aire dentro de la cámara de secado es de  $2.03 \times 10^{-3}$  Kg. de vapor de agua, por que el aire a temperatura ambiente cuenta con humedad de manera natural, este valor es por calculado en función del peso del aire y tablas de humedad, también conocidas como tablas psicométricas (Ver apéndice H). Durante el secado se abre la cámara de secado para evacuar el aire saturado de vapor de agua cada ocho minutos, en total se extrae el aire saturado 5 veces.

Después de 40 minutos, una vez alcanzado el equilibrio meta-estable las variables cambian, a estas variables con los nuevos valores les llamaremos condiciones finales, las cuales presentamos en la Tabla 2.3.

Condiciones finales	Medición
Temperatura	52°C
Volumen	0.1886 m <sup>3</sup>
Humedad relativa	100%
Masa del aire	0.1886 Kg.
Humedad del pasto	12.87%

Tabla 2.3 Estado final.

**El principio en que se basa los secadores solares es coleccionar energía y calentar aire de una cámara donde se moverá el equilibrio de la humedad, en el sistema cámara de aire-pasto, donde se debe controlar las siguientes variables:**

- Diferencias de presiones parciales de vapor de agua, en el aire y en el pasto.
- Radiación solar absorbida.
- Transferencia de calor por conducción.
- Temperatura ambiente.
- Pérdida de calor del concentrador.

El volumen de la cámara de secado es de  $0.17715 \text{ m}^3$  que es la cantidad de aire que se calentará y absorberá la humedad del pasto, porque el aire caliente tiene la propiedad de contener mayor cantidad de vapor de agua. En el equilibrio la cantidad de vapor de agua que tiene el aire saturado, está calculada según tablas de vapor y masa del aire en  $0.1546 \text{ Kg.}$  de agua, si a esto le restamos la humedad inicial tenemos  $0.0134 \text{ Kg.}$  de vapor de agua, que se evacua por cada ciclo, como son 5 ciclos, el total de vapor de agua extraído del pasto será de  $0.067 \text{ Kg.}$  de vapor de agua. Este vapor de agua que originalmente estaba en el pasto ahora está en el aire, en consecuencia el pasto fué secado.

### **3. Conclusiones.**

Los objetivos planteados al inicio de este trabajo fueron satisfechos:

1. Se diseñó y construyó un prototipo de secador solar para el pasto *Poa Pratensis* L. que es capaz de secar 100 gramos en 40 minutos.
2. El equipo puede disminuir la humedad de 70-80 % inicialmente a 12.87%, con esta humedad el pasto se puede conservar por un año (1),(3),(4), utilizando sólo energía solar, empleando una barra sólida para la conducción del calor.
3. Obtenemos el campo de temperaturas de la cámara de secado, útil para desarrollos posteriores.
4. Para optimizar el trabajo realizado por el secador solar en lo sucesivo se deberán adecuarse charolas que contengan el pasto, que estén ubicadas en el centro de la cámara de secado, por que es la zona donde la temperatura es mayor.

Se debe tener cuidado en los siguientes factores para poder optimizar futuros desarrollos:

1. Minimización de las pérdidas de calor para conservar la energía.
2. La situación geográfica.
3. La demanda de calor en función de la cantidad de pasto a deshidratar.
4. Los materiales de construcción de la cámara de secado deberán ser aislantes térmicos.
5. Las superficies absorbedoras de calor deberán ser recubiertas por una capa de cromo negro.
6. La eficiencia del concentrador.

## **4-A. Apéndice.**

En el presente apéndice se inicia con una descripción de la metodología del proceso de diseño de un producto, continuamos revisando de las alternativas actuales para la conservación de forrajes, tomando como guía el proceso de diseño que se adaptó para nuestros fines, y así, desarrollamos los primeros 6 puntos de este proceso. Se inicia con una entrevista a un experto en nutrición ganadera, Dr. Lucas Melgarejo, de aquí identificamos las necesidades del consumidor para el secado de pasto, analizamos los productos comerciales existentes en el mercado, designamos las especificaciones de diseño de deshidratador solar, generamos los conceptos pertinentes de Ingeniería Solar, seleccionando uno.

### **A.1.1. Proceso de Diseño.**

El proceso de diseño es la metodología que permite partir de una necesidad no satisfecha, para crear un bien físico que pueda dar solución a un problema específico. En general esta metodología consiste en los siguientes pasos:

1. Identificar la necesidad del consumidor.
2. Analizar los productos de la competencia.
3. Establecer una lista de especificaciones.
4. Generación de conceptos.
5. Selección de un concepto.
6. Redefinir especificaciones (Ing. Industrial y diseño para la manufactura, modelación matemática).
7. Construcción del prototipo.
8. Prueba y refinamiento.
9. Análisis económico.
10. Planeación del proyecto.
11. Implementación del proyecto.
12. Lanzamiento al mercado del nuevo producto (5).

El diseño de un producto es una actividad multidisciplinaria y dinámica, que requiere de la participación de equipos de trabajo de varias disciplinas tales como: Mercadotecnia,

Finanzas, Leyes, Ingeniería y Administración. El dinamismo de esta actividad se caracteriza porque los gustos y las necesidades de los consumidores cambian en función del tiempo.

La habilidad que tenga una firma de manufactura para encontrar las necesidades del consumidor y satisfacerla en el menor tiempo posible con productos de bajo costo y alta calidad, es la diferencia entre la supervivencia o su colapso financiero.

A continuación describiremos brevemente cada uno de los pasos del proceso del diseño (5).

**1. Identificación de las necesidades del consumidor.** La meta de esta actividad es entender la necesidad del consumidor y comunicarla efectivamente al equipo de desarrollo. La filosofía detrás de esta metodología es obtener información de alta calidad por medio de un canal de comunicación que vaya directamente de los consumidores a los desarrolladores del producto.

La identificación de necesidades es en sí mismo un proceso, que consta de seis pasos, estos son:

- Definir el alcance de la información en forma general.
- Obtener información directamente de los consumidores o del personal técnico que éste en contacto directo con los consumidores.
- Interpretar los datos desde el punto de vista de las necesidades de los consumidores.
- Organizar las necesidades por jerarquías.
- Establecer la importancia relativa de las necesidades.
- Emitir un informe.
- El reporte de esta actividad consiste en una lista de deseos del consumidor jerarquizados.

**2. Analizar productos de la competencia.** Un entendimiento de los productos de la competencia es crítico para poder posicionar el nuevo producto, además de ser una fuente de ideas para el producto y para el proceso de diseño. El análisis de productos competitivos es también llamado "Benchmarking", es realizado para apoyar las etapas de especificaciones, generación de conceptos y selección de concepto.

**3. Establecer una lista de especificaciones.** Las necesidades de los consumidores son expresadas generalmente en el lenguaje del consumidor, siendo típicamente

calificaciones subjetivas, tales expresiones son un apoyo para conocer las áreas de interés de los consumidores dándonos una guía de como diseñar y construir el equipo. El reporte de esta etapa es una descripción específica de las cosas que tiene que hacer el producto, en otras palabras es la transcripción de las necesidades en términos técnicos.

**4. Generación de concepto.** La meta de esta actividad consiste en explorar a través de todas las alternativas posibles, aquellas que logren adecuarse mejor a las necesidades de los consumidores. Esta actividad consiste de 5 etapas:

i) Clarificación del problema.

- Entendimiento.
- Descomposición del problema en subproblemas.
- Atención a subproblemas críticos.

ii) Búsqueda externa.

- Con usuarios.
- Búsqueda bibliográfica.
- Comparación de productos existentes.

iii) Búsqueda interna.

- Buscar los principios generales en los que se basan los diseños de concepto.

iv) Exploración sistemática.

- Árbol de decisión.

v) Lista de conceptos.

El concepto de un producto es la descripción general de los principios por los cuales trabaja, así como su forma. También es una descripción resumida de cómo el producto podrá satisfacer la necesidad de los consumidores. La generación de conceptos es un proceso que empieza con el conjunto de especificaciones y el informe es un conjunto de conceptos de los cuales se seleccionará uno.

**5. Selección de un concepto.** En esta actividad todos los conceptos generados en el punto anterior son analizados y se elige uno. La selección de un concepto es el proceso por el cual se evalúan los conceptos generados en el punto anterior, con respecto a las

necesidades del consumidor y otros criterios, comparando relativamente los puntos fuertes y los débiles de los conceptos. Existen varios métodos para la selección de conceptos a continuación se presentan algunos de ellos:

- **Decisión externa.** Los conceptos se muestran a los consumidores potenciales los cuales seleccionan uno según su preferencia.
- **Producto campeón.** Un miembro influyente del equipo de desarrollo tiene la función de elegir un concepto de acuerdo a su preferencia personal.

**Intuición.** El concepto es seleccionado por la intuición del equipo de desarrollo.

- **Por "pros" y "contras".** Se construyen todos los prototipos y se realizan pruebas a cada uno de ellos, con base en los resultados de cada prueba se realiza la selección.
- **Decisión por matrices.** Se elabora una matriz, donde se representan varios criterios de selección contra los conceptos. Cada concepto es sometido a los criterios de selección.

**6. Refinamiento de especificaciones.** En esta actividad, una vez elegido un concepto, a éste, se le refinan las especificaciones con la ayuda de las siguientes disciplinas: todas las Ingenierías que intervengan, en especial Industrial; además de Diseño para la Manufactura y modelación matemática.

**7. Construcción del prototipo.** Se construye un prototipo.

**8. Prueba y refinamiento.** Se prueba el prototipo, a partir de los datos del comportamiento del prototipo se refinan las especificaciones.

**9. Análisis económico.** Se construye un análisis financiero y un modelo económico para el nuevo producto y se decide continuar o suspender el proyecto.

**10. Planeación del proyecto.** Se planifica un proyecto de producción.

**11. Implementación del proyecto.** En la planta de manufactura se implementa el proyecto, aquí intervienen fundamentalmente las Ingenierías de Manufactura e Industrial.

**12. Lanzamiento al mercado del nuevo producto.** Comercialización del nuevo producto, fundamentalmente, esta actividad es de mercadotecnia y publicidad.

Para el caso del secador de pasto "Poa Pratensis L." motivo de nuestro estudio, se siguió como guía esta metodología cubriéndose sólo hasta el paso número ocho, pues las demás actividades quedaron fuera del alcance de este trabajo.

### **A.1.2 Alternativas actuales para la conservación de forrajes.**

Existen tres métodos para conservar los forrajes cosechados en primavera para ser consumidos por el ganado en verano, otoño e invierno. Estos métodos son: henificación, ensilado y deshidratación que a continuación se describen:

La henificación consiste en:

1. corte de las hierbas y cereales;
2. una etapa de deshidratación a sol usando grandes extensiones de tierra;
3. formación de pacas;
4. Almacenamiento de las pacas para evitar su fermentación (3).

El ensilado consiste en:

1. corte de las hierbas y cereales;
2. almacenamiento en una instalación semi-hermética, donde pueden evacuarse los líquidos generados por la fermentación del forraje;
3. control de la fermentación del forraje;

La deshidratación consiste en:

1. corte de las hierbas;
2. deshidratar las hierbas por medios artificiales y después almacenarlas en silos semi-herméticos o herméticos.

En este caso los dos primeros métodos son los más comunes debido a factores económicos, pues la inversión inicial y los gastos operativos hacen a la deshidratación convencional sólo viable en grandes explotaciones, esto es porque pueden manejar economías de escala (2).

Por otro lado, entre los tres métodos mencionados anteriormente existen ventajas y desventajas las cuales son mostradas en la Tabla A.1.1.

Método	Ventajas	Desventajas
Henificación.	Simple. Barato. No requiere infraestructura costos ni mantenimiento. No causa trastornos digestivos.	Sólo para unas cuantas especies de hierbas. La calidad del producto depende del clima. Durante el proceso existe una pérdida de nutrientes del 25 al 30 %. Puede sufrir daños por insectos o roedores. Puede contaminarse por polvo o partículas extrañas. El proceso es lento. De trabajo intensivo.
Ensilado.	De fácil implementación.	Pérdida de valor nutritivo. Requiere de trituradora e instalaciones especiales.
Deshidratación convencional.	Conserva el valor nutritivo.	Instalaciones costosas. Altos costos de operación.

Tabla A.1.1 Comparación de las ventajas y desventajas de los métodos para la conservación de forrajes (1), (2), (3), (4).

### A.1.3 Identificación de necesidades.

En el paso uno se realizó una entrevista con el Dr. Lucas Melgarejo, catedrático la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia quién nos proporcionó todos los datos requeridos para el secador solar. Se resume esta información en las Tablas A.1.2, A.1.3 y A.1.4.

Uso	Ganado lechero y de engorda.
Usuarios principales.	Ganaderos pequeños medianos y grandes.
Usuarios secundarios.	Con adaptaciones para secar otros productos agropecuarios.
Productos competidores.	Deshidratadores comerciales que funcionan basándose en gas-diesel, gas y eléctricos.
Necesidades que debe cubrir.	Deshidratar todo tipo de pasturas. Ser barato. De fácil instalación. Versátil (4).

Tabla A.1.2 Misión del secador.

Guía	Opinión del consumidor	Necesidad de uso	Necesidad técnica
¿Que? ¿cómo?.	¿Cómo almacenar alimento para ganado?	Se requiere conservar alimento para ganado.	Equipo para conservar alimento para ganado.
Específico	¿Cómo evitar los altos costos de operación?	Usar fuentes de energía no tradicional.	Desarrollo de tecnología solar.
Positivo negativo.	Deseo evitar la contratación de personal calificado.	Equipo de fácil operación.	Evitar: controles complicados y equipo electrónico sofisticado.
Atribución del producto	Que no sea fijo.	Equipo con capacidad de movimiento.	Que cuente con ruedas.

Tabla A.1.3. Guía para escribir las necesidades (5).

Prioridad	Necesidad Técnica
1. Ubicuidad	Que se pueda usar en todos lados
2. Minimizar los costos de mantenimiento	Evitar mecanismos complejos
3. De fácil manejo	No incorporar controles sofisticados
4. De bajo costo inicial	Minimización de costos de manufactura
5. Compatible con el medio ambiente	Tecnología solar
6. Ver bien el proceso	Ventana grande

Tabla A.1.4 Identificación de las necesidades del consumidor (5)

#### **A.1.4 Comparación de productos comerciales existentes.**

En esta parte realizaremos algunas comparaciones de secadores comerciales ya existentes en el mercado. Los secadores para forrajes pueden dividirse en:

- a) secadores de pila con aire frío natural;
- b) secadores de piso con aire caliente;
- c) secadores mecánicos de cinta o banda continua (4).

Algunas descripciones de los secadores antes señalados se darán a continuación:

##### a) Secadores de pila con aire natural.

Este secador consiste en:

- 1. una cámara donde está el forraje;
- 2. un ventilador helicoidal con un motor de 5 HP;
- 3. canales para repartir el aire.

El forraje se deposita y sobre los conductos de aire de tal forma que éste encuentre la misma resistencia al atravesar la masa de heno en cualquier dirección. El resultado de la operación depende de la formación de la pila, del caudal del aire y la temperatura del aire que penetra en la pila, debe ser superior a los 15°C con una humedad relativa inferior al 80%. La capacidad de producción es de 15 a 20 toneladas y el tiempo de secado es de 25 días.

##### b) Secador de piso con aire caliente.

Consiste de:

- 1. Cámara de secado con área de 150-180 m<sup>2</sup>.
- 2. Ventilador con caudal de 20-25 m<sup>3</sup> de aire/ ton de forraje.
- 3. Quemador.
- 4. Sistema de control. La temperatura del aire nunca deberá de ser superior a 82°C ni inferior a 40-42°C.

La capacidad de este secador es de 10 toneladas de producto al día.

La capacidad de este secador es de 10 toneladas de producto al día.

c) Secador de banda metálica continua.

Consiste de:

1. Cámara de secado.
2. Banda metálica continua.
3. Quemador.
4. Ventiladores.
5. Canales para el control de flujo de aire.
6. Sistema de control.
7. La capacidad de este equipo varía de un rango de 10 hasta 25 toneladas en 24 horas de trabajo.

Los quemadores que usa pueden ser de gas, diesel y algunos son eléctricos que en general son altos consumidores de energía (3), (4).

#### **A. 1.6 Generación de conceptos.**

Se generó una lista de diseños conceptuales posibles que a continuación presentamos:

1. Placa absorbidora de calor, en posición horizontal sobre el foco de un parabolóide.
2. Domo adsorbedor sobre foco de un cilindro parabólico.
3. Colector pasivo tipo invernadero.
4. Colectores estacionarios planos, donde en lugar de agua, se haría circular pasto.
5. Sistema SRTA\*, consiste en un espejo a base de un casquete semi-esférico, se efectúa el enfoque sobre un absorbedor lineal de tamaño apreciable, colocado paralelo a la radiación solar incidente; en este absorbedor se debería hacer pasar al pasto (7), (9), (10).

\*SRTA . Reflector esférico estacionario con absorbedor móvil.

En la Tabla A.1.5 Se definieron 6 criterios de selección estos son: facilidad de operación; durabilidad; facilidad de manufactura; versatilidad; inversión y uso rudo. Los conceptos generados en el artículo anterior fueron sometidos a un juicio con estos criterios para los cuales, se podían tener tres opciones: + si el concepto presentaba ventajas, \_ si el concepto tenía desventajas y 0 si era igual o otro concepto. El concepto elegido fué el número tres, debido a que presentaba mayor facilidad de operación, facilidad de manufactura, versatilidad, uso rudo y precio competitivo.

### A. 1.7 Selección de un concepto.

Esta actividad consistió en las siguientes acciones:

1. Preparar una matriz de selección;
2. Elegir el concepto.

Criterio de selección	Placa con parabolóide	Domo con cilindro parabólico	Colector pasivo tipo invernadero	Colector plano	Sistema SRTA
Facilidad de operación	-	-	+	+	-
Durabilidad	0	0	0	0	0
Facilidad de manufactura	+	-	+	+	-
Versatilidad	-	-	+	+	-
Inversión	0	-	0	0	-
Uso rudo	-	-	0	-	-
Total +	1	0	3	2	1
Total 0	2	2	3	2	0
Total -	3	4	0	2	5
¿Continua?	No	No	Sí	No	No

Tabla A.1.5 Matriz de selección del concepto (5).

## **4-B. Apéndice**

En este apéndice se comparan las fuentes de energía convencionales con la energía solar, se describen las características generales de la radiación solar, así como los fenómenos asociados a la transmisión de la radiación solar, entre otros la adsorción por los constituyentes de la atmósfera, se definen las magnitudes relacionadas con la radiación solar además de sus mediciones. También se incluye una descripción de los concentradores solares y la demostración matemática del principio de concentración de los concentradores solares parabólicos. Además de los principios para el secado de productos agropecuarios y la evaluación de la calidad de los mismos.

### **B.1.1 Energía Solar.**

Como es sabido, la energía no se crea ni se destruye, únicamente se transforma, así que estrictamente hablando todas las formas de energía en el planeta Tierra son derivadas de la energía que se capta del Sol. Sin embargo, las formas más comunes de energía usadas actualmente corresponden a los combustibles fósiles, plantas y animales recibieron del Sol hace muchos años su energía cambiando sus características, por procesos geológicos y a través de mucho tiempo, en energía química que ahora es altamente concentrada y empezamos a usar rápidamente en forma de carbón y petróleo (10).

La energía es definida como la capacidad de realizar trabajo. En países como México las fuentes principales de energía son:

- 1) petróleo;
- 2) gas natural y gas licuado;
- 3) carbón;
- 4) madera;
- 5) energía hidráulica.

Todas son no renovables excepto la madera y la energía hidráulica. La energía solar es para el mundo la más abundante fuente de energía permanente. La cantidad de

energía solar interceptada por el planeta es del orden de 170 trillones de Kilowatts, una cantidad 5 000 veces mayor que la suma de todas las fuentes de energía disponibles en la Tierra. De esta cantidad cerca del 30% es reflejada al espacio, 47% se convierte en calor de baja temperatura y se emite como radiación al espacio, el 23% se usa en el ciclo biológico y menos del 0.5% es representada por la energía cinética del viento. Esta energía es sólo una fracción de los 4 millones de toneladas de hidrógeno que convierte el Sol en helio en un segundo (7).

### **B.1.2 Radiación atmosférica.**

El equilibrio del sistema tierra-atmósfera esta marcado por los intercambios energéticos, fundamentalmente de tipo radiativo entre éste sistema como un todo y el espacio exterior (9). Toda la energía que llega a dicho sistema procede del Sol. Parte de la energía que llega al conjunto tierra-atmósfera es reflejada al espacio exterior (labedo del planeta)<sup>1</sup> y parte es absorbido. El equilibrio energético entre ambas partes da lugar a la existencia de una temperatura media del planeta. Este sistema no se comporta como un cuerpo negro sino que tiene su propia emisividad. Se tiene así, que el propio sistema es una fuente de radiación que se denomina genéricamente radiación térmica o radiación atmosférica.

La radiación atmosférica, al igual que la solar es afectada por los fenómenos de absorción y reflexión. El estudio de estos es muy complicado debido a que la atmósfera es un medio muy complejo y al hecho de que el propio medio es a su vez emisor de radiación.

La radiación de onda larga constituye uno de los puntos fundamentales en el estudio de los fenómenos de radiación electromagnética que tienen lugar en la atmósfera. La redistribución de la energía que le llega al sistema en procesos de tipo dinámico y de tipo radiativo, constituye la esencia del clima del planeta y su evolución.

1 Efecto natural debido al reflejo de luz proveniente del Sol que realiza la Tierra.

La determinación de este tipo de radiación permite un mejor conocimiento de la propia estructura de la atmósfera ( perfil de temperatura, contenido de los gases atmosféricos, etc.)

La medida de este tipo de radiación, bien a nivel del suelo, fuera de la atmósfera (mediante satélites) o en los diversos niveles de la misma (globos, radiosondeos, aviones etc.) ó su estimación por diversas técnicas es hoy absolutamente necesaria para el tipo de estudios mencionados (9).

El conocimiento de la radiación atmosférica presenta también una serie de aplicaciones de carácter tecnológico, entre ellas el sistema de enfriamiento por radiación; por la noche los espacios abiertos se comportan como un sumidero de calor para cuerpos calientes colocados en la superficie de la Tierra, con esto se pueden diseñar enfriadores. Además es posible convertir energía solar en energía solar en energía eléctrica, tener sistemas solares de calentamiento de agua y sistemas solares de secado para productos pecuarios.

La radiación térmica emitida por un sólido es relativamente conocida; sin embargo, la radiación infrarroja emitida por la atmósfera es muy compleja y existen algunos aspectos mal comprendidos, pues no se entiende cabalmente todas las variables que intervienen, ni su interdependencia. Esta radiación depende de una gran cantidad de parámetros meteorológicos tales como temperatura de la atmósfera, la humedad, los aerosoles, concentración de diversos componentes (principalmente vapor de agua y dióxido de carbono), entre otros parámetros.

La relación entre la radiación infrarroja de la atmósfera y estos parámetros han sido investigada por muchos autores. Los estudios han sido abordados bajo tres métodos diferentes: uno consistente en establecer en establecer fórmulas empíricas basadas en medidas directas, otro que consiste en proponer modelos teóricos basados en un estudio detallado del fenómeno de la absorción por parte de los constituyentes atmosféricos, y el tercero que es un método intermedio entre los dos anteriores, y hace uso de algunas hipótesis simplificadoras dentro de los modelos más rigurosos.

### **B.1.3 Características generales de la radiación atmosférica.**

Se denomina radiación atmosférica a la radiación emitida por el sistema Tierra-atmósfera.

A veces, se suelen hacer diferencias llamando a la radiación emitida por la superficie terrestre, radiación terrestre y reservando el nombre de radiación atmosférica aquella emitida exclusivamente por la atmósfera. Sin embargo, teniendo en cuenta que ambas radiaciones se extienden en el mismo rango de longitudes de onda del espectro electromagnético y que ambas han de evaluarse conjuntamente en el balance energético de los fenómenos radiativos. Se denomina genéricamente al conjunto de las dos radiaciones atmosférica o terrestre, radiación infrarroja de onda larga, pues ambas pertenecen al intervalo de 4 a 100 micras de longitud de onda (9).

Los principales componentes que emiten radiación son los gases atmosféricos. Entre ellos los emisores más importantes son el vapor de agua, el dióxido de carbono y el ozono. A su vez estos son por supuesto los principales absorbentes de esta radiación. La presencia de nubes afecta de forma importante la emisión de radiación de onda larga. Bajo atmósferas cubiertas, la radiación atmosférica aumenta, ya que las nubes pueden ser consideradas como cuerpos negros que absorben y vuelven a emitir toda la radiación de onda larga que les llega, también la presencia de aerosoles influye. En atmósferas muy polucionadas los efectos de emisión y absorción de estas partículas llegan a ser importantes.

La magnitud radiométrica utilizada para la medida de la radiación atmosférica cuando se consideran todas las direcciones de propagación se le llama irradiancia y es expresada en  $W/m^2$ . Esta magnitud da cuenta de la energía que incide por unidad de tiempo en cada  $m^2$  de superficie. A la irradiancia también se le llama flujo radiativo ya que corresponde a una energía integrada en todas las direcciones del hemisferio.

Existen varias formas de representar la radiación proveniente del Sol, una de ellas consiste en considerar a la atmósfera como una capa isotérmica a la misma

temperatura del aire próximo a la superficie. La atmósfera se presenta en este caso, como un cuerpo gris al que se le atribuye una emisividad  $\varepsilon$  llamada emisividad efectiva (o aparente) de la atmósfera.

Esta magnitud se define a través de la ecuación siguiente:

$$\varepsilon = \frac{F}{\sigma T^4} \quad [B.1]$$

Aquí  $F$  es el flujo radiativo por unidad de superficie (o irradiancia),  $T$  es la temperatura ambiente del aire expresada en grados Kelvin  $^{\circ}\text{K}$  y  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzan cuyo valor es  $\sigma = 5.6 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  (9).

Otra representación consiste en tratar a la atmósfera como un cuerpo negro y atribuirle una temperatura uniforme, la temperatura equivalente ( $T_e$ ) se define a partir de la relación de Stefan-Boltzan, esto es,

$$F = \sigma (T_e)^4 \quad [B.2]$$

Las ecuaciones [B.1] y [B.2] son equivalentes. La relación que existe entre ambas magnitudes se expresa a continuación.

$$\varepsilon = \left( \frac{T_e}{T} \right)^4 \quad [B.3]$$

La elección de una u otra representación está en función de la utilidad que representa cada magnitud a la hora de interpretar resultados y también a la facilidad en cuanto al manejo de los datos disponibles. La mayoría de los autores utilizan como parámetro la emisividad, debido entre otras cosas al hecho de ser adimensional, y a que su rango de valores está acotado entre 0 y 1, además, para atmósferas claras la emisividad varía poco con la temperatura.

### **B.1.4 Radiación solar y atmosférica.**

El hecho de que la radiación solar sea de onda corta y la radiación atmosférica de longitud de onda larga, se debe a la gran diferencia en orden de magnitud entre la temperatura del Sol (alrededor de 6 000 °K), esto hace que éste emita radiación de la que 99% se encuentre en un rango de longitud de onda inferior de 3  $\mu$  mientras que las temperaturas de la atmósfera y de la superficie terrestre ( mucho más bajas) que corresponden con la emisión de una radiación electromagnética de longitud de onda comprendida entre las 4 y las 100  $\mu$  ( $\mu$ = micra, unidad de medida equivalente a  $1 \times 10^{-6}$  m).

El proceso más importante que sufre la radiación solar a su paso por la atmósfera es la absorción por parte de los constituyentes de la atmósfera. La emisión de radiación de onda corta por parte de la atmósfera se puede despreciar frente a este proceso. Para la radiación atmosférica en cambio, son fundamentales los procesos de emisión y absorción por parte de los materiales sólidos, líquidos o gases que constituyen el sistema tierra-atmósfera.

### **B.1.5 Absorción por los constituyentes de la atmósfera.**

Los constituyentes de la atmósfera al absorber radiación electromagnética del Sol generan cambios entre los distintos niveles energéticos de cada molécula. La radiación de onda larga es absorbida por las transiciones dentro de los niveles energéticos vibracionales y rotacionales, mientras que la radiación de onda corta es absorbida por todas aquellas transiciones que necesitan de mayor energía.

La combinación de transiciones entre los niveles de vibración y rotación moleculares son los responsables de la banda de absorción dentro del infrarrojo próximo y medio que aparecen en los espectros de gases atmosféricos.

Los principales gases emisores de radiación infrarroja en la atmósfera son: vapor de agua, dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, metano y óxido nítrico. Teniendo en

cuenta sus concentraciones y la absorción de los mismos, sólo los tres primeros son importantes para la determinación del balance energético del planeta.

- 1) **Vapor de agua.** Este gas es el emisor de radiación más abundante de todos los gases que componen la atmósfera. Sus bandas de absorción se sitúan tanto en el dominio de las longitudes de onda corta como en las largas. El equilibrio térmico en la troposfera se consigue principalmente por la presencia de agua, bien sea en fase gaseosa líquida o sólida. Dentro de la troposfera el vapor de agua es el principal absorbente, la importancia de este gas se debe también a que su distribución en la atmósfera es muy variable tanto regional como temporalmente.
- 2) **Dióxido de carbono.** Suele presentarse en cantidades muy pequeñas en comparación con otros gases; aún así, es el segundo componente más importante que dan origen a la radiación atmosférica.
- 3) **Ozono.** Tiene una fuerte absorción en el intervalo de 9 a 10  $\mu$ . Ejerce una fuerte influencia sobre el balance energético de la atmósfera, en particular de la estratosfera, donde se sitúa la mayor concentración de ozono.

#### **B.1.6 Balance medio de calor sistema Tierra-atmósfera.**

El balance consiste en contabilizar la cantidad de energía solar incidente y reflejada, así como la radiación atmosférica o longitud de onda larga emitida y absorbida en una determinada región del sistema Tierra-atmósfera, a lo que también hay que añadir los procesos energéticos no radiativos.

Este balance de calor se refiere al sistema Tierra-atmósfera como un todo, contabilizándose en este caso; la radiación solar incidente y reflejada por el sistema y la radiación de onda larga que escapa al espacio exterior. Cuando se hace un balance energético medio sobre un periodo largo de tiempo (mayor a un año) este sistema parece estar en equilibrio, es decir, nuestro planeta irradia al exterior aproximadamente la misma cantidad de energía que recibe (9).

El intercambio de energía en el límite de la atmósfera, es la componente principal del balance de energía en el sistema Tierra-atmósfera y es el determinante del clima en

el planeta. Para una región en particular del planeta en este sistema la ecuación del balance energético puede escribirse de la siguiente forma:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = N - \text{div}T_a - \text{div}T_k \quad [\text{B.4}]$$

Aquí, E es la cantidad de energía en una región, t es tiempo, N es el flujo de energía ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) radiativa neta en el borde de la atmósfera que penetra en esa región como resultado del transporte atmosférico y oceánico (8).

### B.1.7 Definiciones de magnitudes radiométricas.

A la energía transportada por una onda electromagnética cualquiera ( U ) se denomina energía radiativa, su unidad de medida es el julio. El flujo energético o radiativo  $\phi$  emitido, recibido o transportado, es la energía, recibida o transportada por unidad de tiempo  $\phi = dU/dt$  y es medida en Watts. La densidad de flujo energético o radiativo o flujo neto, es el flujo de energía que atraviesa al cuerpo por unidad de superficie  $F = d\phi/dt$  y es medida en  $\text{Watts}/\text{m}^2$ .

### B.1.8 Mediciones de la radiación.

Existen mapas climatológicos de radiación total de nuestro país basados en relaciones empíricas con un margen de error del 10%, los que existen ahora fueron realizados por la fórmula deducida por Jeevanada (10) para estimar la radiación global total en ly/día (1 ly=1  $\text{cal}/\text{cm}^2 = 4.186 \text{ J}/\text{cm}^2$ ) con datos medios mensuales.

La radiación global neta es dada por la expresión siguiente:

$$H = K \frac{(1 + 0.8p)(1 - 0.2t)}{h} \quad [\text{B.5}]$$

Aquí,

$K=(\lambda N + \psi_{ij}\cos \phi)10^2$ , en ly/día

$\phi$ = latitud geográfica del lugar en grados;

N = longitud promedio del día durante el mes, la cual puede obtenerse con la ecuación (2.6);

$\lambda=0.2/(1 + 0.1\phi)$ (Factor de latitud);

$\psi_{ij}$  Factor de estación (Fe) que depende del mes y localidad; j=1 para tierra adentro y j= 2 para costa; i= 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 que corresponde a los meses de enero a diciembre con los siguientes valores que se presentan en la Tabla B.1

Fe=1	1	2	3	4	5	6
$\psi_{i1}$	1.28	1.38	1.54	1.77	2.05	2.3
$\psi_{i2}$	1.46	1.77	2.05	2.15	2.05	2.05

Fe=1	7	8	9	10	11	12
$\Psi_{i1}$	2.48	2.41	2.36	1.73	1.38	1.17
$\Psi_{i2}$	2.10	2.17	2.14	1.96	1.60	1.43

Tabla B.1 Factores de estación que depende del mes y la localidad (10).

$p= n/N$ ;

n= horas promedio de insolación por día durante el mes;

t= r/M;

r= número de días lluviosos durante el mes;

M= número de días en el mes;

h= humedad relativa medida por día en el mes.

La longitud del día es obtenida por medio de la siguiente ecuación:

$$N = \frac{2}{15 \cos^{-1}(\tan \phi \tan \delta)} \quad [B.6]$$

Donde  $\delta$  es la declinación (posición angular del Sol al medio día solar con respecto al plano del ecuador) (10).

### **B.1.9 Contradores de energía solar.**

Debido a la naturaleza difusa de la energía solar para su uso se requiere de un dispositivo que transforme la energía solar en calor, para transferirlo a un fluido apropiado o bien transportado en estado sólido, estos dispositivos se llaman concentradores solares. Los concentradores solares se dividen en tres clases:

- 1) captadores planos;
- 2) concentradores estacionarios;
- 3) concentradores de enfoque que siguen al Sol.

A continuación se describen brevemente cada uno de estos concentradores.

#### **1) Captadores planos.**

Los captadores planos son los más sencillos y son capaces de obtener temperaturas que van desde algunos grados arriba de la temperatura ambiente hasta otras del orden de 80 °C en un periodo amplio de tiempo, de esta clase se tienen de ejemplos: los colectores para el calentamiento de agua, los estanques solares y los destiladores solares de agua (9).

#### **2) Concentradores estacionarios.**

A los dispositivos que aumentan la intensidad solar sobre una superficie absorbente, la cual recibirá solamente el flujo solar debido a su apertura se llaman concentradores solares. La concentración de la radiación solar, se logra mediante dispositivos ópticos que reflejan o refractan la radiación solar de manera que concentran el flujo incidente sobre un absorbedor de área mucho menor que la apertura. La principal ventaja de un concentrador sobre un colector plano, es que el

flujo de energía es mayor por unidad de superficie de absorción, por lo que se reducen las pérdidas térmicas, ya que el área del absorbedor, es menor, lográndose de esta forma temperaturas más altas, como ejemplo: tenemos los concentradores estacionarios se tienen: concentrador cilíndrico- parabólico, espejos tipo Fresnel, Casegraino entre otros.

### 3) Concentradores de enfoque que siguen al Sol.

Para concentradores de enfoque que siguen al Sol. Se tienen los siguientes: cilindro parabólico, parabolóide de revolución, esférico con absorbedor móvil, de absorbedor móvil y espejos fijos. En los concentradores cilíndricos parabólicos, los sistemas que están en operación como el absorbedor y el concentrador pueden o no girar simultáneamente; el principal objetivo es que exista un buen enfoque sobre el tubo absorbedor que se encuentra a lo largo del foco de la parábola. Las temperaturas que se logran alcanzar son del orden de 90°C a 200°C (10).

A continuación se fundamenta el principio de funcionamiento de un concentrador parabólico.

Una parábola en el plano X-Y es el conjunto de los puntos (x,y) que equidistan de una recta fija llamada directriz y un punto fijo llamado foco que esta fuera de dicha recta (14).

La ecuación de la parábola es:

$$y^2=4px \quad (p>0) \quad [B.7]$$

Como se muestra en la figura 3 a junto con un rayo que viaja hacia la izquierda y que es paralelo al eje X (14). Este rayo de luz toca a la parábola en el punto Q(a,b) y se refleja hacia el eje X, al que corta en el punto (c,0). Por la ley de reflexión de la luz, el ángulo de incidencia es igual al de reflexión, por lo que ambos ángulos (medidos con respecto a la recta tangente L que pasa por el punto Q) se llaman  $\alpha$

se observa este ángulo en la figura 3a. Por tanto, como el rayo incidente es paralelo al eje X, el ángulo que forma el rayo reflejado con el eje X en  $(c,0)$  es  $2\alpha$ .

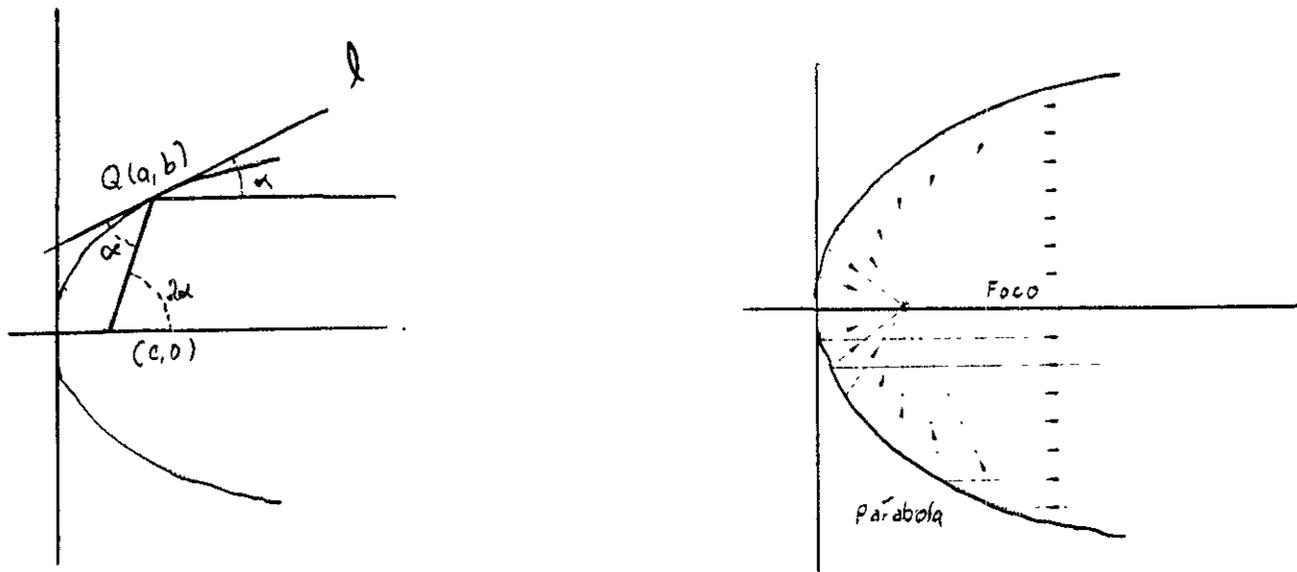


Figura B.3 a. Propiedad de reflexión de la parábola. B 3 b. Los rayos incidentes paralelos al eje se reflejan y se concentran en el foco.

Se utilizarán los puntos Q y  $(c,0)$  para calcular la pendiente del rayo de luz reflejado, esto es:

$$\tan 2\alpha = \frac{b}{a-c} = \frac{2\tan\alpha}{1-\tan^2\alpha} \quad [B.8]$$

La segunda igualdad es consecuencia de una identidad trigonométrica pero el ángulo  $\alpha$  esta relacionada con la pendiente de la recta tangente L en Q. Para determinar esta pendiente, reescribimos la ecuación 2.7 de la forma siguiente:

$$y = 4px = 2 \quad px = 2(px)^2 \quad [B.9]$$

luego se calcula la derivada para encontrar la pendiente, esto es:

$$\frac{dy}{dx} = \left( \frac{p}{x} \right)^{1/2} \quad [B.10]$$

por consiguiente, la pendiente de L es la tangente ( y dy/dx evaluada en el punto Q de coordenadas (a,b); es decir,

$$\tan \alpha = \left( \frac{p}{a} \right)^{1/2} \quad [B.11]$$

y en consecuencia

$$\frac{b}{a-c} = \frac{2 \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha} = \frac{\frac{p}{a}}{1 - \frac{p}{a}} = \frac{pa}{a-p} = \frac{a}{a-p} \quad [B.12]$$

como  $b = 2(pa)^{1/2}$ , entonces  $c=p$ . Así todos los rayos incidentes paralelos al eje X se reflejan en el único punto F(p,0).

De la figura 3b, si hacemos con ella un sólido de revolución obtenemos el paraboloide de revolución, que tiene la propiedad de concentrar en una área pequeña todos los rayos del Sol, que logra captar.

### B.2.1 Secado.

El secado es un proceso intensivo de energía y ocupa un lugar significativo del total de uso de energía. El secado de diferentes materiales usando radiación solar ha sido realizado desde tiempos remotos en todo el mundo. Usualmente el material que se desea secar es puesto sobre el piso permitiendo que los rayos solares incidan sobre él y removiéndolo periódicamente para obtener uniformidad en el secado. Este procedimiento es simple y barato; sin embargo tiene la limitante de un reducido grado de secado del material, ya que la fuerza motriz del proceso es la diferencia de

presiones parciales de vapor de agua a las temperaturas del material y del aire. Si el aire tiene una temperatura baja y una humedad relativa alta, la extensión del secado del material será muy poca e inclusive el proceso puede revertirse y así, obtenerse un material más húmedo que el original. Es obvio que las condiciones climatológicas son determinantes en este tipo de secado, otro inconveniente es la acción nociva de roedores e insectos (11), (12).

### **B.2.2 Consideraciones para secar pasto.**

La deshidratación o secado de un cuerpo es la expulsión, dentro de un límite determinado, del agua en él contenida, bajo determinadas condiciones de temperatura, humedad y progresión de secado.

Las células vegetales consisten en una membrana que encierra una masa viva llamada protoplasma, en el interior del cual hay un núcleo más denso. El agua se halla contenida en las células como agua líquida y como vapor; en la pared celular. Para aumentar el grado de sequedad, el proceso común es calentar el aire (u otro gas) y hacerlo circular por el material a secar en un recipiente cerrado. Se calienta aire por medio de fuego directo ó vapor de agua. En algunos casos el fluido de secado es gas o mezcla de gases provenientes de la combustión.

Se ha determinado que cada material tiene su comportamiento específico ante el proceso de secado y también se conoce cuales son las temperaturas que puede soportar, sin llegar a sufrir daños en su estructura o en sus propiedades. Desde un punto de vista general, el secado puede dividirse en el calentamiento del gas y en el comportamiento del material ante el gas caliente.

El agua se retira de la superficie húmeda del cuerpo convertida en vapor, y ésta evaporación origina una disminución en el porcentaje de agua contenida en la superficie. A su vez la disminución origina una difusión del líquido desde el interior hasta el exterior del cuerpo. El vapor de agua que se forma en la superficie se va difundiendo en el aire después de atravesar una fina película de aire húmedo que se mantiene adherido al cuerpo. Por tanto, el secado depende de tres factores:

- La diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie del cuerpo, y el aire de la cámara de secado.
- La resistencia que la película de aire húmedo adherida al cuerpo ofrece al paso del vapor y a la transmisión del calor.
- Difusión del agua del interior del pasto a la superficie.

**El principio en que se basa los secadores solares es coleccionar energía y calentar aire de una cámara donde se moverá el equilibrio de la humedad, en el sistema cámara de aire-pasto, donde se debe controlar las siguientes variables:**

- Diferencias de presiones parciales de vapor de agua, en el aire y en el pasto.
- Radiación solar absorbida.
- Transferencia de calor por conducción.
- Temperatura ambiente.
- Pérdida de calor del concentrador.

### **B.2.2 Calidad en productos secados.**

La humedad contenida en los pastos se puede determinar por métodos directos e indirectos. El método directo consiste en introducir una muestra de pasto a una estufa de temperatura constante alta para obtener mediciones exactas de humedad, sin embargo este método no es práctico, pues es demasiado laborioso y consume mucha energía (4). El método indirecto hace uso de instrumentos que aprovechan las propiedades eléctricas del pasto que varían con la temperatura, humedad, grado de compactación y limpieza.

El contenido de humedad del pasto incluye básicamente el peso del agua y se expresa generalmente en porcentajes. Hay dos formas de calcular matemáticamente la humedad contenida del pasto, estas son:

Humedad contenida base húmeda:  $H_{cbh}$

Humedad contenida base seca:  $H_{cbs}$

El contenido de humedad por el método húmedo se obtiene por medio de la ecuación siguiente:

$$\% \text{ humedad base seca} = \left( \frac{\mathbf{pmbs}}{\mathbf{pmbs + pmbh}} \right) * 100 \quad [\text{B.13}]$$

$$\% \text{ humedad base húmeda} = \left( \frac{\mathbf{pmbh}}{\mathbf{pmbs + pmbh}} \right) * 100 \quad [\text{B.14}]$$

donde

pmbs =Es el peso de la materia en base seca;

pmbh = Es el peso de la materia en base húmeda (11), (12).

#### **4-C. Apéndice. Transporte de calor.**

En este apéndice se presentan los fundamentos del transporte de calor, y su aplicación en el prototipo, en el apéndice anterior se mencionó el principio en que se basan los secadores solares para funcionar, en una primera parte se colecta la energía y en la segunda se calienta el aire de la cámara de secado donde se moverá el equilibrio del sistema pasto-aire de la cámara de secado. La fuerza motriz del secado es la diferencia de la presión de vapor de agua que existe entre el pasto "Poa pratensis L." y el aire que rodea al pasto, al aumentar la temperatura del aire, éste aumenta la cantidad de vapor de agua que puede contener al evacuar el aire con alto contenido de vapor de agua se lleva consigo la humedad del pasto, repitiendo el proceso se induce una difusión de agua del centro del pasto hacia la superficie del mismo donde cambiará de fase de líquido a vapor, incorporándose al aire de la cámara de secado, secando el pasto como consecuencia.

Es muy importante conocer el campo de temperaturas del interior de la cámara de secado porque al conocerlo, es posible mejorar el diseño de la cámara de secado del prototipo; para este fin se usa el método del elemento finito, por ser una técnica de interpolación adecuada para sentar las bases de futuros desarrollos en la materia.

Se resuelve el caso estable del problema térmico debido a que cuando ocurre el cambio de fase de líquido a vapor de agua, la temperatura no aumenta en la región donde se encuentra el pasto, debido a que alcanza un equilibrio meta-estable en ese momento es conveniente conocer el campo de temperaturas de la cámara de secado.

En el prototipo la cámara de secado está limitada en la parte de abajo por la una placa conductora de calor, que recibe a éste de la barra conductora en el extremo

opuesto donde se localiza el foco del concentrador, la placa se calienta hasta los 55°C. Las cuatro paredes de la cámara están aisladas y están a 40 °C, el límite superior de la cámara lo marca la charola donde se encuentra el pasto a 52 °C, por un sistema meta-estable se toma un corte de la cámara de secado teniendo un sistema bidimensional. Ver figura. 1.4.

### **C.1 Transporte de calor.**

La transferencia de calor es el estudio de los procesos de transporte de energía térmica entre cuerpos, como resultado de la diferencia de temperaturas. En termodinámica el calor es definido como una forma de energía que viaja entre un sistema termodinámico y su entorno debido a la diferencia de temperatura que existe entre ambos. El flujo de calor es vectorial y fluye en la dirección negativa del gradiente térmico, es decir de los lugares calientes a los fríos (12). Las leyes de la termodinámica pueden ser usadas para predecir de manera general el calor transferido del sistema a su entorno o al revés cuando el sistema pasa de un estado termodinámico a otro, pero sólo de manera total. Estas leyes no proporcionan información sobre el tiempo del proceso, sólo nos informa de los estados en equilibrio.

La Transferencia de calor esta basada en la teoría y práctica experimental, como en otras disciplinas se basa en leyes generales y leyes particulares, que directa e indirectamente intervienen. En el caso de las leyes generales estas son:

1. ley de la conservación de la masa;
2. primera ley de la termodinámica;
3. segunda ley de la termodinámica;
4. segunda ley de Newton (20).

## C.2 Formas de transmisión del calor.

El mecanismo por el cual el calor se transmite es complejo, sin embargo, existen tres formas básicas y distintas de transferir el calor: conducción, radiación y convección, una breve descripción de ellas se da a continuación:

1). Conducción. Es el proceso de transferencia de calor por movimiento molecular, en algunos casos intervienen electrones que se mueven a través del cuerpo (sólido, líquido y gaseoso) en otros por vibración molecular, de cualquier forma siempre se dará de las regiones de alta temperatura a las de baja.

Para los sólidos la conducción es por el contacto de dos cuerpos sólidos de diferente temperatura, en líquidos y gases por la transferencia de energía cinética.

2). Radiación. Es la transferencia de calor que usa ondas electromagnéticas. Todos los cuerpos sólidos, líquidos o gaseosos emiten radiación como resultado de su temperatura y también pueden absorber tal energía. Además la radiación puede pasar a través de ciertos tipos de sustancias llamados materiales transparentes y semi-transparentes además del vacío. La conducción es el único mecanismo por el cual el calor puede fluir por un sólido opaco, aun cuando ciertos sólidos transparentes o semi-transparentes tales como vidrio y cuarzo el flujo de energía puede ser por radiación y conducción.

Con gases y líquidos, si no es observable un movimiento del fluido, entonces el mecanismo de transferencia de calor será por conducción.

3). Convección. Esta forma de transmisión de calor se observa cuando en un fluido existe la combinación de los efectos de conducción, radiación y flujo de masa que se pueda distinguir. Por que el movimiento de masa también puede transportar energía en forma de energía cinética.

En realidad, la distribución de la temperatura en un medio, es controlada por la combinación de estos tres modos de transferencia de calor. Sin embargo, no es posible aislar un sólo modo de transferencia de calor. Para efectos de análisis se estudian de manera independiente.

### **C.3 Transferencia de calor por radiación.**

Existen muchos tipos de radiación electromagnética; la radiación térmica es tan sólo una de ellas. Sea cual fuere el tipo de radiación, decimos que esta se propaga a la velocidad de la luz,  $3 \times 10^{10}$  cm/s. Esta velocidad es igual al producto de la longitud de onda y frecuencia de la radiación,

$$c = \lambda \nu \quad [C.1]$$

donde  $c$  = velocidad de la luz

$\lambda$  = longitud de onda

$\nu$  = frecuencia

La radiación térmica fluctúa entre 0.1 a 100  $\mu\text{m}$ .

La propagación de la radiación térmica ocurre en forma de cuantos discretos, en la que cada cuanto tiene una energía. Se puede obtener un cuadro físico muy burdo de la propagación de la radiación considerando cada cuanto como una partícula que tiene energía masa y momento. Por tanto, en cierto sentido podemos pensar en la radiación como en un "gas de fotones" que pueden fluir de un lugar a otro.

Cuando la energía radiante incide contra una superficie material, parte de la radiación se refleja, parte se absorbe y parte se transmite tal como lo muestra la figura C.2.

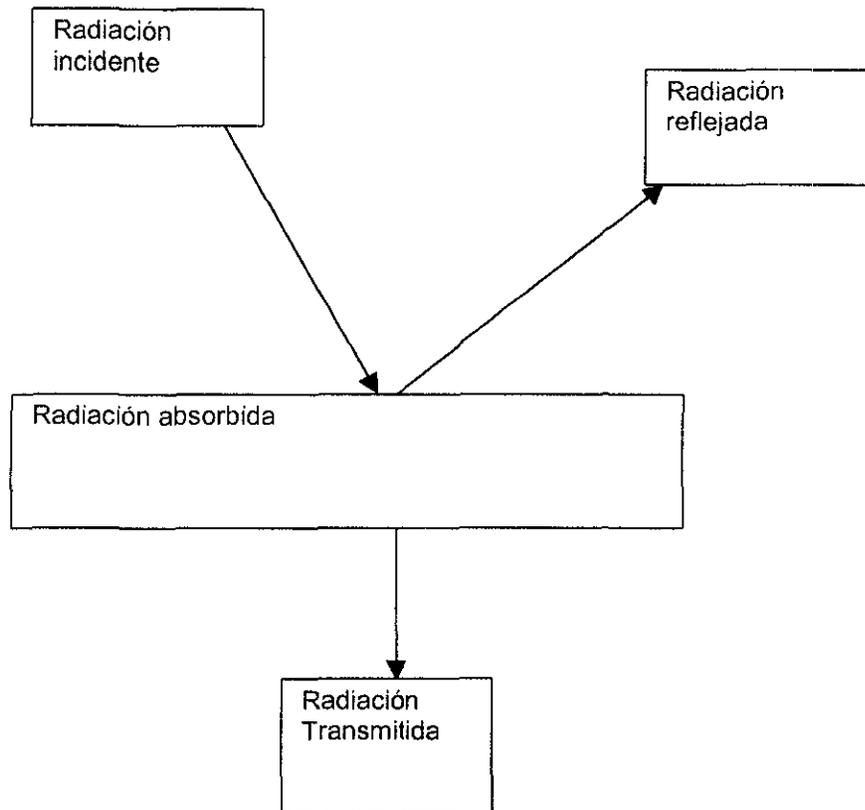


Figura C. 2. Efectos de la radiación incidente

La mayor parte de los cuerpos sólidos no transmiten radiación térmica; de modo que la transmitancia es cero, así tenemos:

$$\text{reflejancia} + \text{absorbancia} = 1 \quad [\text{C.2}]$$

Como la energía no se crea ni se destruye, cuando un material recibe radiación térmica, al absorber la energía de los fotones la transforma en calor.

#### C.4 Deducción de la ecuación para el transporte de calor.

Nuestra atención se va a centrar en la modelación del comportamiento del aire dentro de nuestro secador solar, las hipótesis de las que partimos son:

- a) El aire es un medio isotrópico.
- b) El aire es homogéneo.
- c) La velocidad del aire dentro del secador es cero.
- d) Consideramos aislado al secador.
- e) El secador recibe un flujo de calor del concentrador por el gradiente térmico.
- f) El mecanismo de transporte de calor del concentrador al aire es conducción.
- g) Los mecanismos de radiación y convección son despreciables.
- h) La densidad del aire permanece constante.
- i) No hay generación de calor en el aire  $Q=0$ .
- j) Las propiedades térmicas del aire permanecen constantes.
- k) Estado estable.

Nuestro sistema será un volumen de control cúbico de volumen unitario.

Sabemos que el calor contenido en nuestro volumen de control es

$$Q(t) = \int_{\nu} c_p T dv. \quad [C.3]$$

donde

$Q(t)$  = Calor contenido en un volumen de control unitario.

$c$  = calor específico;

$T$  = temperatura;

$t$  = tiempo;

$\nu$  = volumen;

$\rho$  = densidad.

El flujo de calor neto que pasa por la superficie frontera S es:

$$F(t) = \int_S k \mathbf{grad} T \cdot \hat{n} dA \quad [C.4]$$

donde

k = conductividad térmica;

$\hat{n}$  = vector normal a la superficie de transferencia de calor;

dA = diferencial de área de transferencia de calor;

S = superficie de transferencia de calor;

F(t) = flujo neto de calor que pasa por la frontera S.

Por la ley de la conservación de la energía tenemos

$$\frac{d}{dt} \int_V c\rho T dv = \int_S k \mathbf{grad} T \cdot \hat{n} dA \quad [C.5]$$

El teorema de Gauss nos dice que

$$\int_V \text{div} F dv = \int_S (F \cdot \hat{n}) dA \quad [C.6]$$

Si aplicamos al lado derecho de la ecuación [C.5] el teorema de Gauss tenemos

$$\frac{d}{dt} \int_V c\rho T dv = \int_V \text{div}(k \mathbf{grad} T) dv \quad [C.7]$$

Por ser nuestro sistema estable la parte izquierda de la ecuación [C.7] es cero, reescribiendo tenemos

$$\int_V \text{div}(k \text{ grad} T) = 0 \quad [\text{C.8}]$$

Así tenemos

$$\text{div}(k \text{ grad} T) = 0 \quad [\text{C.9}]$$

Usando para esta deducción las referencias (13),(14),(15), (16), (19) y (20). La ecuación [C.9] representa el problema térmico en estado estable y será resuelta en la siguiente sección.

### C.5 Deducción del problema variacional térmico del secador solar.

En esta parte, resolveremos la ecuación [C.9] utilizando el método del elemento finito como una técnica de interpolación, los modelos variacionales serán construidos, así también los modelos de aproximación y matricial, el dominio de nuestro problema será un rectángulo que representa un corte del interior del secador solar, el cuál puede ser modelado como el problema térmico **bidimensional** en estado estable.

Definición del problema:

Dado  $K$  y  $f$  encuentre:  $u$ , tal que

$$\begin{aligned} \text{div}\{K \nabla u\} + f &= \frac{1}{\alpha} && \text{en } \Omega && [\text{C.10}] \\ u &= \hat{u}, && \text{sobre } \partial\Omega && \end{aligned}$$

donde

$$K_{ij} = 1$$

$$f = 0$$

Aquí,  $K$  es el tensor de difusividad,  $u$  es el campo de temperaturas,  $f$  es una fuente de calor,  $\alpha$  es la conductividad térmica,  $\Omega \subset \mathbb{R}^2$  es el dominio,  $\partial\Omega$  es la frontera de  $\Omega$ .

Las hipótesis fundamentales para resolver este problema son:

$$\dot{u} = 0 \quad \text{estado estable,}$$

$$f = 0 \quad \text{sin fuente de calor.}$$

Bajo estas hipótesis, el problema [C.10] se puede expresar de la forma siguiente:

Dado  $K_{ij}$  encuentre  $u$ , tal que:

$$\operatorname{div}\{K\nabla u\}=0 \quad \text{en } \Omega \quad \text{[C.11]}$$

$$u=\hat{u}, \quad \text{sobre } \partial\Omega$$

$$K_{ij}=1$$

### 3.6 Solución del problema térmico.

El primer paso para encontrar la solución de [C.11] es construir la formulación primal del problema térmico, con la metodología siguiente:

1. Identificar el espacio vectorial de la solución  $u:\Omega\rightarrow\mathbb{R}$ .

Obsérvese que  $u \in C^2(\Omega,\mathbb{R})$ , por lo tanto  $u$  debe ser continua y al menos dos veces diferenciable.

2. Definir el conjunto admisible de temperaturas, esto es;

$$U = \{v \in C^2(\Omega, \mathfrak{R}) : v = u\} \quad \text{sobre } \partial\Omega$$

3. Tómesese  $v \in U$  y multiplíquese [C.11] por  $w = (v - u)$ , donde  $u: \Omega \rightarrow \mathfrak{R}$  es la solución de [C.11] y  $u \in U$ . Esto es

$$\operatorname{div}\{K\nabla u\}(v - u) = 0 \quad [\text{C.12}]$$

4. Integrar sobre el dominio  $\Omega$ , esto es,

$$\int_{\Omega} (\operatorname{div}\{K\nabla u\})(v - u) d\Omega = 0 \quad [\text{C.13}]$$

La ecuación [C.13] es conocida como la formulación variacional fuerte del problema [C.11].

5. Aplicar la fórmula de Green a [C.13] definiendo esta fórmula de la siguiente manera

$$\int_{\Omega} f \nabla^2 g = \int_{\Omega} \nabla f \cdot \nabla g d\Omega - \int_{\partial\Omega} f \nabla g \cdot \mathbf{\hat{n}} d\partial\Omega \quad [\text{C.14}]$$

Entonces al aplicar [C.14] a [C.13] se tiene el siguiente resultado

$$\int_{\Omega} K \nabla u \cdot \nabla (v - u) d\Omega - \int_{\partial\Omega} (K \nabla u \cdot \mathbf{\hat{n}})(v - u) d\partial\Omega = 0 \quad [\text{C.15}]$$

donde  $\mathbf{\hat{n}}$  es un vector normal a la superficie de  $\partial\Omega$ .

6. Introducir las condiciones de frontera; esto es,

$$\int_{\partial\Omega} (K\nabla \cdot \tilde{n})(v - u) d\partial\Omega = 0 \quad [C.16]$$

La ecuación [C.16] es válida ya que

$$v \in U, \quad v=u \text{ en } \partial\Omega \text{ y } u \in U, \text{ entonces}$$

$$w=v-u = u-u = 0 \text{ en } \partial\Omega.$$

Entonces en base a [C.16] toma la forma siguiente:

$$\int_{\Omega} K\nabla u \cdot \nabla (v - u) d\Omega = 0 \quad [C.17]$$

La ecuación [C.17] es llamada la formulación variacional débil del problema [C.11].

### C.6 Modelo de aproximación.

Sea  $V_h$  una aproximación del espacio  $C^2(\Omega, \mathfrak{R})$ . El espacio  $V_h$  es de dimensión finita, la construcción de  $V_h$  es mediante funciones globales de interpolación tipo elemento finito, esto es:

$$V_h = [\varphi_j] = \{V_h: \Omega \rightarrow \mathfrak{R}; V_h(x,y) = \alpha_j \varphi_j(x,y), j=1,2 \dots m\} \quad [C.18]$$

donde las funciones  $\varphi_j$  se construyen con la técnica del elemento finito.

El conjunto  $U_h$  que aproxima a  $U$  es definido por:

$$U_h = \{v_h \in V_h : v_h(a_j) = U_h(a_j); \forall a_j \in \partial\Omega\}. \quad [C.19]$$

El problema [C.17] se puede definir de la forma siguiente:

Encuentre  $u_h \in U_h$ , tal que

$$\int_{\Omega} K \nabla u_h \cdot \nabla (v_h - u_h) d\Omega = 0 \quad \forall v_h \in U_h. \quad [C.20]$$

La ecuación [C.20] es conocida como el problema variacional discreto. Nótese que [C.20] también puede ser escrita de la forma siguiente:

Encuentre  $\alpha \in \mathfrak{R}^m$  tal que

$$A(\beta - \alpha) = 0$$

$$\text{Aquí, } A_{ij} = \int_{\Omega} K \nabla \varphi_j \cdot \nabla \varphi_i d\Omega \quad \text{con } \beta \in \mathfrak{R}^m. \quad [C.21]$$

La expresión [C.21] es una equivalencia de [C.11] en términos matriciales.

### C.7 Demostración del problema variacional discreto.

Note que de [C.18]

$$u_h(x, y) = \alpha_j \varphi_j(x, y), \quad [C.22]$$

también

$$v_h(x,y) = \beta_k \varphi_k(x,y)$$

con  $j,k=1,2,\dots,m$

Al sustituir [C.22] en [C.17] obtenemos el siguiente resultado:

$$\int_{\Omega} \nabla(\alpha_i \varphi_i(x,y)) \cdot \nabla(\beta_k \varphi_k(x,y) - \alpha_k \varphi_k(x,y)) d\Omega \quad [C.23]$$

Entonces por linealidad,

$$\alpha_i \int_{\Omega} \nabla \varphi_i(x,y) \cdot \nabla(\varphi_k(x,y)) d\Omega (\beta_k - \alpha_k) = 0 \quad [C.24]$$

Notemos entonces que

$$A_{ki} = \int_{\Omega} \nabla \varphi_i(x,y) \cdot \nabla(\varphi_k(x,y)) d\Omega$$

$$A_{ji} = \int_{\Omega} \nabla \varphi_j(x,y) \cdot \nabla(\varphi_i(x,y)) d\Omega$$

$$A_{ki} = \int_{\Omega} \nabla \varphi_i(x,y) \cdot \nabla(\varphi_k(x,y)) d\Omega$$

por tanto podemos reescribir la ecuación [C.24] de la forma siguiente:

$$\alpha_i A_{ki} (\beta_k - \alpha_k) = 0 \quad [C.25]$$

Además,

$$A_{ij} \alpha_j (\beta_k - \alpha_k) = 0$$

$$A\alpha \bullet (\beta - \alpha) = 0, \quad \alpha \in \mathfrak{R}^m \quad \beta \in \mathfrak{R}^m$$

por tanto [C.21] queda demostrada.

### C.8 El método del elemento finito.

El paso siguiente para solucionar [C.21] es definir una técnica de interpolación que consiste en:

1. Subdividir el dominio  $\Omega$  en pequeñas regiones, esto es,

a)  $\Omega = \bigcup_{j=1}^n E_j$ ; donde  $E_j$  = j-ésimo elemento finito geométrico.

b)  $E_j \cup E_k = \phi$ , donde  $\phi$  es el conjunto vacío con  $j \neq k$ .

c) Las intersecciones de las fronteras de  $E_j, E_k, j \neq k$  son a lo más un vértice o una cara común.

2. Generar un conjunto de funciones linealmente independientes (una base de triangulación). Las funciones base serán del tipo polinomial.

Definamos en el dominio  $\Omega$  el conjunto siguiente:

$$P_{\hat{E}} = \{P_i : \hat{E} \rightarrow \mathfrak{R} : p(x,y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 xy\}$$

El conjunto anterior es llamado el espacio local de elemento finito.

El conjunto definido por:

$$\Sigma_{\hat{E}} = \{\varphi_i \in L(P_{\hat{E}}, \mathfrak{R}) : \varphi_i(p) = p(a_i), \quad 1 \leq i \leq 4\}$$

es llamado conjunto de grados de libertad.

La terna  $(\hat{E}, P_{\hat{E}}, \Sigma_{\hat{E}})$  es llamada un elemento finito.  $\hat{E}$  será llamado un elemento finito geométrico. En este trabajo, utilizaremos elementos finitos de forma cuadrada.

De acuerdo con la forma del elemento finito (cuadrado) construiremos las funciones base locales  $W_k \in P_{\hat{E}}$  a través del algoritmo siguiente:

$$1. W_j \in P_{\hat{E}}, \quad j=1,2,3,4. \quad [C.26]$$

$$2. \begin{array}{ll} \varphi_i(W_k) = 1 & \text{si } j=k \\ \varphi_j(W_k) = 0 & \text{si } j \neq k \quad j, k = 1, 2, 3, 4. \end{array}$$

El algoritmo definido anteriormente lo denominamos propiamente Método del Elemento Finito.

Nótese que en base a [C.26] se construyen las funciones base locales del elemento finito en la configuración de referencia  $\hat{E}$ . Una vez construidas las funciones base locales, el paso siguiente es caracterizar las funciones base reales. Esto es, seleccionaremos un elemento finito geométrico arbitrario  $\hat{E}_i$ , entonces las funciones reales se construyen de la forma siguiente:

Sea  $E_j$  la deformación de  $\hat{E}$ , esto es,

$$f_j^{-1}: E_j \rightarrow \hat{E}$$

donde  $f_j^{-1}$  es la función de deformación de  $\hat{E}$  en  $E_j$ ,  $f_j^{-1}$  existe puesto que  $f_j$  es uno a uno. En base a  $f_j^{-1}$  podemos construir las funciones reales, esto es,

$$\varphi_j(x,y) = W_k(f_j^{-1}(x,y)); (x,y) \in E_j$$

Para construir  $f_j^{-1}$  se propone la forma polinomial siguiente:

$$F_j(x,y) = (a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy, b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy)$$

Una vez caracterizadas las funciones base reales, debemos construir la matriz  $A$ . Los componentes de la matriz  $A$  de [C.25] están dados por:

$$A_{ij} = \int_{\Omega} \nabla \varphi_j \cdot \nabla \varphi_i d\Omega = \sum_{k=1}^n \int_{E_k} \nabla \varphi_j \cdot \nabla \varphi_i dE_k \quad [C.25]$$

La solución del problema [C.21] se encontrará utilizando el software MODULEFF.

Nuestra cámara de secado está limitada en la parte inferior por la placa conductora de calor que mide 55 cm de largo por 43.5 de ancho; la altura entre la placa conductora y la superficie de trabajo es de 20 cm. Se midieron las temperaturas de las fronteras de este sistema con un termómetro electrónico marca Fluke, los resultados los presentamos en la Tabla C.1

Frontera	Temperatura
Placa conductora	55 °C
Pared 1	40°C
Pared 2	40°C
Pared 3	40° C
Pared 4	40 °C
Superficie de trabajo	52 °C

Tabla C.1. Condiciones a la frontera del secador.

Procedimos a discretizar la figura C.4 la cuál presentamos en la figura C.5.

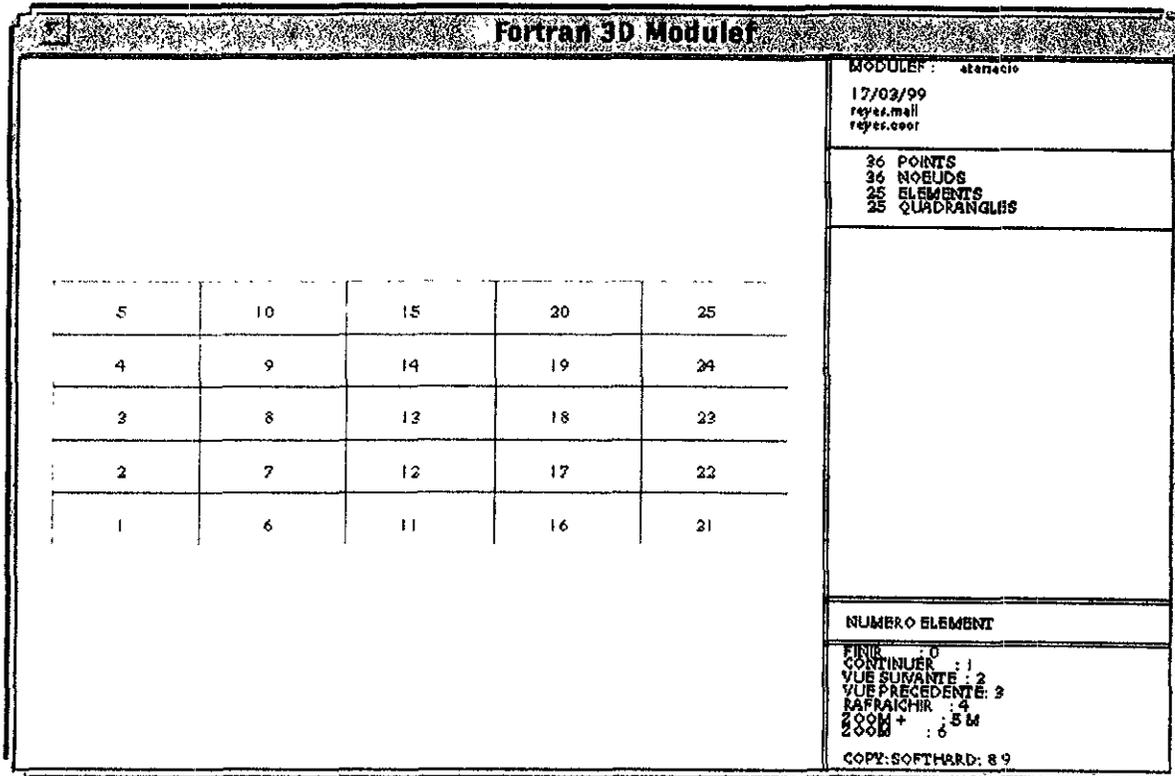


Figura C.5. Discretización del área de trabajo.

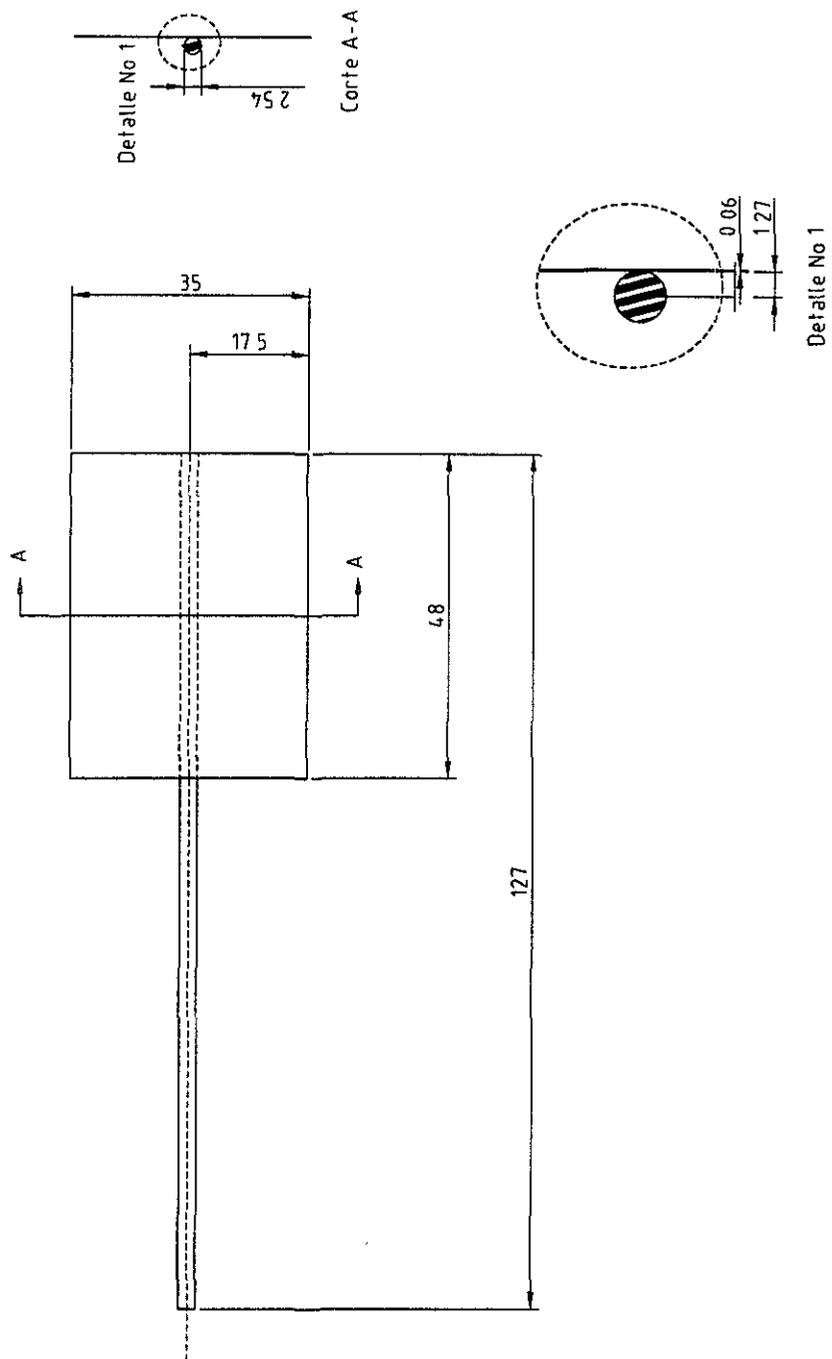
En este apéndice presentamos los planos del prototipo de secador solar. Los cuales constan de 14 láminas, donde se detallan: las partes que lo conforman, los ensambles y las dimensiones.

Código	Descripción de parte.
PC1-99	Barra y placa conductora de calor.
E1-99	Estructura lateral exterior, dos piezas iguales.
E1-1-99	Estructura lateral interior, dos piezas iguales.
E3-99	Estructura posterior.
P12-99	Cubierta de lámina posterior.
P1-99	Estructura del marco de la puerta.
P1-1-99	Detalle de cubierta de lamina, para puerta.
E4-99	Estructura frontal.
L1-99	Cubierta interna de puerta.
F11-99	Cubierta de lámina fondo.
PR1-99	Cubierta de lámina exterior derecha.
PR2-99	Cubierta de lámina exterior izquierda.
PE-1-99	Plano de ensamble.
PE-99	Plano de explosión.

Tabla 4 d.1. Códigos de planos.

Notas generales:

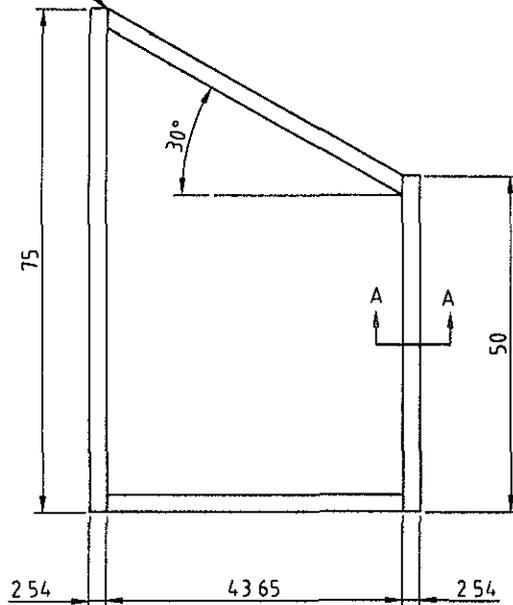
- 1) Los planos presentados en este trabajo son descriptivos.
- 2) El diámetro del colector es de 1.2 metros.
- 3) La forma de desplazar el secador, es mediante ruedas colocadas en las esquinas inferiores de la estructura.
- 4) La cubierta superior es de vidrio plano de 5 mm.
- 5) Las válvulas de bola, usadas en el control de secado, se aprecian en la foto 1.1 son de una pulgada de diámetro.



MET DE PROY		ESCALA		ACOTACION		TEXTURA		TOLERANCIAS					
		1:1		cm		R60 / (✓)		<table border="1"> <tr> <td>GENERALES</td> <td>GEOMETRICAS</td> </tr> <tr> <td>IT 11</td> <td></td> </tr> </table>		GENERALES	GEOMETRICAS	IT 11	
GENERALES	GEOMETRICAS												
IT 11													
LAMINA		HOJA		MATERIAL		<b>PLACA CONDUCTORA y BARRA</b>							
A-4		1/1											
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA	FECHA										
ELABORO	JACINTO												
REVISO	REYES												
						UNAM-DITAI		PC1-99					

Nota

Unir esquinas con puntos de soldadura



Tubular cuadrado de 254

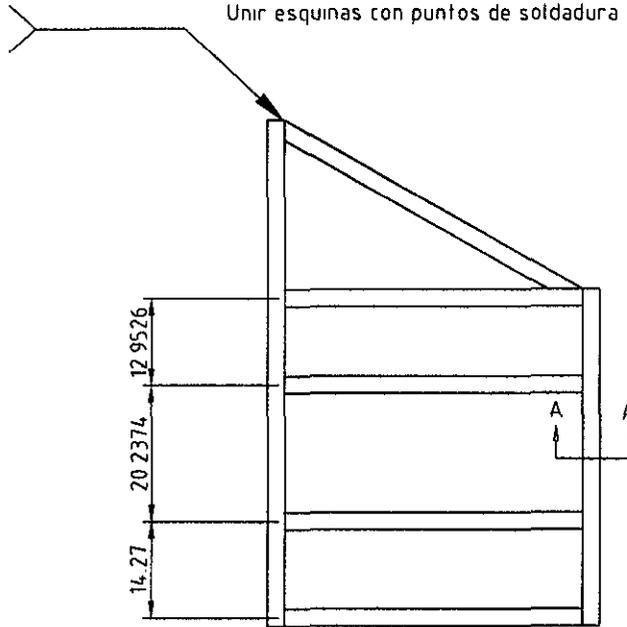


Corte A-A

MET DE PROY		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS		
		1:1	cm	R60 / (✓)	GENERALES	GEOMETRICAS	
					IT11		
LAMINA		HOJA	<b>EDIFICACION MAQUINA EXTERNA</b> <b>No DE PIEZAS 2</b>				
A-4		1/1					
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA					FECHA
ELABORO	JACINTO						
REVISO	REYES			UNAM-DITAI		E1-99	

Nota

Unir esquinas con puntos de soldadura



Tubular cuadrado de 2 54

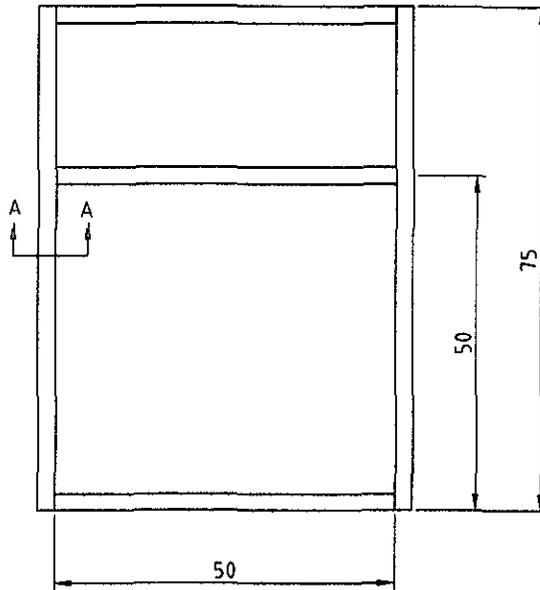
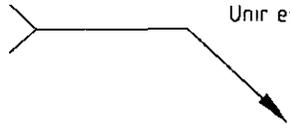


Corte A-A

MET DE PROJ		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS	
		1:1	cm	R60 / (✓)	GENERALES	GEOMETRICAS
					IT 11	
LAMINA		HOJA	MATERIAL	<b>ESQUEMA HACER EN INTERIOR</b> <b>No DE PIEZAS 2</b>		
A-4		1/1				
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA	FECHA			
ELABORO	JACINTO					
REVISO	REYES					
				UNAM-DITAI		E1-1-99

Nota

Unir esquinas con puntos de soldadura

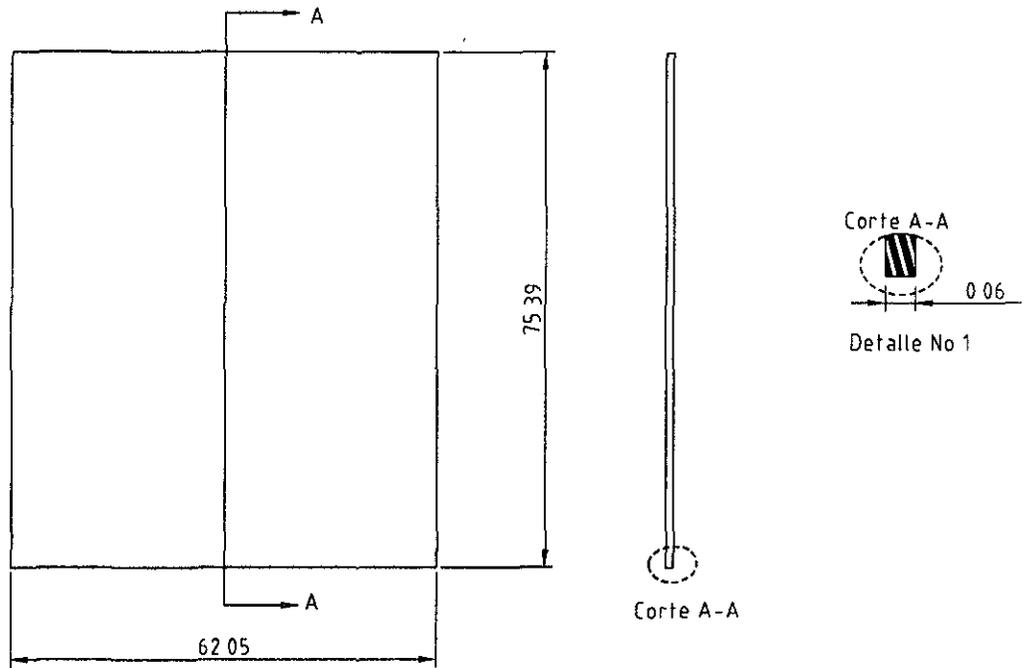


Tubular cuadrado de 2 54



Corte A-A

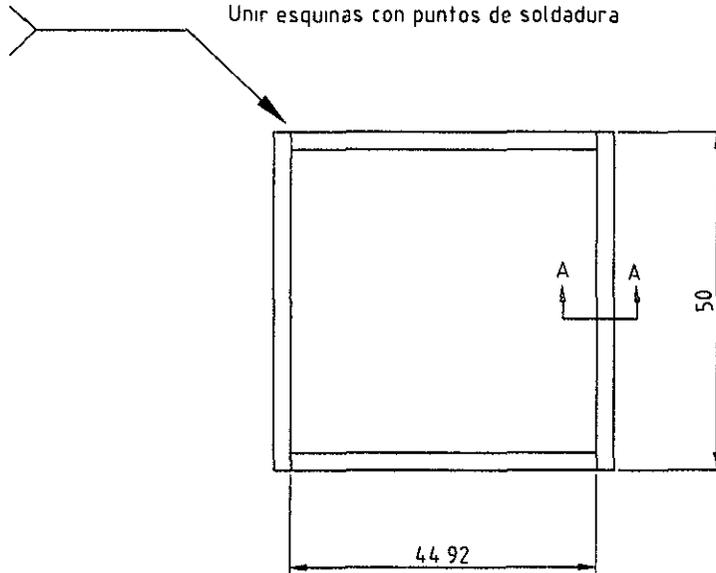
MET DE PROY		ESCALA		ACOTACION		TEXTURA		TOLERANCIAS	
		1:1		cm		R60 / (✓)		GENERALES	
LAMINA		HOJA		MATERIAL		IT 11		GEOMETRICAS	
A-4		1/1				<b>ESTRUCTURA POSVERJOR</b>			
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA	FECHA						
ELABORO	JACINTO								
REVISO	REYES								
				UNAM-DITAI				E3-99	



MET DE PROJ		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS	
		1:1	cm	R60 / (✓)	GENERALES	GEOMETRICAS
LAMINA		HOJA	MATERIAL	<b>COMERCIA DE LAMINA PODERJON</b>		
A-4		1/1				
PARTICPO	APELLIDO	FIRMA	FECHA			
ELABORO	JACINTO					
REVISO	REYES			UNAM-DITAI		P12-99

Nota

Unir esquinas con puntos de soldadura

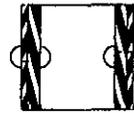
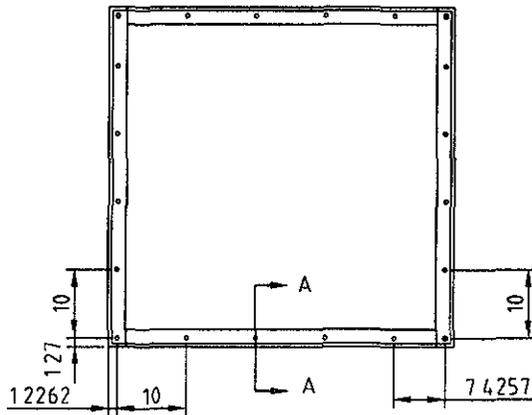


Tubular cuadrado de 2 54



Corte A-A

MET DE PROJ		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS	
		1:1	cm	R60 / (✓)	GENERALES	GEOMETRICAS
					IT 1 1	
LAMINA		HOJA	MATERIAL	<b>EDUCACION DE LA MANO DE LA PERSONA</b>		
A-4		1/1				
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA	FECHA			
ELABORO	JACINTO					
REVISO	REYES					
				UNAM-DITAI		P1-99



Corte A-A

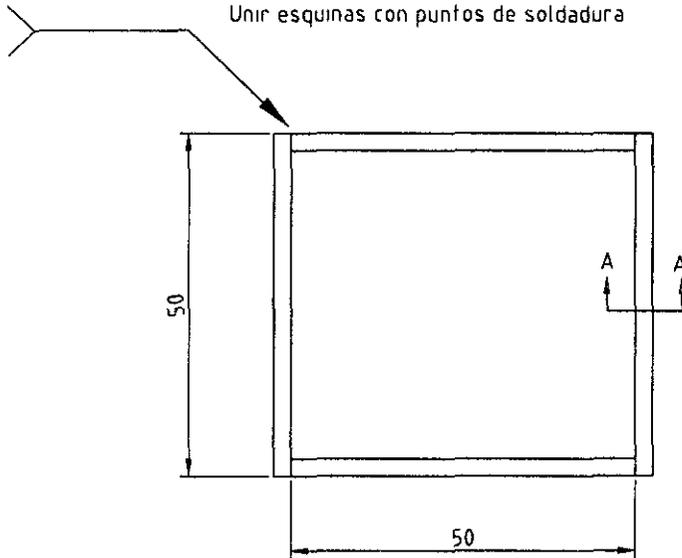
Nota

Remachar todas láminas calibre 24 según el plano de la puerta

MET DE PROY		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS		
		1:1	cm	R60 / (✓)	GENERALES	GEOMETRICAS	
LAMINA		HOJA	SEGURAR DE CONJUNTO DE BARRA PARA PUERTA				
A-4		1/1					
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA					FECHA
ELABORO	JACINTO						
REVISO	REYES			UNAM-DITAI		P1-1-99	

Nota

Unir esquinas con puntos de soldadura

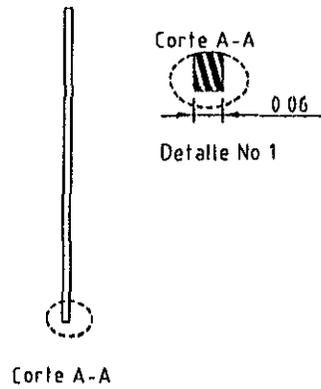
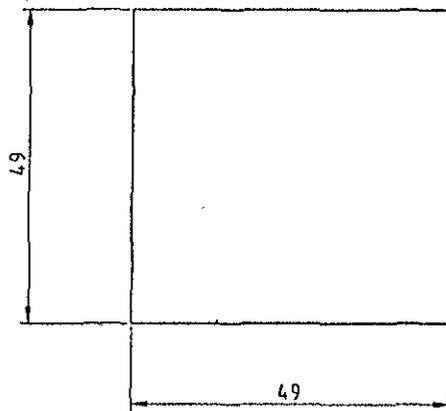


Tubular cuadrado de 2 54

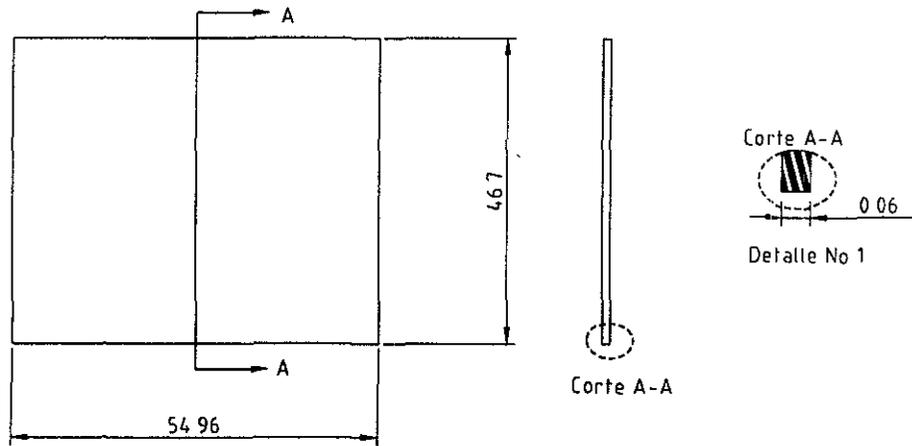


Corte A-A

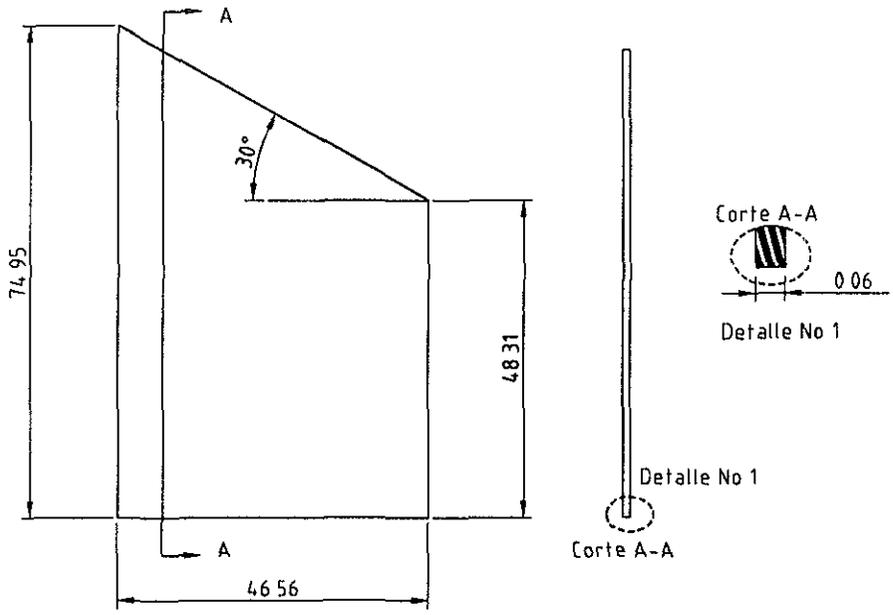
MET DE PROJ		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS		
					GENERALES	GEOMETRICAS	
		1:1	cm	R60 / (✓)	IT11		
LAMINA		HOJA	MATERIAL		<b>ESTRUCTURA FRONTAL</b>		
A-4		1/1					
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA	FECHA				
ELABORO	JACINTO						
REVISO	REYES						
				UNAM-DITAI		E4-99	



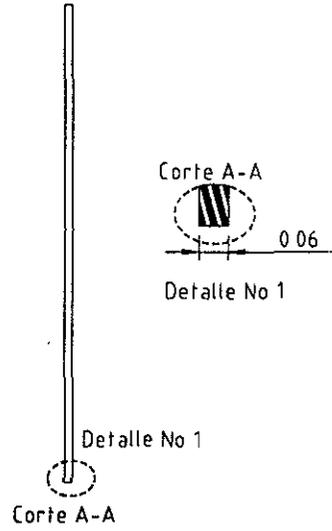
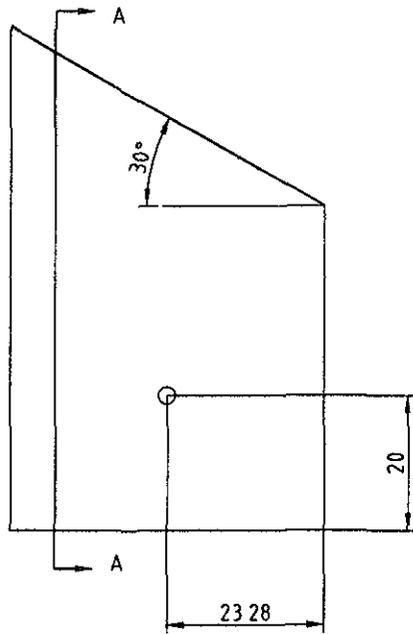
MET. DE PROY.		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS		
		1:1	cm	R60 / (✓)	GENERALES	GEOMETRICAS	
LAMINA	HOJA	MATERIAL	CONSERVA ENFERMA DE PUERDA				
A-4	1/1						
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA					FECHA
ELABORO	JACINTO						
REVISO	REYES						
				UNAM-DITAI	L1-99		



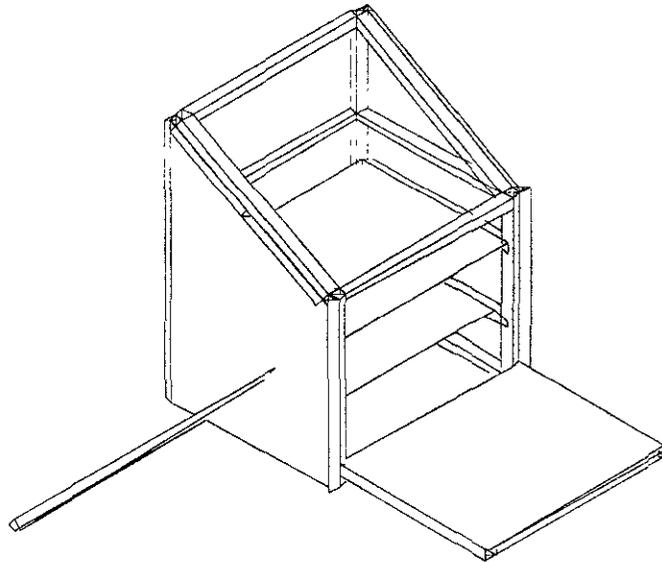
MET DE PROJ		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS		
		1:1	cm	R60 / (✓)	GENERALES	GEOMETRICAS	
					IT 11		
LAMINA		HOJA	MATERIAL				
A-4		1/1	<b>CUBIERTA DE LAMINA DE FONDO</b>				
PARTICPO	APELLIDO	FIRMA					FECHA
ELABORO	JACINTO						
REVISO	REYES						
			UNAM - DITAI		F11-99		



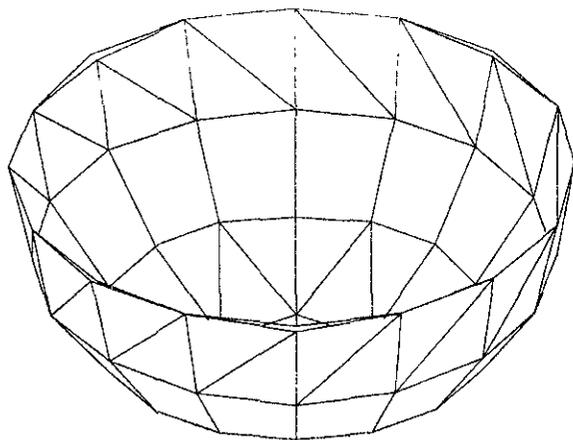
MET DE PROY		ESCALA		ACOTACION		TEXTURA		TOLERANCIAS	
		1:1		cm		R60 / (✓)		GENERALES IT 11	
LAMINA		HOJA		MATERIAL		CONSERVA DE LAMINA EXTERIOR DEBIDA No SE PEEZA 2			
A-4		1/1							
PARTICPO	APELLIDO	FIRMA	FECHA						
ELABORO	JACINTO								
REVISO	REYES					UNAM-DITAI		PR1-11	



MET DE PROJ		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS	
		1:1	cm	R60 / (✓)	GENERALES	GEOMETRICAS
					IT 1 1	
LAMINA		HOJA	MATERIAL	<b>CONDICION DE LAMINA EXTERIOR IZQUIERDA</b> <b>No SE DEBEZAR 2</b>		
A-4		1/1				
PARTICIPO	APELLIDO	FIRMA	FECHA			
ELABORO	JACINTO					
REVISO	REYES					
				UNAM - DITAI		PR2-99



Ensamble de secador solar



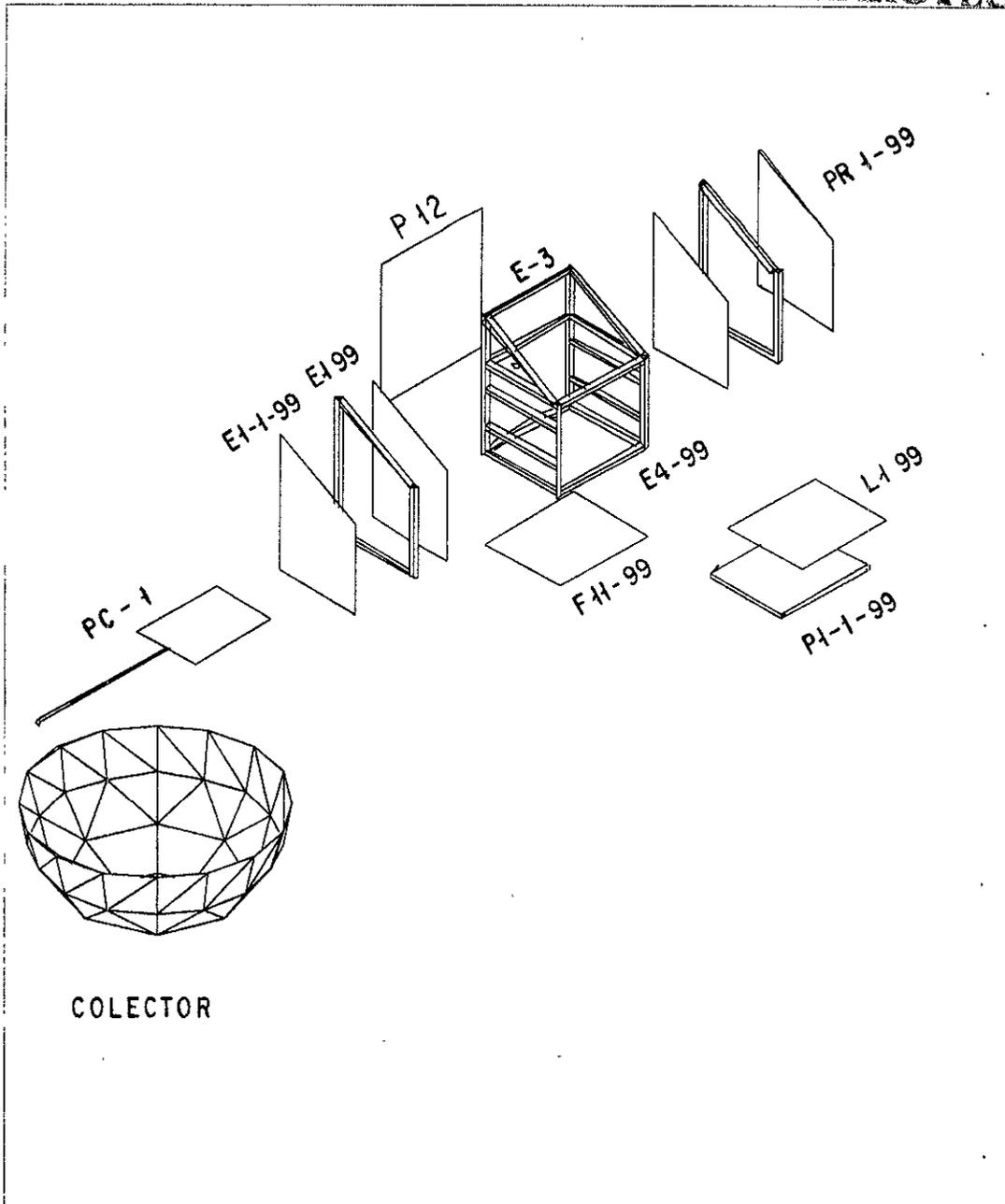
Colector

MET DE PROJ		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLERANCIAS	
					GENERALES	GEOMETRICAS
					IT11	
LAMINA		HCJA	MATERIAL			
A-4		/ /				
PARTE	AP	DC	HRMA	FECHA		
LABORO		CANTO				
REVISO		REYES				

PLANO DE ENSAMBLE

UNAV-DTA

PE 1-99



COLECTOR

MET DE PROJ		ESCALA	ACOTACION	TEXTURA	TOLEERANCIAS GENERALES GEOMETRICAS
AVNA	HOJA	MATERIAL			
<b>A-4</b>	1/1				
PARTECIPS	APRELIIDO	FIRMA	FECHA		
LABORC	JACINTO				
REVISO	REYES				
UNAM-DITAI			PE 99		

#### 4-E. Apéndice. Unidades de medición.

Concepto	Unidad
Energía Radiativa. Es la energía transportada por una onda electromagnética.	Julio.( J )
Flujo energético. Es la energía transportada por unidad de tiempo.	Watt. ( W )
Densidad de flujo. Es el flujo de energía que atraviesa al cuerpo por unidad de superficie.	Watt/metro cuadrado ( W/m <sup>2</sup> )

Unidades para medir energía radiante. (10).

#### 4-F. Apéndice. Glosario.

1. Humedad absoluta. Cantidad total de vapor de agua que contiene el aire.
2. Humedad relativa. Relación entre la cantidad de vapor que contiene el aire y el que podría contener estando saturado a la misma temperatura.
3. Radiativo. Relativo a los fenómenos de transferencia de calor por radiación electromagnética del sol.
4. Flujo radiativo. Flujo de energía transportada por radiación.
5. Bromatología. Ciencia que estudia a los alimentos y las transformaciones que experimenta en el organismo.

#### 4-G. Apéndice. Taxonomía.

Clasificación taxonómica del pasto "Poa Pratensis L."

Reino: Vegetal.

Clase: Liliopsida.

Subclase: Camenilidae.

Orden: Cyperales.

Familia: Poaceae.

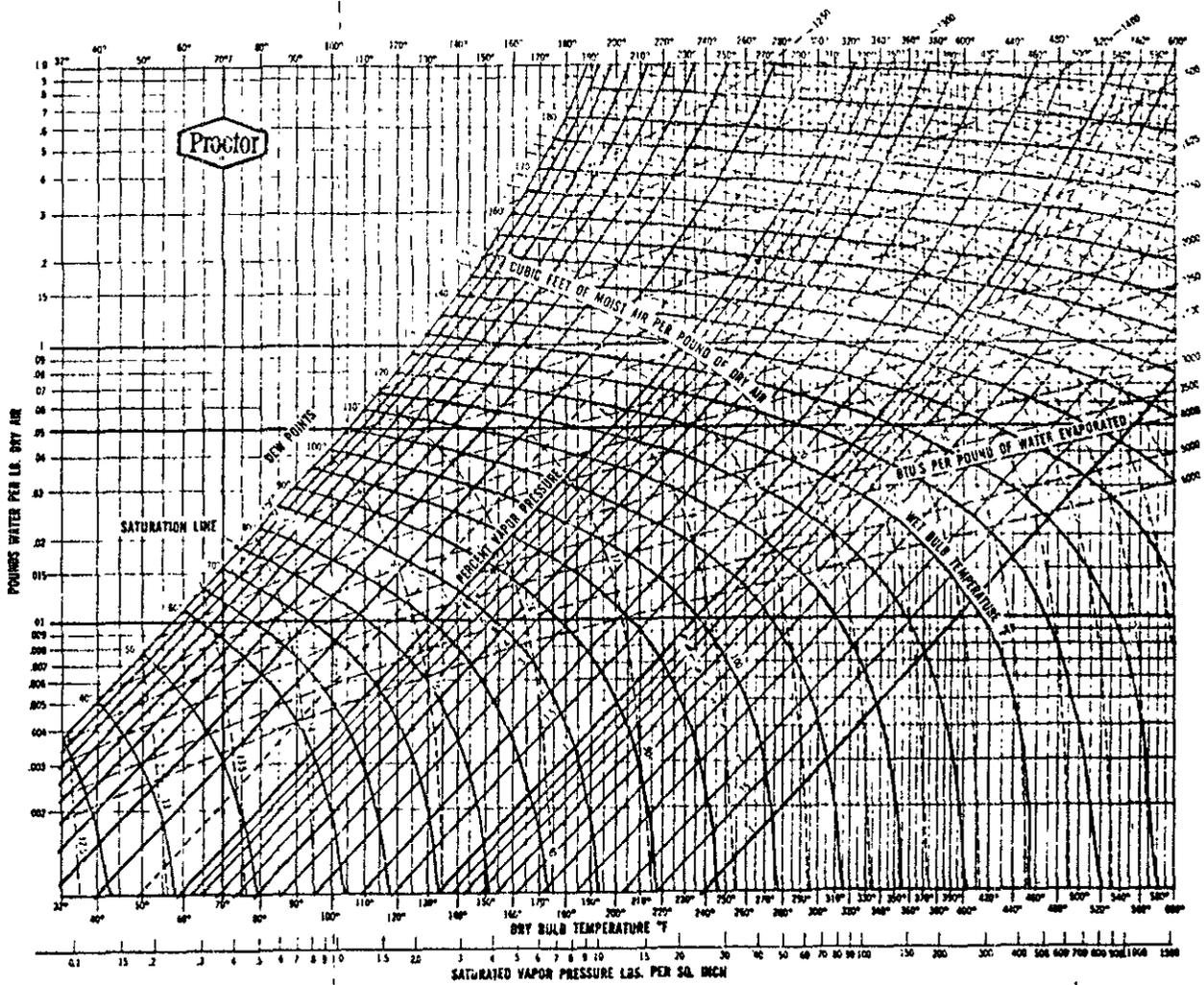
Genero: Poa.

Especie: Poa Pratensis L.

Clasificación realizada por el Biólogo Othon Alcántara Ayala, del herbario de la Facultad de Ciencias UNAM

# 4-H. Apéndice.

## Tabla de humedad



## 5. Bibliografía.

1. Aguilar, G.J.I. "Forrajes y plantas forrajeras". 1a ed. Editorial Bartolom, Turc. México 1946.
2. Juscafresa Baudillo "Forrajes, fertilizantes y valor nutritivo" 2<sup>º</sup> edición. Editorial Aedos  
Barcelona España 1979.
3. S. M. Boden "Técnica de la henificación acelerada". 1<sup>º</sup> Edición Editorial Acribia. Zaragoza España 1963.
4. J. Pistono Raschiere "Desecación de los productos vegetales". Ed. Reverte 1961 Barcelona España
5. Ulrich, K.T., Eppinger, S.D. "Product design and development". Mc Graw Hill. New York 1995.
6. J. F. Kreider, F. Kreith. "Solar heating and cooling. Active and pasive design", Second Edition. Hemisphere Publishing Corporation. 1982. Washington.
7. Has RAU. "Energía solar" Marchamo Boixareu Editores Barcelona. 1980 España
8. Sadik K., Yaman Y. "Convective heat transfer" Second Edition. Ed. CRC Press. London 1994.
9. Casanova, J.C. "Curso de energía solar". Secretariado de Publicaciones. Universidad de Valladolid. España 1993.
10. R. Almanza S., F. Muñoz G. "Ingeniería de la energía solar". El colegio Nacional. México D.F. 1994
11. A. S. Mujumdar "Advances in drying". 1 Ed. Hemisphere Publishing Corporation Washington D.C, U.S.A
12. Antonio Reyes Chumacero. "Termodinámica fenomenológica en sistemas cerrados y abiertos" Editorial Trillas. México D.F. 1976.
13. R. E. Larson, R.P. Hostetler, "Cálculo y geometría analítica". Tercera edición. McGraw-Hill México 1990.
14. C.H. Edwards, D.E. Penney "Cálculo con geometría analítica" Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Tercera Edición en Español 1996. México D.F.

15. Haberman Richard. "Elementary applied partial differential equations with fourier series and boundary value problems." Prince-Hall New Jersey 1980.
16. R. Kent Nagle, Edward B. Saff. "Fundamental of differential equations." Third Edition Addison Wesley Publishing Company
17. F.M. Ashby "Materials selection in Mechanical Design" Pergamon Press London 1992.
18. J. J. McKetta, W. A. Cunnigam. "Encyclopedia of Chemical Processing and Design" V.17 Ed. Marcel Dekker New York 1983.
19. J.P: Holman "Transferencia de calor." CECSA. México D.F. 1996.
20. Sadik, Yaman Y. " Convective heat transfer." Second Edition. CRC Press London 1994.