



8
2EJ

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR

FALLA DE ORIGEN

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A:
GERARDO CARAPIA ORTIZ**

**ASESOR:
ING. FILIBERTO LEYVA PIÑA**

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1995



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 está 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.

FALLA DE ORIGEN



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:
"Diseño de un secador solar"

que presenta al pasante: Gerardo Carapia Ortiz
con número de cuenta: 8456999-4 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 1 de Septiembre de 1995

PRESIDENTE	Ing. Filiberto Leyva Piña	
VOCAL	Ing. José Juan Contreras Espinosa	
SECRETARIO	Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez	
PRIMER SUPLENTE	Ing. Emilio Juárez Martínez	
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Bernardo G. Muñoz Martínez	

Con respeto para quienes
me dieron vida y cariño.
J. Carmen Carapia Aguilera,
Placida Ortiz de Carapia.

A mis hermanos, quienes con
sus consejos, apoyo, su
paciente espera y confianza
me hicieron llegar a feliz
término de la meta deseada.

A todas aquellas personas
que con su ayuda, ideas y
en cualquier otra forma
colaboraron conmigo, haciendo
posible este trabajo, en
especial a:
Felipe del Real y Cabrera.
Miguel Guevara C.
Marco A. Hernández R.
J. Luis Ayala Neira.

INDICE:	
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1	
Propiedades físicas y necesidad de almacenamiento del maíz.	
1.1 Almacenamiento.	4
1.2 Propiedades.	4
1.3 Determinación de la humedad de los granos.	8
CAPITULO 2	
Diseño del secador solar.	
2.1 Angulos solares.	10
2.2 Medición de la radiación.	12
2.3 Radiación diaria promedio sobre superficies inclinadas.	27
2.4 Radiación instantánea sobre superficies inclinadas.	28
2.5 Pérdidas de calor y reflectancia en el vidrio.	30
2.6 Transmitancia en el vidrio.	32
2.7 Absortancia en el vidrio.	33
2.8 Eficiencia óptica del colector.	34
2.9 Radiación que absorbe el colector.	34
2.10 Pérdidas de calor en el colector.	34
2.11 Determinación de la temperatura de la placa.	42
2.12 Cálculo de la temperatura de la cubierta.	43
2.13 Haciendo una iteración.	43
2.14 Calor útil.	44
1.- El calor útil que proporciona la placa al aire.	44
2.- El calor útil proporcionado utilizando el banco de barras, colocados, sobre la placa plana.	45
2.15 Determinación de la temperatura de salida del aire.	48
2.16 Determinación de la humedad relativa del aire.	49
CAPITULO 3	
Equipo complementario.	
1.- Extractor.	52
2.- Diámetro de la campana.	53
3.- Cálculo del eje.	53
CAPITULO 4	
Pruebas	57
APENDICE	63
CONCLUSIONES	72
BIBLIOGRAFIA	73

INTRODUCCION:

El alimento es un factor indispensable para la nutrición de todos los seres vivos y la lucha constante para obtenerlo, es una característica biológica de estos organismos. El hombre ha tenido que hacer frente desde tiempo inmemorial, a la competencia con los demás seres vivos por el aprovechamiento de aquellos productos alimenticios que les interesan mutuamente, para la conservación de su vida.

El ser humano requiere para subsistir el alimento que constituye la comida y bebida necesarios, pues sin ellos simplemente dejaría de existir; así tenemos que los alimentos se obtienen tanto del reino animal como del vegetal de donde se adquieren los nutrientes que combinados en una forma, proporcional permiten realizar las actividades diarias, ya que se requieren proteínas, minerales, carbohidratos, etc; es decir, de una dieta balanceada.

Ahora bien dada la necesidad del ser humano para que pueda desarrollar adecuadamente sus actividades, estimamos conveniente avocarnos al estudio de un sistema que nos permitiera aprovechar al máximo los alimentos de origen vegetal, concretamente en el secado y conservación de los granos.

Los granos y sus productos, constituyen una fuente de nutrimento para el hombre y para muchos otros organismos y su disponibilidad en un momento dado, significa la satisfacción de una necesidad esencial para el que pueda aprovecharlos primero.

La conservación de los granos alimenticios ha sido, es y será, motivo de preocupación del hombre por su significado en la dieta humana y por la necesidad de resguardarlos contra el peligro que significa su aprovechamiento por sus demás competidores.

El constante incremento de la población en el país reclama cada día mayores cantidades de alimento (granos y cereales), que satisfagan sus necesidades, la producción de dicho alimento sigue siendo inferior a lo que se requiere, provocando así necesidades cada vez más difíciles de satisfacer.

En la actualidad nuestra producción agrícola es insuficiente para satisfacer las necesidades planteadas por la población, situación que se agudiza si consideramos que el volumen total producido se ve afectado en un 25%, pérdida causada por su exceso de humedad y temperatura durante su almacenamiento, en las semillas almacenadas a granel, las áreas calientes por lo general se forman como resultado del alto contenido de humedad del grano que propicia el incremento del metabolismo, la presencia de insectos y poblaciones de hongos y bacterias, está circunstancia

nos obliga imperiosamente en la actualidad a investigar y lograr un desarrollo tecnológico en materia de secado de cereales. La energía solar puede constituir una solución adecuada a nuestro problema, porque proporciona la oportunidad de diversificar fuentes de energía primaria; reducir los costos de operación; evitar la gran pérdida de cereales que se tienen durante el almacenamiento; mejorar nuestra economía y nuestra independencia, ya que los alimentos tienen un carácter estratégico para evitar la injerencia extranjera en los asuntos internos de nuestro país.

La importancia del sol, es conocida desde tiempos muy remotos; los antiguos lo divinizaron y erigieron templos en su honor. Durante mucho tiempo se considero al sol como el centro del universo.

Todos los días nuestro planeta recibe del sol un caudal de energía (radiación solar), parte de esta energía es absorbida por el mar, la tierra, las nubes y la atmósfera, mientras que la mayoría es devuelta de nuevo al espacio. Del resto, una porción es consumida en el proceso de evaporación, precipitaciones, movimientos atmosféricos, reservando una mínima cantidad a la energía captada por la clorofila de las plantas verdes.

Toda esta energía interceptada por la tierra (173 billones de kilovatios), representa una fracción varios miles de veces menor que del total producido por el sol. La mayor parte se pierde en el espacio. Los rayos solares traen luz y calor, indispensables en la supervivencia de los seres vivos en todo el planeta. Directa o indirectamente el sol, produce todas las formas de energía que el hombre ha consumido desde el principio de su historia (eólica, maremotriz, hidráulica, combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas).

La energía solar es, una alternativa para el hombre, ya que ofrece y sobrepasa en miles de veces la demanda actual de energía para la humanidad. Una vez captada de alguna forma por el hombre, se puede emplear el calor conseguido para diversas aplicaciones (secado de cultivos, calentamiento del agua, evaporación de gases, hornos solares), pero también se puede realizar una conversión de esta energía transformándola en mecánica o eléctrica, sin olvidar y es muy importante, la conversión bioenergética, la cual consiste en transformar la energía luminosa, con la ayuda de la fotosíntesis, en vegetales que luego serán convertidos por procedimientos mixtos en energía calorífica o química.

Una de las ventajas de la energía solar es, que se considera inagotable y no contamina las cuales la hacen única con estas propiedades a las demás formas de energía, utilizadas por el hombre. Sus inconvenientes son, que no es muy grande su intensidad, tiene variaciones a lo largo del día, y se crea el

problema de su almacenaje, de cuya resolución depende todo el éxito del problema. Dicho lo anterior, y tomando en cuenta el agotamiento al cual se esta llegando, en las formas de energía actuales (carbón, petróleo, gas), y el peligro que representan los desechos radioactivos, almacenados en espera de una tecnología más avanzada, que nos permita obtener al máximo toda su capacidad energética. Nos lleva a la conclusión que la energía solar es rentable para el hombre, ya que, todos sus sistemas y aparatos funcionan con una apreciable sencillez, gracias a lo cual son susceptibles de mejorar rápidamente y aun costo mínimo.

CAPITULO 1

1.- PROPIEDADES FISICAS Y NECESIDAD DE ALMACENAMIENTO DEL MAIZ.

1.1.- ALMACENAMIENTO.

Como es físicamente imposible el consumo inmediato de la producción total de las cosechas de granos alimenticios, el hombre tiene que almacenarlas para consumirlas de acuerdo con sus necesidades nutricionales.

Es común que las áreas de mayor producción de granos se encuentren alejadas de los centros de consumo, lo cual implica el transporte y almacenamiento de esos productos en lugares estratégicos para su distribución oportuna cuando sean requeridos.

El mejoramiento de la técnica agrícola se ha reflejado en los últimos años en incrementos notables en el rendimiento de las cosechas de granos básicos alimenticios por unidad de superficie. Los rendimientos de hace 15 años de trigo, por ejemplo, de 800 kg/ha se ha triplicado; en el caso del maíz de un promedio de 450 kg/ha se ha progresado hasta el doble; en el frijol, de 300 a 800 kg/ha que se obtenían, en la actualidad se registran rendimientos de 500 a 1000 kg/ha. Como resultado de estos incrementos, se tiene la imperiosa necesidad de conservar y almacenar mayores volúmenes de granos alimenticios producidos, que forman la reserva necesaria para la alimentación de la población creciente.

La capacidad del aprovechamiento industrial de los granos y cereales es limitada y no es posible establecer, por ahora, las instalaciones que permitan industrializar volúmenes muy superiores a la capacidad actual, en las épocas de recolección o cuando los rendimientos sean altos. La inversión que representa la maquinaria industrial, muy específica, que sólo se emplea por cortas temporadas durante el año, constituyen un renglón oneroso que aumenta los costos de producción. Por lo tanto se hace absolutamente necesario almacenar estos granos, mientras van siendo industrializados, según las necesidades y la capacidad de las instalaciones.

La balanza económica gobernada por la ley de la oferta y la demanda, sugiere la conveniencia de tener existencias de granos y cereales en almacenamiento para evitar las variaciones de los precios y para asegurar el abastecimiento oportuno de esos productos cuando haya escasez de ellos. Esta necesidad de almacenar los granos y semillas asegura el mercado al agricultor y al consumidor ofrece el abastecimiento a sus necesidades de alimento.

Independientemente del uso de los granos y cereales, ya sea como alimento para el hombre y para los animales domésticos, así como semilla que asegure la producción de mejores cosechas en el futuro o como materia prima en la industria es necesario que se almacenen en forma ventajosa y por períodos variables de tiempo, para que se utilicen y consuman de acuerdo con las necesidades de la población.

El almacenamiento de los granos alimenticios es un proceso costoso que trae implícitos fuertes gastos y problemas de carácter muy complejo, pero es un requisito necesario y de una importancia decisiva para la nutrición humana. Los granos y cereales destinados a ser usados como semillas, como alimento o para la industria, están sujetos durante el período crítico de su almacenamiento a pérdidas variables, adicionales a las naturales, causadas principalmente por factores físicos o bióticos.

Los problemas relativos a la conservación de los granos son muy complejos, por la concurrencia de factores físicos, químicos, mecánicos y biológicos, y puede decirse que muchos de estos factores son específicos de ciertas regiones ecológicas del país; sin embargo, gran parte de la resolución de ellos descansa en la investigación y en el conocimiento de las causas que los originan.

1.2.- PROPIEDADES.

El grano y la semilla son partes constitutivas de organismos vivos que respiran y utilizan el oxígeno del aire, producen bióxido de carbono, agua y energía que se traduce en calor. Estas partes constitutivas tienen sus actividades vitales reducidas aun mínimo, es decir, se encuentran en estado de vida latente, por lo que, a simple vista, dan la impresión de hallarse sin vida. Por ser parte de organismos vivos, presentan resistencia a la descomposición por microorganismos y permiten que se les almacene en grandes volúmenes, por tiempos variables y sin deterioro o descomposición, siempre que las condiciones ambientales sean favorables para su conservación.

Todos los organismos vivos están sujetos a la influencia de factores físicos, químicos y bióticos del medio ambiente que los rodea. En el caso de los granos y de las semillas, los factores físicos tienen una influencia decisiva sobre su conservación. A los factores físicos como la temperatura y la humedad se les reconoce gran importancia, desde el punto de vista del almacenamiento, manejo y conservación de los granos y de las semillas, por la forma tan directa y transcendental en que ejercen su influencia sobre estos vegetales.

Existen tres propiedades de los granos y de las semillas que determinan, en gran parte, su comportamiento o reacción ante los factores ecológicos antes mencionados, estas propiedades son:

- 1) La baja conductividad térmica;
- 2) La capacidad de absorción del agua; y
- 3) La naturaleza porosa del grano.

1) LA BAJA CONDUCTIVIDAD TERMICA. Cada grano o semilla tiene, característicamente, una determinada conductividad térmica, es decir, cierta velocidad con la que el calor pasa de las zonas calientes hacia las más frías en la masa del grano, siendo diferente y específica, para los diversos tipos de granos o semillas. En el caso de los conductores sólidos, como los metales, el calor se desplaza del punto de calentamiento con una velocidad más o menos uniforme en todas direcciones e independientemente del tamaño y forma del conductor en particular. En el caso de los granos y de las semillas, la situación es diferente y la forma, el tamaño y la textura determinan en parte, la velocidad y conductividad térmica. En general, esta conductividad en los granos y semillas es muy baja y se puede comparar a la que posee el suelo o las maderas blandas (cedro, caoba, abeto, pino=0.13848 w/m°K, suelo=0.52 w/m°K). Esto aclara y explica que una vez producida una zona de calor en cualquier parte de la masa del grano, el calor se transmitirá con mucha lentitud hacia las áreas frías. Esta es la razón fundamental por la cual la temperatura alta causa tantos daños en los volúmenes de granos que se encuentran almacenados. Una concentración de calor genera una alta temperatura, la cual es dañina para la integridad física de la materia viviente.

Generalmente, los granos se almacenan en grandes volúmenes y dada su característica de baja conductividad térmica, cualquier elevación anormal de la temperatura puede ocasionar serios daños a los granos. En las semillas almacenadas a granel, las áreas calientes por lo general se forman como resultado del alto contenido de humedad del grano que propicia el incremento del metabolismo, la presencia de insectos y poblaciones de hongos y bacterias. La respiración y la producción de calor del grano, combinadas con las de los insectos y las de los microorganismos, producen, en conjunto, la elevación de la temperatura, lo cual afecta, en última instancia, al volumen total del grano. Bajo estas condiciones de calor excesivo, la muerte y la descomposición del grano o de las semillas se produce con cierta aceleración.

En una planta, como consecuencia de la acción de los granos y de las semillas, se forma un tipo de estructura que se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular.

En la estructura de las plantas, se forma un tipo de estructura que se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular.

En la estructura de las plantas, se forma un tipo de estructura que se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular.

En la estructura de las plantas, se forma un tipo de estructura que se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular.

En la estructura de las plantas, se forma un tipo de estructura que se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular. Esta estructura se forma en la zona de los granos y de las semillas y se denomina estructura celular.

3) LA MATERIA Y LA FORMA DEL GRANO. Los granos y semillas forman una estructura celular y se sabe que debido a esa

En las prácticas generales de manejo de los granos y de las semillas, debe tomarse muy en cuenta la conductividad térmica específica en la masa de cada tipo de grano para los fines de conservación. Hay diferentes prácticas que indican la forma de inactivar o impedir estos núcleos calientes, exponiendo esas áreas a temperaturas más frías mediante la aireación, eliminando así dichos núcleos y evitando el desarrollo de altas temperaturas, que finalmente deteriorarían los granos.

2) LA CAPACIDAD DE ABSORCION DEL AGUA. El clima ejerce su influencia en el contenido en humedad de los granos en todas sus fases; antes de la recolección, entre ésta y el momento de su almacenado, y durante éste último. Existe una relación entre la humedad relativa atmosférica y el contenido en humedad del grano. En otras palabras, dadas una temperatura y humedad atmosféricas, el contenido en humedad de los granos, se mantiene a un nivel, que no es posible reducir por medios naturales (sol intenso, viento fresco y aire seco).

Ahora bien, la humedad relativa del aire no es un factor constante. Cambia cada hora, lo cual puede comprobarse haciendo mediciones a lo largo del día. Normalmente, es máxima cuando la temperatura es mínima, al amanecer, y es mínima, cuando la temperatura es máxima, alrededor de media tarde. En los días nublados la humedad aumenta; cuando más varía, es en los días de calma y sol.

Con las variaciones que la humedad relativa atmosférica experimenta día tras día y hora tras hora, el contenido en humedad de los granos, varía mucho más lentamente que el contenido en el aire atmosférico y mucho más, cuando está almacenado, ya que entonces y más que nunca, tiende a mantener un equilibrio con el promedio de humedades relativas del día, más bien que con valores de humedad momentáneos.

Así, el agua se encuentra retenida en los granos y semillas en tres formas diferentes: "agua libre", retenida en los espacios intergranulares, siendo las moléculas de las sustancias que la soportan, las que sirven para fijarlas en esos sitios; "agua absorbida", la cual se encuentra asociada con la materia absorbente del grano, existiendo una relación entre las moléculas del agua y las de las sustancias que constituyen el grano; "agua combinada", que como su nombre lo indica se encuentra unida químicamente y forma parte integral de las moléculas que constituyen los materiales de reserva o entran en la formación de alguno de los órganos del grano o semilla.

3) LA NATURALEZA POROSA DEL GRANO. Los granos y semillas tienen una estructura porosa y se sabe que debido a esa

porosidad, existe el fenómeno de la difusión del aire a través de la masa. Esta difusión del aire, a través de la masa, es muy lenta y por sí sola, no es capaz de eliminar cualquier exceso de humedad o de temperatura de la masa del grano, cuando se encuentra éste bajo buenas condiciones de almacenamiento.

1.3.- DETERMINACION DE LA HUMEDAD DE LOS GRANOS.

En el proceso de la determinación de la humedad de los granos y semillas, un factor muy importante que debe tomarse en cuenta es la muestra que se analiza. Es indispensable que las muestras tomadas en un lote dado, sean las más representativas de éste, para poder determinar la humedad con la mayor confianza, e independientemente del método que se siga en esta operación. Las muestras de granos o semillas, de 1000 gramos generalmente, deben ser colocadas en latas herméticas, o en bolsas de plástico, que se cierren perfectamente, y no deben abrirse sino cuando se determine la humedad de ellas.

Existen varios métodos para determinar la humedad de los granos y semillas, siendo los siguientes los más usuales e importantes:

1.- DESTILACION. La remoción de la humedad del grano por este procedimiento, se hace calentando el grano en aceite, y el volumen o peso del agua del grano, se condensa del vapor desprendido de la muestra.

A) METODO DE BROWN Y DUVEL. En un matraz se coloca una muestra de 100 gramos de grano completo, se le agrega 150 ml de aceite no volátil y se calienta la mezcla hasta una temperatura dada para cada tipo de grano (trigo a 180°C). Alcanzada esta temperatura, se inclina el matraz ligeramente y se deja enfriar la mezcla de grano y aceite hasta los 160°C. La cantidad de agua que se junta en la probeta que la recibe después de atravesar el refrigerante, se lee en milímetros y se reporta como porcentaje de humedad de la muestra de grano considerada.

B) DESTILACION CON TOLUENO O BENCENO. Aunque se aplica a muchos cereales, este método se emplea más para el maíz y sus productos. La muestra de 20 a 30 gramos de grano se muele finamente en un molino y se coloca en un matraz al que se le agrega 75 ml de tolueno o benceno. Se procede a la destilación y el agua se recibe en un tubo especial, de donde posteriormente se mide.

2.- METODO DE HORNO O DE ESTUFA. En este sistema, la determinación de la humedad del grano se hace secando la muestra y tomando su peso antes y después del secado. El contenido de humedad se da en base a la pérdida de agua. Los hornos empleados pueden ser calentados con aire caliente, que circula en paredes cerradas o en la camisa del horno, o también, puede emplearse agua caliente, circulando entre dichas paredes. Las muestras se introducen al horno, y después del tiempo de secado se reciben en un desecador mientras se enfrían, para luego pesarse y determinar su pérdida de agua.

3.- MATERIALES DESECANTES. Este procedimiento consiste en colocar la muestra de grano molido en un espacio cerrado junto con un activo material desecante, de tal manera que la humedad del grano molido pase al desecante, hasta que se obtenga un peso constante de la muestra de grano en cuestión. El ácido sulfúrico anhidro es un material empleado en espacio cerrado como desecante de granos, en este método.

4.- METODOS ELECTRICOS. Los métodos eléctricos están basados en dos principios físicos conocidos, que son aprovechados en la construcción de aparatos medidores de la humedad de los granos y semillas. En general, estos métodos son rápidos, confiables y muy utilizados en operaciones rutinarias en el manejo de los granos y semillas, pero siempre deben ser calibrados en comparación con los métodos considerados como oficiales. Los principios físicos en los cuales se basan, son los siguientes; tanto la resistencia eléctrica como las propiedades dieléctricas de los materiales dependen de su contenido de humedad.

CAPITULO 2

DISEÑO DEL SECADOR SOLAR.

2.1.- ANGULOS SOLARES.

Para poder calcular la energía disponible necesitamos conocer las coordenadas del lugar; por lo tanto, Salvatierra, Gto., se encuentra en la Latitud Norte de 20° (ϕ) y Meridiano de 100° .

Ahora necesitamos conocer el movimiento aparente del sol durante todo el año, para esto se hace los siguientes cálculos; como demostración se desarrolla para el mes de ENERO:

Cálculo de la radiación diaria promedio mensual extraterrestre para el 17 de enero (día en que la radiación es aproximadamente igual a la promedio mensual).

Declinación (δ): Define la posición angular del sol al medio día solar es decir, en el momento en que el sol esta más alto en el firmamento con respecto al plano del ecuador, se calcula con la siguiente relación;

$$\delta = 23.45 \text{ Sen}(360(284+n/365)) \dots \dots \dots (1)$$

Nota: "n" es el número del día del año, para este caso es 17 y toma valores de acuerdo a la Tabla 2.1.

$$\delta = -20.91^{\circ}.$$

Tabla 2.1. Número del día del año.

	Fecha	Día en año
Enero	17	17
Febrero	16	47
Marzo	16	75
Abril	15	105
Mayo	15	135
Junio	11	162
Julio	17	198
Agosto	16	228
Septiembre	15	258
Octubre	15	288
Noviembre	14	318
Diciembre	10	344

Angulo horario (w): Es igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de 15° de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes (360°=24hrs).

Nota: Para los cálculos determine que fueran a las 11 am solar, por lo tanto el ángulo horario es; w=15°.

Al haber determinado la declinación (δ), la latitud (φ) y el ángulo horario (w), se puede conocer la Altura solar (α) y Acimut (ω) de acuerdo a las siguientes fórmulas;

Todos los ángulos siguientes son con respecto al eje sur.

Altura solar.

$$\alpha = \text{Sen}^{-1}(\text{Cos}\delta \text{Cos}\phi \text{Cos } w + \text{Sen}\delta \text{ Sen}\phi) \dots \dots \dots (2)$$

$$\alpha = 46.53^\circ$$

Acimut.

Definición: Angulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.

$$\omega = \text{Sen}^{-1}(\text{Cos}\delta \text{ Sen } w / \text{Cos}\alpha) \dots \dots \dots (3)$$

$$\omega = 20.57^\circ$$

Angulo horario sobre una superficie horizontal (la hora en que sale el sol en el horizonte) ws, se determina de la siguiente forma:

$$ws = \text{Cos}^{-1}(-\text{Tan}\phi \text{ Tan}\delta) \dots \dots \dots (4)$$

$$ws = 82^\circ = 1.43 \text{ radianes.}$$

Ahora podemos calcular la longitud del día, es decir, el máximo número de horas de asoleamiento diario con la siguiente fórmula:

$$Ts = (2/15) ws \dots \dots \dots (5)$$

Nota: ws°

$$Ts = 10.93 \text{ horas de asoleamiento.}$$

Angulo horario sobre una superficie inclinada (ws'), se determina con la siguiente fórmula:

$$ws' = \text{Cos}^{-1}(-\text{Tan}(\phi - s) \text{ Tan}\delta) \dots \dots \dots (6)$$

Nota: "s" es el ángulo de inclinación del colector y toma valores de acuerdo a la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Angulo de inclinación del colector, para una mayor captación de la energía solar.

MES	s°
Enero	30
Febrero	30
Marzo	20
Abril	20
Mayo	20
Junio	10
Julio	10
Agosto	10
Septiembre	30
Octubre	30
Noviembre	30
Diciembre	30

Nota: Los valores de "s" dependen de la estación del año, y de la latitud (ϕ) del lugar, así en invierno se recomienda que el colector tenga una inclinación de $\phi+10^\circ$ y en verano $\phi-10^\circ$, algunos valores de "s" son el valor de la latitud (ϕ).

$ws'=93.86^\circ=1.63$ radianes, 6.25 horas solar (al amanecer).

$T \text{ solar} = T \text{ oficial} + E + 4(l \text{ ref} - l \text{ loc}) \dots \dots \dots (7)$

Nota: Ver Tabla 2.3, T es el tiempo, E es la ecuación del tiempo y l es la longitud tanto de referencia como local.

2.2.- MEDICION DE LA RADIACION.

Para la radiación global promedio terrestre sobre una superficie horizontal (\bar{H}^G) del Estado de Guanajuato, observamos la copia proporcionada del Libro de José A. Manrique, "Energía Solar", así obtenemos:

$$\bar{H}^G = 380 \text{ cal/cm}^2 \text{ día } (3.413 \text{ BTU/860.42 cal}) (746 \text{ w/2545BTU})$$

$$(100\text{cm/m})^2 \dots \dots \dots (8)$$

$$\bar{H}^G = 4418.35 \text{ w/m}^2 \text{ día}$$

La radiación extraterrestre diaria promedio (\bar{H}^o) para una superficie horizontal se calcula con la siguiente fórmula:

$$\bar{H}^o = (24/\pi) I_{cs} (1 + 0.033 \cos(360 \text{ n}/365)) (\text{Sen } ws \text{ Cos } \phi \text{ Cos } \delta + ws \text{ Sen } \phi \text{ Sen } \delta) \dots \dots \dots (9)$$

Nota: "Ics" es la constante solar con un valor de 1353 w/m^2 .

Tabla 2.3. Valores de la ecuación del tiempo en distintos días del año.

Fecha	Corrección de tiempo		Fecha	Corrección de tiempo			
	min	seg		min	seg		
Enero	1	-3	22	Julio	1	-3	23
	8	-4	04	8	-4	33	
	15	-9	12	15	-5	28	
	22	-11	28	22	-6	02	
Feb	29	-13	07	29	-6	11	
	1	-13	38	Agost	1	-6	07
	8	-14	23	8	-5	37	
	15	-14	27	15	-4	38	
Mar	22	-13	54	22	-3	12	
	1	-12	47	29	-1	21	
	8	-11	12	Sep	1	0	27
	15	-9	16	8	2	07	
Abril	22	-7	07	15	4	20	
	29	-4	53	22	6	54	
	1	-3	57	29	9	23	
	8	-2	08	Oct	1	10	04
Mayo	15	0	13	8	12	17	
	22	1	23	15	14	08	
	29	2	35	22	15	30	
	1	2	58	29	16	16	
Jun	8	3	32	Nov	1	16	25
	15	3	39	8	16	15	
	22	3	20	15	15	25	
	29	2	37	22	13	54	
Dic	1	2	13	29	11	47	
	8	1	05	1	11	05	
	15	0	14	8	8	19	
	22	-1	38	15	5	12	
29	-3	00	22	1	53		
			29	1	29		

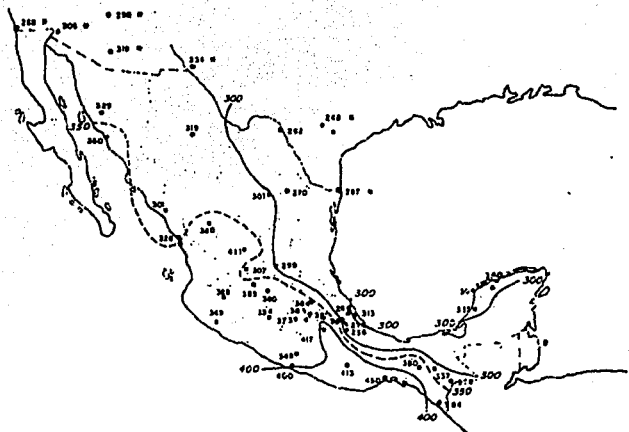


Fig. 1. Radiación global diaria promedio en el mes de enero (cal/cm².día).

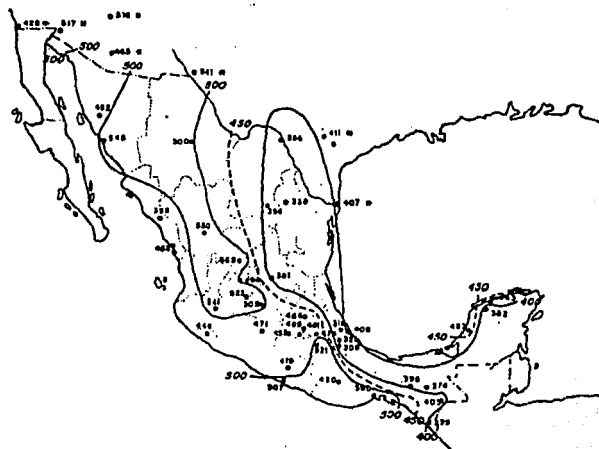


Fig. 2. Radiación global diaria promedio en el mes de febrero
(cal/cm2.día)

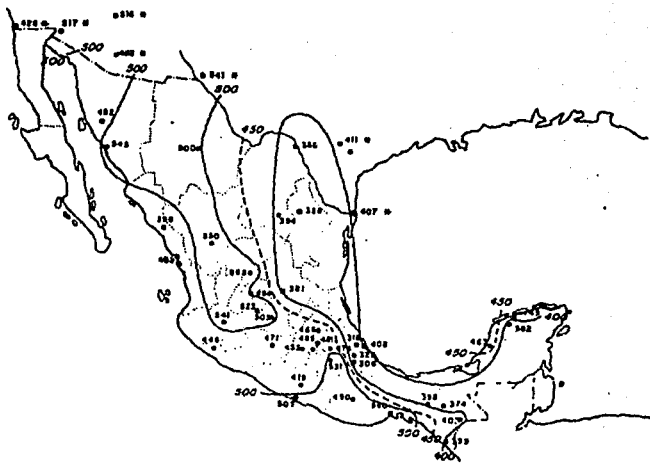


Fig. 3. Radiación global diaria promedio en el mes marzo (cal/cm².día).

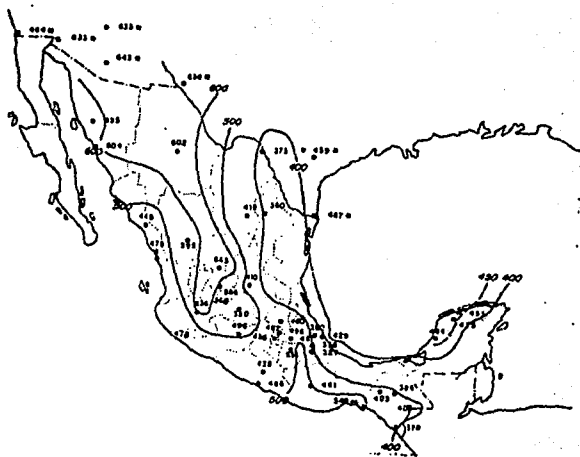


Fig.4. Radiación global diaria promedio en el mes de abril (cal/cm².día).

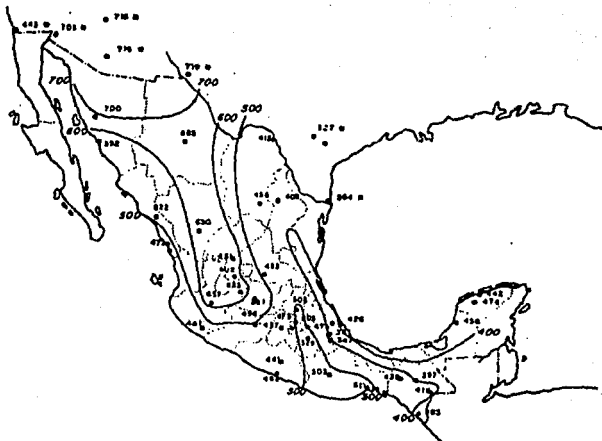


Fig.5. Radiación global diaria promedio en el mes de mayo (cal/cm².día).

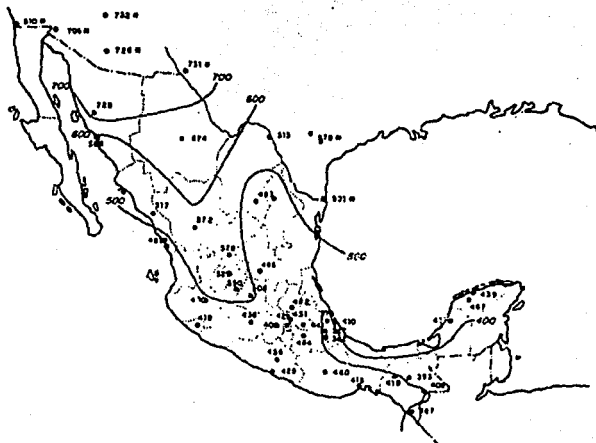


Fig.6. Radiación global diaria promedio en el mes de junio (cal/cm².día).



Fig.7. Radiación global diaria promedio en el mes de julio (cal/cm².día).

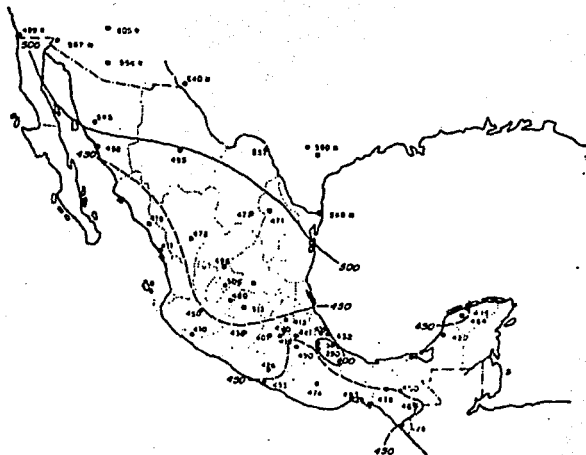


Fig.8. Radiación global diaria promedio en el mes de agosto ($\text{cal/cm}^2.\text{día}$).

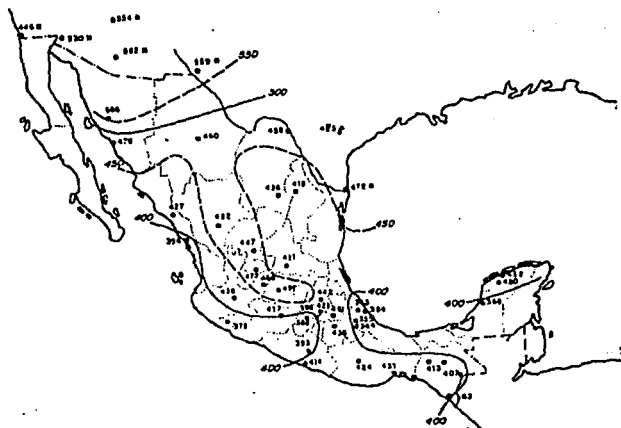


Fig.9. Radiación global diaria promedio en el mes de septiembre (cal/cm².día).

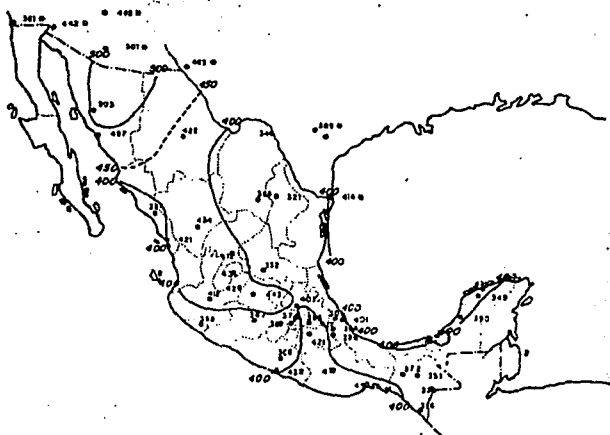


Fig.10. Radiación global diaria promedio en el mes de octubre (cal/cm².día).

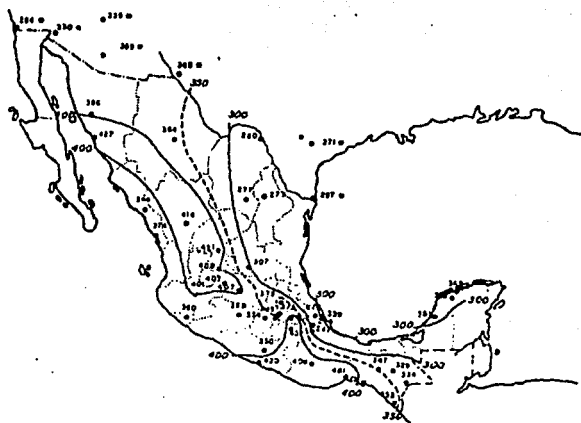


Fig.11. Radiación global diaria promedio en el mes de noviembre (cal/cm².día).



Fig.12. Radiación global diaria promedio en el mes de diciembre (cal/cm2.día).

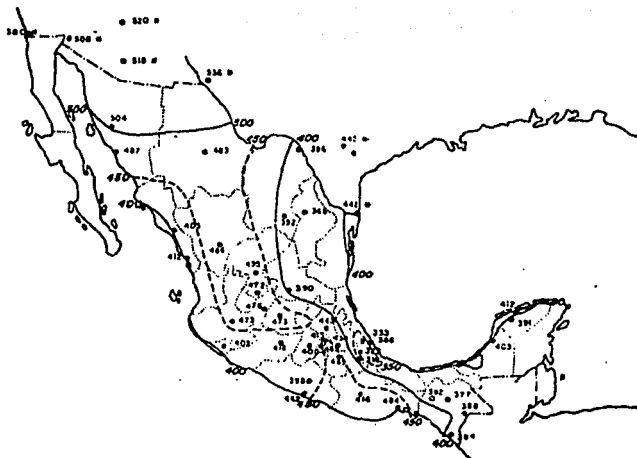


Fig.13. Radiación global diaria promedio en el mes de año (cal/cm².día).

$$\bar{H}_o = 7407.4923 \text{ w/m}^2 \text{ día}$$

Evaluamos " \bar{K}_t " (coeficiente de nubosidad), que es el cociente de la radiación global diaria promedio en un mes a la radiación extraterrestre diaria promedio sobre una superficie horizontal, es decir:

$$\bar{K}_t = \bar{H}_G / \bar{H}_o \dots \dots \dots (10)$$

$$\bar{K}_t = 0.5964$$

Liu y Jordan, así como Page, sugieren la siguiente relación para evaluar:

$$\bar{I}_{dh} / \bar{H}_G = (1.39 - 4.027\bar{K}_t + 5.531\bar{K}_t^2 - 3.108\bar{K}_t^3) \text{ (Liu y Jordan)} \dots \dots \dots (11)$$

$$\bar{I}_{dh} / \bar{H}_G = (1 - 1.13\bar{K}_t) \text{ (Page)} \dots \dots \dots (12)$$

Nota: " \bar{I}_{dh} " es la componente de radiación difusa sobre un plano horizontal en promedio.

$$\bar{I}_{dh} / \bar{H}_G = 0.3259 \text{ (Page)}$$

2.3.- RADIACION DIARIA PROMEDIO SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.

Primeramente evaluamos los factores de conversión para las componentes tanto directa, como difusa y la reflejada sobre una superficie inclinada (colector), de acuerdo a las siguientes fórmulas:

Radiación directa (\bar{R}_b):

$$\bar{R}_b = (w_s' \text{ Sen} \delta \text{ Sen}(\phi - s) + \text{Sen } w_s' \text{ Cos} \delta \text{ Cos}(\phi - s)) / (w_s \text{ Sen} \delta \text{ Sen} \phi + \text{Sen } w_s \text{ Cos} \delta \text{ Cos} \phi) \dots \dots \dots (13)$$

Radiación difusa (\bar{R}_d):

$$\bar{R}_d = \frac{1}{2}(1 + \text{Cos } s) \dots \dots \dots (14)$$

Radiación reflejada (\bar{R}_r):

$$\bar{R}_r = (1 - \text{Cos } s) + 2\beta \dots \dots \dots (15)$$

Nota: " β " es el albedo para distintas superficies de acuerdo con la Tabla 2.4.

Definición: Albedo; razón entre la energía luminosa que difunde por reflexión una superficie y la energía incidente.

 Tabla 2.4. Albedo de distintas superficies.

Superficies	Albedo
Desierto	0.24 - 0.28
Campos, varios tipos	0.03 - 0.25
Bosque, verde	0.03 - 0.10
Pasto, varias condiciones	0.14 - 0.37
Suelo, común	0.07 - 0.20
Moho, negro	0.08 - 0.14
Arena, seca	0.18 - 0.40
Arena, húmeda	0.09 - 0.18
Hielo o nieve	0.46 - 0.86
Agua ($\alpha=47^\circ$)	0.02
Agua ($\alpha=5.5^\circ$)	0.71

Nota: seleccione suelo común.

Por lo tanto, los resultados de los factores de la radiación son:

$$\bar{R}_b = 1.4666$$

$$\bar{R}_d = 0.933$$

$$\bar{R}_r = 0.9569$$

Ahora procedemos a evaluar \bar{R} , que es el cociente de la radiación total diaria promedio en un mes para una superficie inclinada a la radiación global promedio terrestre sobre una superficie horizontal en un mes, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$\bar{R} = (1 - \bar{I}_{dh}/\bar{H}G) \bar{R}_b + (\bar{I}_{dh}/\bar{H}G) \bar{R}_d + \bar{R}_r \dots \dots \dots (16)$$

$$\bar{R} = 2.2495$$

Finalmente calculamos la radiación total (\bar{H}_t) diaria promedio en un mes para una superficie inclinada, la cual llega al colector, con la siguiente fórmula:

$$\bar{H}_t = \bar{R} \bar{K}_t \bar{H}_o \dots \dots \dots (17)$$

$$\bar{H}_t = 10007.706 \text{ w/m}^2 \text{ día}$$

2.4.- RADIACION INSTANTANEA SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS.

Para evaluar el comportamiento térmico a lo largo del día de un sistema de conversión de energía solar (colector), se hace

necesario conocer también los valores instantáneos de radiación total (Ht) sobre cualquier superficie. Aun cuando obviamente estos valores pueden determinarse experimentalmente, en muchas circunstancias no se dispone de la instrumentación necesaria; o más comúnmente, se desea que sean valores representativos de un día típico, evitándose así la irregularidad de las condiciones meteorológicas que puedan prevalecer en un día específico.

Procedemos a evaluar los factores de conversión siguientes:

$$rd = Idh / \bar{Idh} = (\pi \cos w - \cos ws) / (T \text{ Sen } ws - ws \cos ws) \dots (18)$$

$$rG = HG / \bar{HG} = (\pi / T) (a + b \cos w) ((\cos w - \cos ws) / (\text{Sen } ws - ws \cos ws)) \dots (19)$$

Nota: "T" es la longitud del día 24 horas.

"a" y "b" son parámetros los cuales están relacionados con las siguientes fórmulas:

$$a = 0.409 + 0.5016 \text{ Sen}(ws - 1.047) \dots (20)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \text{ Sen}(ws - 1.047) \dots (21)$$

Donde "ws" esta en radianes y al hacer la resta se cambia el resultado a grados.

"Idh" es la componente de radiación difusa sobre un plano horizontal en cualquier instante.

"HG" es la radiación global terrestre sobre una superficie horizontal en cualquier instante.

Evaluando:

$$rd = 0.12284$$

$$a = 0.59645$$

$$b = 0.48275$$

$$rG = 0.14535$$

Ahora debemos conocer el valor de "Idh", por lo tanto necesitamos evaluar de la siguiente manera, tomando el valor de las ecuaciones 7, 10 y 11 por lo tanto:

$$\bar{Idh} = \bar{HG} \times 0.305841 \text{ (valor de la ecuación 12)} \dots (22)$$

$$\bar{Idh} = 1309.157 \text{ w/m}^2 \text{ día}$$

Despejando Idh de la ecuación 18;

$$Idh = rd (\bar{Idh}) \dots (23)$$

$$I_{dh}=176.882 \text{ w/m}^2$$

Despejando "HG" de la ecuación 19,

$$HG=rG(\bar{HG})\dots\dots\dots(24)$$

$$HG=642.5606 \text{ w/m}^2$$

Ahora podemos conocer la radiación instantánea sobre el colector inclinado (H_t), con la siguiente fórmula:

$$H_t=(HG-I_{dh})R_b+(I_{dh})R_d+(HG)R_r\dots\dots\dots(25)$$

$$H_t=1462.861 \text{ w/m}^2$$

2.5.- PERDIDAS DE CALOR Y REFLECTANCIA EN EL VIDRIO.

En cualquier sistema de conversión de energía fototérmica se busca captar la energía solar y transformarla en calor útil hacia algún medio de trabajo, agua, aire u otro fluido. También se busca en algunas aplicaciones que la temperatura de operación del sistema sea lo suficientemente alta para que su disponibilidad termodinámica sea satisfactoria. Tal es el caso en sistemas de bombeo de agua o generación de electricidad que hacen uso de un ciclo Rankine para su operación. Para nuestro caso el cual es el secado de granos se requiere que el fluido de trabajo (aire), tenga una temperatura de operación no muy alta aproximadamente entre unos 10°C por arriba de la del medio ambiente.

Un simple balance de energía para un colector, señala que una parte de la energía solar incidente se pierde hacia los alrededores como calor, otra fracción se aprovecha calentando el medio de trabajo (agua, aire, etc), y una fracción es acumulada. En todo diseño de ingeniería se busca disminuir las pérdidas de calor hacia los alrededores intentando siempre lograr el máximo aprovechamiento de energía solar con el mínimo costo posible. Por supuesto que lo anterior no siempre es factible de lograr. Sin embargo, las investigaciones científicas que se realizan actualmente en el campo de los materiales coadyuvan al logro del objetivo antes enunciado.

En las superficies transparentes, a la radiación incidente, la suma de la absorbancia, la reflectancia y la transmitancia debe ser igual a la unidad.

La teoría electromagnética permite predecir la reflectancia monocromática en la dirección especular de superficies pulidas que se encuentran física y químicamente limpias. La energía radiante que incide o emana de una superficie especular puede descomponerse en dos componentes de polarización; una paralela y otra perpendicular al plano de incidencia.

Ahora debemos definir los ángulos que se emplearán en el análisis de la reflectancia y transmitancia de la radiación especular, dichos ángulos son; el ángulo de incidencia (ϕ_i) y el ángulo de refracción (ϕ_r). Ambos están relacionados entre sí con los índices de refracción de los medios por la ley de Snell, así tenemos la siguiente fórmula:

$$\text{Sen}(\phi_i) / \text{Sen}(\phi_r) = n \dots \dots \dots (26)$$

Nota: "n" es el índice de refracción y toma valores de acuerdo a la Tabla 2.5.

 Tabla 2.5. Índice de refracción de distintas sustancias en el intervalo visible.

Material	Índice de refracción
Aire	1.00
Vidrio (tipo para colector)	1.50 - 1.52
Plexiglas	1.49
Mylar	1.64
Tedlar	1.45
Agua (líquida)	1.33
Agua (sólida)	1.31

Ahora determinamos, el ángulo de incidencia (ϕ_i) con la siguiente fórmula:

$$\phi_i = \text{Cos}^{-1}(\text{Cos} \delta \text{Cos}(\phi - s) \text{Cos} w + \text{Sen} \delta \text{Sen}(\phi - s)) \dots \dots \dots (27)$$

$$\phi_i = 18.088^\circ$$

Ahora calculamos el ángulo de refracción (ϕ_r), despejamos de la ecuación 26, así tenemos que:

$$\phi_r = \text{Sen}^{-1}(\text{Sen}(\phi_i) / n) \dots \dots \dots (28)$$

$$\phi_r = 11.945^\circ$$

Teniendo los ángulos de incidencia, y el de refracción procedemos a evaluar, la reflectancia especular, de las componentes de polarización perpendicular y paralela.

La polarización perpendicular (P^\perp) de la reflectancia se calcula con la fórmula:

$$P^\perp = [(\text{Sen}^2(\phi_i - \phi_r)) / (\text{Sen}^2(\phi_i + \phi_r))] \dots \dots \dots (29)$$

$$P^\perp = 0.04571$$

La polarización paralela (P^p) de la reflectancia se calcula con la fórmula:

$$P^p = [(\text{Tan}^2(\phi_i - \phi_r)) / (\text{Tan}^2(\phi_i + \phi_r))] \dots \dots \dots (30)$$

$$P_p = 0.03465$$

Con las polarizaciones tanto perpendicular como la paralela, se calcula la reflectancia especular monocromática (R'), con la fórmula:

$$R' = 1/2 (P_L + P_p) \dots \dots \dots (31)$$

$$R' = 0.04018$$

2.6.- TRANSMITANCIA EN EL VIDRIO.

La transmitancia en el vidrio, se compone en dos partes, una debida a la reflexión y otra a la absorbtividad del mismo vidrio, así se pueden determinar de acuerdo a las siguientes expresiones:

Transmitancia debida a la reflexión (τ_r).

$$\tau_r = \frac{1}{2} \{ [1 - \text{Sen}^2(\phi_i - \phi_r) / 1 + \text{Sen}^2(\phi_i + \phi_r)] + [1 - \text{Tan}^2(\phi_i - \phi_r) / 1 + \text{Tan}^2(\phi_i + \phi_r)] \} \dots \dots \dots (32)$$

$$\tau_r = 0.7656$$

Transmitancia debida a la absorción (τ_a).

$$\tau_a = e^{-kL} \dots \dots \dots (33)$$

Nota: "k" es el coeficiente de extinción, y toma valores de acuerdo a la Tabla 2.6.

"L" es la longitud de la trayectoria que sigue la radiación en el medio, toma valores de acuerdo al ángulo de refracción (ϕ_r), de cada mes incluyendo el espesor del vidrio. La siguiente fórmula calcula el valor de "L":

$$L = t / \text{Cos}(\phi_r) \dots \dots \dots (34)$$

"t" es el espesor del vidrio (t=0.4cm).

$$L = 0.4088$$

 Tabla 2.6. Valores típicos del coeficiente de extinción para aplicaciones solares.

	k
Poliétileno	1.65cm ⁻¹
Vidrio ordinario para ventana	0.3
Vidrio claro (0.01% Fe ₂ O ₃)	0.04
Vidrio absorbedor de calor	1.3 - 2.7

Sustituyendo en la ecuación 33;

$$r_a = 0.8845$$

Con los valores de la transmitancia, debida a la reflexión como a la absorción del vidrio, se calcula la Transmitancia total (τ), con la fórmula:

$$\tau = r_a r_r \dots \dots \dots (35)$$

$$\tau = 0.7656$$

2.7.- ABSORTANCIA EN EL VIDRIO.

En el caso de superficies opacas la suma de la absorptancia y la reflectancia debe ser igual a la unidad. Sin embargo, si la superficie es transparente a la radiación incidente, la suma de la absorptancia, reflectancia y la transmitancia debe ser igual a la unidad, así tenemos que:

$$\text{Absortancia}(\alpha) = 1 - \text{Reflectancia}(R') - \text{Transmitancia}(\tau) \dots (36)$$

$$\alpha = 0.28272$$

2.8.- EFICIENCIA OPTICA DEL COLECTOR.

Un parámetro sumamente importante en el diseño y evaluación de los colectores es el producto de ($\tau\alpha$) del conjunto vidrio-placa de absorción. Una fracción de $\tau\alpha$ de la energía incidente sobre el vidrio del colector se absorbe en la placa de absorción, mientras que una fracción $\tau(1-\alpha)$ regresa de nuevo por reflexión, probablemente difusa, hacia el vidrio. Una cantidad $\tau(1-\alpha)R_d$ se refleja de nuevo en el vidrio hacia la placa de absorción. En esta última se absorbe una fracción $\tau\alpha(1-\alpha)R_d$ y el proceso continua, así llegamos a la fórmula para calcular la eficiencia óptica (η):

$$\eta = \tau\alpha / (1 - (1-\alpha)R_d) \dots \dots \dots (37)$$

Nota: " R_d " es la reflectancia difusa, y se determina suponiendo condiciones de reflexión especular en la cubierta para un ángulo de incidencia de 60° . Así, para 1, 2, 3 o 4 cubiertas (vidrios), toma valores de 0.16, 0.24, 0.29 y 0.32, respectivamente.

Por lo tanto, evaluando la ecuación 37 para nuestro colector que es de un solo vidrio, tenemos:

$$\eta = 0.2162$$

2.9.- RADIACION QUE ABSORBE EL COLECTOR.

Teniendo la radiación total (Ht) que llega al colector inclinado a cada instante y la eficiencia óptica (η) del mismo colector, se obtiene la radiación que absorbe (S) en la placa de absorción con la fórmula:

$$S = Ht (\eta) \dots \dots \dots (38)$$

$$S = 316.27 \text{ w/m}^2$$

2.10.- PERDIDAS DE CALOR EN EL COLECTOR.

Los colectores planos encuentran múltiples aplicaciones en distintos procesos de conversión de energía solar. Aun cuando están limitados a temperaturas de operación inferiores a los 100°C aproximadamente, entre sus ventajas en comparación con los de enfoque es que aprovechan la radiación tanto directa como la reflejada y la difusa, no necesitan de un seguimiento continuo del sol, pueden constituir una parte integral del techo en algunas edificaciones, etc. En el secado de granos, los colectores planos, son utilizados para calentar el aire 10°C por arriba de la temperatura del medio ambiente, ofrecen la ventaja de que pueden ocuparse en los días nublados (radiación difusa), también se mantiene una temperatura adecuada al grano, con lo cual el grano no absorbe humedad.

Son varios los parámetros más importantes en el diseño de un colector solar. Es importante conocer lo siguiente en cuanto al colector: el material de la placa de absorción, el acabado superficial de la placa, el número y el tipo de cubiertas, el espesor y tipo de aislante, el flujo de masa, y el medio de trabajo (en este caso aire), la inclinación del colector con respecto a la horizontal, etc. Todos estos parámetros tienen mayor o menor importancia en el diseño de un colector solar de acuerdo con el tipo de aplicación fototérmica a la que se va a destinar (calentamiento de agua; para piscinas o uso doméstico, calefacción, refrigeración, etc.).

La importancia de los distintos parámetros de diseño pueden evaluarse con un balance de energía. Un balance de energía para un colector solar indica que sólo una fracción de la radiación total incidente sobre él, puede utilizarse en el medio de trabajo, dado que una parte se pierde hacia los alrededores por conducción, convección y re-radiación, otra se pierde por las características propias de reflexión del vidrio y la placa de absorción, ($\tau\alpha$), y una última puede ser almacenada en el colector mismo. Así las pérdidas de calor en el colector pueden expresarse por UL (coeficiente total de pérdidas de calor).

El análisis de evaluación numérica del coeficiente total de transferencia de calor (UL) requiere, de un procedimiento detallado en todas las distintas pérdidas de calor. En el modelo (Figura 14) que se presenta a continuación se harán los siguientes supuestos:

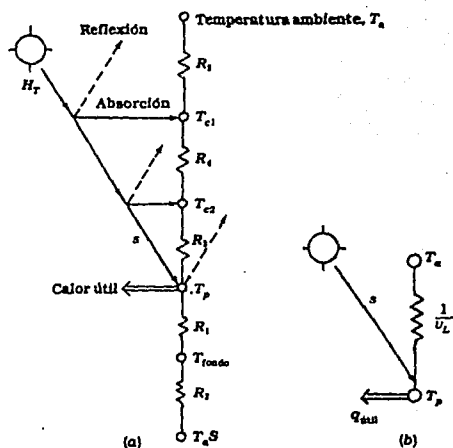


Fig. 14. Circuito térmico para un colector plano con dos cubiertas. (a) Circuito detalle; (b) circuito equivalente.

- 1.- El colector opera en estado estable;
- 2.- La diferencia de temperaturas entre la parte superior y la inferior de la placa de absorción, es despreciable;
- 3.- El flujo de calor a través de las cubiertas y el fondo del colector es unidimensional;
- 4.- La irradiación sobre la superficie del colector es uniforme; y
- 5.- El firmamento se comporta para los efectos de radiación infrarroja como un cuerpo negro a una temperatura equivalente.

En la Figura 14 se muestra el circuito térmico de un colector solar con dos cubiertas, y su equivalente. En este diagrama se supone que las temperaturas de la placa de absorción y de las cubiertas son uniformes. Con referencia al fondo del colector, R_1 y R_2 en la red constituyen, respectivamente, las resistencias a la conducción a través del aislante ($R_1=1/k_a$), y a la convección hacia el ambiente ($R_2=1/h_f$). Cabe apuntar que ésta última resistencia es usualmente muy pequeña con respecto a la de conducción en un colector bien aislado. En consecuencia, la conducción térmica para el fondo del colector es:

$$U_{\text{fondo}}=1/R_1=k_a/l \dots \dots \dots (39)$$

Nota: "k" es la conductividad térmica del aislante (fibra de vidrio), toma valores de acuerdo a la Tabla 2.7.

"l" es el espesor del aislante (l=2.54 cm).

"U_{fondo}" es la conductancia térmica para el fondo del colector.

 Tabla 2.7 Propiedades térmicas de algunos materiales.

Material	k_a , w/m°K
Algodón	0.059
Asbesto	0.074
Baquelita	0.232
Carbón (antracita)	0.26
Concreto	0.81 - 1.40
Corcho, hoja	0.043
Grafito	1.70 - 4.0
Hule (caucho), duro	0.151
Ladrillo, seco	0.38 - 0.52
Tierra	0.52
Vidrio, fibra	0.40
Vidrio, hoja	0.76

Sustituyendo los valores en la ecuación 39, tenemos:

$$U_{\text{fondo}} = 1.5748 \text{ w/m}^2\text{°K}$$

Ahora, calculamos las pérdidas de calor a través de los lados del colector, con la siguiente fórmula:

$$U_{\text{lados}} = (k_a h p) / (l Ac) \dots \dots \dots (40)$$

Nota: "h" es la altura del colector (h=6 cm).

"p" es el perímetro del colector (p=4.02m).

"Ac" es el área del colector (Ac=1.001m²).

"k_a" es la conductividad térmica del aislante.

"l" es el espesor del aislante.

"U_{lados}" son las pérdidas de calor a través de los lados.

Sustituyendo valores en la ecuación 40, tenemos:

$$U_{\text{lados}} = 0.3794 \text{ w/m}^2\text{°K}.$$

Para calcular, el coeficiente de pérdidas de calor en la superficie del colector, ocupamos la siguiente fórmula:

$$U_{\text{sup}} = ((1/(\bar{h}_{p-c} + hr_{p-c})) + (1/(\bar{h}_v + hr_{c-firm})))^{-1} \dots \dots (41)$$

Nota:

" \bar{h}_{p-c} " es el coeficiente de transferencia de calor entre la placa y la cubierta, debida a la convección.

" hr_{p-c} " es el coeficiente de transferencia de calor, debida a la radiación en la superficie del colector.

" \bar{h}_v " es el coeficiente de transferencia de calor por convección del viento.

" hr_{c-firm} " es el coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta y el firmamento debido a la radiación.

Así tenemos que las fórmulas de los coeficientes de transferencia de calor, son las siguientes:

A) \bar{h}_{p-c}

Nota: como es convección en el interior de un ducto cuadrado, necesitamos conocer su diámetro hidráulico (D_h), con la siguiente fórmula:

$$D_h = 4A/p \dots \dots \dots (42)$$

Nota: "A" es el área de la sección transversal al flujo ($A=0.91m \times 0.06m$).

"p" es el perímetro de contacto con el fluido ($p=0.91+0.91+0.06+0.06m$).

Así tenemos que:

$$D_h = 0.112577319m.$$

Ahora tenemos que conocer el número de Reynolds, el de Prandtl y el de Nusselt, todo lo anterior para poder conocer;

$$\bar{h}_{p-c}:$$

1) Con la temperatura de la placa (T_p) y la temperatura ambiente (T_a), calculamos la temperatura de película (T_f):

$$T_f = \frac{1}{2}(T_p + T_a) \dots \dots \dots (43)$$

Nota: Los valores de las temperaturas ambiente, placa (supuesta), vidrio (supuesta), se encuentran en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Temperaturas °C			
Mes	T_a	T_c	T_p
Enero	14.6	18	29
Febrero	16.75	20	30
Marzo	19	21	32
Abril	20.95	23	34
Mayo	21.75	24	35
Junio	19.15	23.5	34
Julio	19.8	23.8	34.5
Agosto	19.95	24	35
Septiembre	19.65	23.9	34.6
Octubre	18	20	31.5
Noviembre	17.6	19	30
Diciembre	14.5	16	26

Nota; los valores de T_a , fue proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional para el estado de Guanajuato.

Así, sustituyendo los valores en la ecuación 43, tenemos;

$$T_f = 294.8^\circ\text{K}$$

Con el valor de T_f , calculamos las propiedades del aire en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Propiedades del aire a la presión atmosférica.

T°K	C _p	d	v	k	Pr
100	1.0266	3.6010	1.923	0.009246	0.77
150	1.0099	2.3675	4.343	0.013735	0.753
200	1.0061	1.7684	7.490	0.01809	0.739
250	1.0053	1.4128	9.49	0.02227	0.722
300	1.0057	1.1774	15.68	0.02624	0.708
350	1.0090	0.9980	20.76	0.03003	0.697
400	1.0140	0.8826	25.90	0.03365	0.689
450	1.0207	0.7833	28.86	0.03707	0.683
500	1.0295	0.7048	37.90	0.04038	0.680
2500	1.688	0.1394	543.5	0.175	0.730

"C_p" es el calor específico ($10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$).

"d" es la densidad (kg/m^3).

"v" es la viscosidad ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

"k" es la conductividad térmica ($\text{w/m}^\circ\text{K}$).

"Pr" es el número de Prandtl.

Como el valor de T_f no se encuentra en la Tabla 2.9, procedemos a evaluarlo por interpolación con la siguiente fórmula:

$$\text{Valor} = \left(\frac{(T_f - T_{\text{Inf}})}{(T_{\text{sup}} - T_{\text{Inf}})} \right) (V_{\text{sup}} - V_{\text{Inf}}) + V_{\text{Inf}} \dots \dots (44)$$

Nota; "T" es la temperatura (superior, inferior).

"v" es el valor de la temperatura (superior, inferior).

Por lo tanto, tenemos que:

$$\begin{aligned} d &= 1.20188 \text{ kg/m}^3 \\ v &= 19.3152 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \\ k &= 0.0258271 \text{ w/m}^\circ\text{K} \\ Pr &= 0.709456 \end{aligned}$$

2) La velocidad del aire a la entrada del colector, se calcula de la fórmula:

$$V=Q/A \dots \dots \dots (45)$$

Nota: "V" es la velocidad (m/s).
 "Q" es el caudal, que proporciona el extractor 5m³/min.
 "A" es el área a la entrada del colector toma valores de la ecuación 42.

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación 45 tenemos:

$$V=1.5262 \text{ m/s.}$$

3) Con las propiedades del aire, su velocidad y el diámetro hidráulico, determinamos el número de Reynolds (Re), de acuerdo la fórmula:

$$Re=V d D_h/v \dots \dots \dots (46)$$

$$Re=10691.1458$$

Al obtener el Re, observamos que es un flujo turbulento.

4) Con el Re y Pr, se determina el número de Nusselt con la fórmula:

$$\bar{Nu}=0.021Re^{0.8}Pr^{0.6} \dots \dots \dots (47)$$

Nota: esta fórmula se utiliza cuando tenemos una temperatura de placa constante.

$$\bar{Nu}=28.575$$

5) Finalmente se determina \bar{h}_{p-c} , con la fórmula:

$$\bar{h}_{p-c}=\bar{Nu} k/D_h \dots \dots \dots (48)$$

$$\bar{h}_{p-c}=6.5556 \text{ w/m}^2\text{°K}$$

B) Calculamos el coeficiente de transferencia de calor debida a la radiación, con la fórmula:

$$hr_{p-c}=(\sigma(T_p+T_c)(T_p^2+T_c^2))/((1/\epsilon_p)+(1/\epsilon_c)-1)) \dots \dots \dots (49)$$

Nota: "σ" es la constante de Stefan-Boltzman (σ=5.6697⁻⁸ w/m²°K⁴).

"ε_p" es la emitancia infrarroja de la placa pintada de negro mate (ε_p=0.981).

"ε_c" es la emitancia de la cubierta (ε_c=0.88).

Sustituyendo valores en la ecuación 49, tenemos:

$$hr_{p-c} = 5.1166 w/m^2 \cdot K$$

C) Calculamos el coeficiente de transferencia de calor por convección del viento, con la fórmula:

$$\bar{h}v = 5.7 + 3.8\bar{v} \dots \dots \dots (50)$$

Nota: " \bar{v} " es la velocidad del viento en promedio, su valor se encuentra en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10 Velocidad del viento en promedio, proporcionado por el Servicio Meteorológico Nacional.

Mes	v m/s
Enero	2.4
Febrero	2.5
Marzo	2.6
Abril	2.7
Mayo	3.0
Junio	3.1
Julio	2.5
Agosto	2.6
Septiembre	2.4
Octubre	2.7
Noviembre	2.6
Diciembre	2.1

Sustituyendo valores en la ecuación 50, tenemos:

$$\bar{h}v = 14.82 w/m^2 \cdot K$$

D) Calculamos, el factor de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el firmamento, de acuerdo a la fórmula:

$$hr_{c-firm} = \sigma \epsilon_c (T_c + T_{firm}) (T_c^2 + T_{firm}^2) \dots \dots \dots (51)$$

Nota: " σ " es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.6697 \cdot 10^{-8}$

$$w/m^2 \cdot K^4).$$

" ϵ_c " es la emitancia de la cubierta en el infrarrojo ($\epsilon_c = 0.88$).

" T_c " es la temperatura en la cubierta.

" T_{firm} " es la temperatura en el firmamento, donde se determina con las siguientes fórmulas:

$$T_{firm} = 0.0552 T_a^{1.5} \dots \dots \dots (52)$$

$$T_{firm} = T_a - 6 \dots \dots \dots (53)$$

$$T_{firm} = T_a \dots \dots \dots (54)$$

Nota: Las ecuaciones 52, 53 y 54 sirven para evaluar la temperatura del firmamento como cuerpo negro. Afortunadamente el coeficiente total de transferencia de calor por la parte superior del colector no es afectado significativamente por la ambigüedad de los resultados que aportan las ecuaciones mencionadas, por lo que la aproximación $T_a = T_{firm}$, es aceptable en todos los casos.

Cuerpo negro; Físicamente se entiende como el material que absorbe completamente las radiaciones que inciden sobre él, cualquiera que sea la índole y dirección de las mismas; es decir, es el que emite y absorbe a cualquier temperatura y en cualquier longitud de onda la máxima cantidad posible de radiación. Esto es, el cuerpo negro es un estándar con el que pueden compararse las características de radiación de otros cuerpos.

Así evaluando la fórmula 52, tenemos:

$$T_{firm} = 269.22^\circ K$$

Ahora, sustituyendo los valores de T_{firm} , en la ecuación 51:

$$h_{r-c-firm} = 4.39304 \text{ w/m}^2^\circ K$$

Por lo tanto, sustituyendo todos los valores de transferencia de calor ya sea por convección entre la placa y la cubierta, por radiación entre placa y cubierta, por convección del viento y por radiación entre la cubierta y el firmamento, tenemos que en la ecuación 41:

$$U_{sup} = 7.26104 \text{ w/m}^2^\circ K$$

Finalmente, se calcula el coeficiente de pérdidas totales de calor (UL) en el colector, con la fórmula:

$$UL = U_{fondo} + U_{lados} + U_{sup} \dots \dots \dots (55)$$

$$UL = 9.2153 \text{ w/m}^2^\circ K$$

2.11.- DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE LA PLACA.

Esta determinación es de suma importancia en la selección de los materiales que constituyen un colector. Su importancia estriba en el hecho de que, en condiciones de estancamiento (flujo igual a cero), la temperatura que puede alcanzarse en el interior del colector sobrepasaría el límite de operación de alguna de sus partes: aislante, empaques, etc.

Con la siguiente fórmula se determina la temperatura de la placa (T_p):

$$T_p = T_a + S/UL \dots \dots \dots (56)$$

$$T_p = 49.12^\circ\text{C}$$

2.12.- CALCULO DE LA TEMPERATURA DE LA CUBIERTA.

La temperatura supuesta en la cubierta puede verificarse notando, que el calor transferido de la placa al vidrio es igual al calor disipado por la placa hacia los alrededores, esto es:

$$T_c = T_p - ((U_{\text{sup}}(\bar{T}_p - T_a)) / (h_{p-c} + hr_{p-c})) \dots \dots \dots (57)$$

$$T_c = 27.64^\circ\text{C}$$

2.13.- HACIENDO UNA NUEVA ITERACION.

Esta nueva iteración, se recomienda hacerla para poder comprobar el nuevo valor de la temperatura de la cubierta (T_c), así tenemos que los nuevos valores (empleando los nuevos valores de T_p y T_c) son:

$$\bar{h}_{p-c} = 7.5475 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$hr_{p-c} = 5.9293 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\bar{h}_v = 14.82 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$hr_{c-firm} = 4.6288 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_{\text{sup}} = 7.9606 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$UL = 9.9148 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_p = 46.68^\circ\text{C}$$

$$T_c = 27.73^\circ\text{C}$$

Haciendo una segunda iteración tenemos;

$$\bar{h}_{p-c} = 7.59407 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$hr_{p-c} = 5.8629 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\bar{h}_v = 14.82 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$hr_{c-firm} = 4.6328 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_{\text{sup}} = 7.9543 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$UL = 9.9086 \text{ w/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_p = 49.70^\circ\text{C}$$

$$T_c = 27.72^\circ\text{C}$$

Nota: al observar los nuevos resultados, notamos una pequeña diferencia de T_p y T_c , por lo tanto deducimos que los nuevos valores son correctos.

2.14.- CALOR UTIL.

Para poder determinar el calor útil ganado por el aire, se desarrollan dos procedimientos. El primero, consiste en tener la placa de absorción plana (ver apéndice lamina 1), y el otro consiste en hacer pasar el aire dentro de un banco de barras colocados sobre la placa de absorción, así se podrá conocer los diferentes resultados, por lo tanto en base a dichos resultados, se elegirá el mejor método, desarrollándose a continuación ambos procedimientos.

1.- EL CALOR UTIL QUE PROPORCIONA LA PLACA PLANA AL AIRE.

Para poder calcular el calor proporcionado al aire, se necesita conocer las propiedades del aire a la temperatura de película (ecuación 43), tenemos:

$$T_f = 303.64^\circ\text{K}$$

Ahora evaluamos, las propiedades del aire de la Tabla 2.9, al no estar tabulado el valor de T_f , ocupamos la ecuación 44, así:

$$d = 1.20547 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 19.2397^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 0.025766 \text{ W/m}^\circ\text{K}$$

$$Pr = 0.709669$$

A) La velocidad del aire a la entrada del colector, ya se cálculo anteriormente con la ecuación 45, tenemos que:

$$V = 1.5262 \text{ m/s}$$

B) Se determina el número de Reynolds, con la ecuación 46:

$$Re = 12464.00526$$

C) Calculamos Nusselt, con la ecuación 47 así:

$$\bar{Nu} = 33.8825$$

D) Determinamos, el coeficiente (\bar{h}) de transferencia de calor, con la ecuación 48:

$$\bar{h}=7.59407w/m^2\text{°K}$$

E) Conociendo \bar{h} , calculamos el calor que se está proporcionando la placa al aire, con la fórmula:

$$Q=\bar{h} A_{\text{placa}} (T_p - T_A) \dots \dots \dots (58)$$

Nota; "Q" es el calor ganado por el aire (w).

"h" es el coeficiente de calor por convección (w/m²°K).

"A_{placa}" es el área de la placa plana.

$$Q=244.0134w$$

2.- EL CALOR UTIL PROPORCIONADO UTILIZANDO EL BANCO DE BARRAS, COLOCADOS SOBRE LA PLACA PLANA. (ver apéndice lamina 2)

A) Determinamos el banco de barras escalonados.

B) El número de barras son 77.

C) Calculamos el área mínima de flujo con la fórmula:

$$A_{\text{min}}=(S_t * \text{No. de filas})L_t - (D_t * \text{No. de filas})L_t \dots \dots \dots (59)$$

Nota: "A_{min}" es el área mínima al flujo de aire.

"S_t" es la distancia de separación transversal de las barras (S_t=7.5 cm).

"No. de filas" es el número de filas 11.

"L_t" es el largo de la barra (L_t=4.6 cm).

"D_t" es el diámetro de la barra (D_t=1.27 cm).

$$A_{\text{min}}=0.0315238m^2$$

D) Determinamos la velocidad, de acuerdo a la ecuación 45:

$$V=2.6435m/s$$

E) Calculamos Re, con la ecuación 46:

$$Re=18646.11367$$

F) Calculamos \bar{Nu} , con el ecuación siguiente:

$$\bar{Nu} = c Re^m Pr^{0.34} FN \dots \dots \dots (60)$$

Nota: "c" y "m" son constantes, y toman valores a la Tabla 2.11.

"FN" es un factor que depende del número de barras, a lo largo de las direcciones de flujo. Toma valores de acuerdo a la Figura 15.

Tabla 2.11.- Valores de c y m para la ecuación 60.

Re			En línea		Escalonado	
			c	m	c	m
10	a	$3 \cdot 10^2$	0.742	0.431	1.309	0.360
10^2	a	$2 \cdot 10^5$	0.211	0.651	0.273	0.635
$2 \cdot 10^5$	a	$2 \cdot 10^6$	0.166	0.700	0.124	0.700

Así tenemos que: $c=0.273$
 $m=0.635$

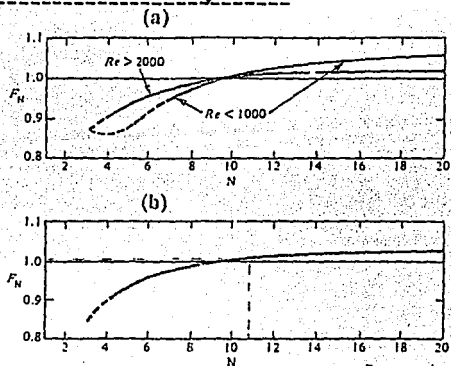


Fig.15. El factor FN en la ecuación 60 como función del número de tubos, N. (a) bancos en línea; (b) bancos escalonados. De Engineering Sciences Data Units (1973).

Por lo tanto, tenemos:

$$\bar{Nu} = 125.125$$

G) Calculamos el valor de \bar{h} , con la fórmula:

$$\bar{h} = \bar{Nu} k / D_h \dots \dots \dots (61)$$

$$\bar{h} = 28.637 w / m^2 \cdot K$$

H) El calor se determina con la ecuación siguiente:

$$Q = \bar{h} A_1 (T_p - T_a) \dots \dots \dots (62)$$

Nota: "Q" es el calor proporcionado por la barra (w).

"h" es el coeficiente de transferencia de calor por convección ($w/m^2 \cdot K$).

"A₁" es el área longitudinal de la barra, se determina con;

$$A_1 = \pi D_c L_c \dots \dots \dots (63)$$

$$A_1 = 2.39389 \cdot 10^{-3} m^2$$

"T_p" es la temperatura en la base de la barra, la cual es la misma que la de la placa T_p.

"T_a" es la temperatura ambiente.

$$Q = 2.4063w \text{ (por barra)} \cdot 77 \text{ barras} = 185.286w$$

I) El calor proporcionado por la placa, quitando el área transversal de las barras, se calcula con :

$$A_t = A_{\text{placa}} - A_{\text{trans}} \dots \dots \dots (64)$$

Nota: "A_t" es el área total.

"A_{placa}" es el área de la placa.

"A_{trans}" es el área transversal de las barras.

$$A_{\text{trans}} = (\pi D^2 / 4) 77 \dots \dots \dots (65)$$

$$A_{\text{trans}} = 9.75418973 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$A_t = 991.245881 \cdot 10^{-3} m^2$$

J) El calor es:

$$Q_p = \bar{h} A_t (T_p - T_a) \dots \dots \dots (66)$$

Nota: "Q_p" es el calor proporcionado por la placa, quitando el área transversal de los barras.

$$Q_p = 868.27349w$$

K) Ahora el calor ganado por el aire al salir del colector, se calcula con:

$$Q_t = Q + Q_p \dots \dots \dots (67)$$

$$Q_t = 1053.5598w$$

Comentario:

Al desarrollar los dos procedimientos, (placa plana y el de banco de barras) notamos, un incremento notable en el calor proporcionado por el banco de barras al pasar el aire por él, así mientras que la placa plana se tiene un valor de 244.0134 w, al ocupar el banco de barras tenemos 1053.5598w. Como consecuencia de este incremento en el calentamiento del aire, éste quitara una mayor cantidad de humedad al maíz (objetivo de la tesis).

2.15.- DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE.

Al conocer la temperatura con la que sale el aire del colector, se podrá determinar con la ayuda de la Carta psicrométrica la cantidad de humedad, que el aire caliente se llevara al pasar por los granos, al consultar dicha Carta psicrométrica se observaran temperaturas de bulbo húmedo, de bulbo seco (temperatura ambiente), de rocío, entalpía, curvas de humedad y presión del vapor.

A) Calculamos el calor específico (C_p) a presión constante, de acuerdo con la temperatura de película ($T_f=303.64^\circ\text{K}$), la cual ocupamos en la ecuación 42 y la ecuación 43, así tenemos que:

$$C_p=1006.26 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$$

B) Por lo tanto, la temperatura de salida es:

$$Q_t=m C_p (T_s-T_a) \dots \dots \dots (68)$$

Nota: "Qt" es el calor total ganado por el aire al salir del colector (w/s = J).

"m" es el flujo másico del aire que está determinado por el caudal y la densidad, así tenemos que:

$$m=Q*d \dots \dots \dots (69)$$

Donde; "Q" es el caudal ($Q=5\text{m}^3/\text{min}$).

"d" es la densidad ($d=1.1643\text{kg}/\text{m}^3$).

$$m=0.097025\text{kg}/\text{s}$$

" C_p " es el calor específico.

" T_s " es la temperatura de salida.

" T_a " es la temperatura ambiente.

Despejando de la ecuación 68, T_B :

$$T_B = (Q_t / (m C_p) + T_A) \dots \dots \dots (70)$$

$$T_B = 25.15^\circ\text{C}$$

Nota; los resultados para todo el año se encuentran en la tabla 2.12.

Tabla 2.12 Temperaturas del aire a la salida del colector.

MES	T°C
Enero	25.15
Febrero	26.48
Marzo	26.31
Abril	27.10
Mayo	28.28
Junio	24.47
Julio	25.49
Agosto	25.10
Septiembre	30.43
Octubre	28.14
Noviembre	27.85
Diciembre	24.71

2.16.- DETERMINACION DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE.

Los datos necesarios para calcular la humedad relativa en un lugar determinado son los siguientes:

- 1.- Temperatura de bulbo seco (Temperatura ambiente T_a);
- 2.- Temperatura de bulbo húmedo (T_h);
- 3.- Presión atmosférica (H) media en milímetros; y
- 4.- Constante psicrométrica (A) igual a 0.00066, para los psicrómetros de honda o ventilados; a 0.00079 para los no ventilados, cuando el bulbo del termómetro húmedo está cubierto con agua líquida, o ésta se haya parcialmente convertida en hielo; a 0.00069 cuando el agua que humedece el bulbo está transformada en hielo.

β = al ángulo cuya cotangente es igual a $A * H$.

Se determina primero al ángulo " β " con los datos anteriores de presión y el valor de "A" según el psicrómetro usado, y para obtener la tensión bastará colocar uno de los lados de dicho ángulo en coincidencia con la ordenada correspondiente a la lectura (T_h) del termómetro de bulbo húmedo, el vértice de este ángulo sobre el punto O figura 16 de la curva de saturación 100,

y a continuación se busca la intersección "C" del otro lado del ángulo, con la ordenada de las tensiones en el punto correspondiente a la tensión del vapor que se busca y a la curva de saturación en "R" por donde pasará la ordenada que da la temperatura del punto de rocío en la horizontal inferior del Abaco. La humedad relativa %, queda indicada por la curva que pasa por el primer punto considerado "C".

Por lo tanto para Salvatierra, Guanajuato; tenemos: una temperatura de bulbo húmedo para el mes de Enero de $T_h=12.2^\circ\text{C}$, y una temperatura de bulbo seco de $T_a=14.6^\circ\text{C}$. y una presión media atmosférica de 603.237 mm de Hg. (804.27 mb.), todas las presiones se encuentran en la Tabla 2.13.

Así, su humedad relativa es de 65%, los resultados para todo el año están en la tabla 2.14.

 Tabla 2.13 Presión media del aire en milímetros de Mercurio.

Enero	603.237
Febrero	602.675
Marzo	602.180
Abril	602.960
Mayo	602.225
Junio	602.652
Julio	603.807
Agosto	603.650
Septiembre	602.862
Octubre	603.605
Noviembre	603.522
Diciembre	603.620

 Tabla 2.14 Humedad relativa para Salvatierra, Guanajuato.

Enero	65 %
Febrero	53
Marzo	41
Abril	35
Mayo	38
Junio	47
Julio	45
Agosto	46
Septiembre	47
Octubre	53
Noviembre	48
Diciembre	65

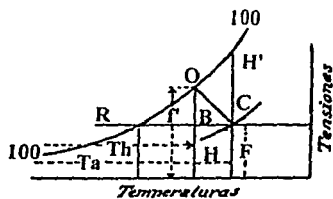


Figura 16. Forma para corregir la Carta Psicrometrica a cualquier presión atmosférica.

CAPITULO 3

EQUIPO COMPLEMENTARIO

1.- EXTRACTOR:

Se hicieron pruebas de la siguiente manera; el extractor se puso a funcionar en el secador solar para tomar mediciones con el Tubo de Pitot, con el objeto de saber el flujo que proporciona el extractor, por lo tanto, después de haber hecho varias pruebas, en promedio teníamos que el fluido del Tubo de Pitot subió 6.432 divisiones, así tenemos que:

$$\text{Sen}\theta = h/l \dots \dots \dots (71)$$

Nota:

- θ es el ángulo de inclinación del Tubo de Pitot.
- h es la altura que sube el líquido.
- l es una regla con divisiones (cada división mide 2 mm).

Por lo tanto, tenemos;

$$\theta = 5^\circ$$

$$l = 6.432 \text{ mm.}$$

Así obtenemos que:

$$h = 0.5605 \text{ mm}$$

El Peso específico del líquido es de 0.86, por lo tanto h es;

$$h = 0.5605(0.86)$$

$$h = 0.482 \text{ mm}$$

La presión del líquido es de;

$$P = rh \dots \dots \dots (72)$$

Nota;

r es el Peso esp. del agua a 4°C es de 9810 N/m³

Así tenemos que;

$$P = 4.725 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$$

La velocidad es de;

$$V^2 = (2(P_1 - P_2)/d) \dots \dots \dots (73)$$

Nota:

d es la densidad del aire a la temperatura de 20°C
(d = 1.21035 Kg/m³)

Por lo tanto;

$$V = 2.794211 \text{ m/s}$$

Así tenemos que el caudal se calcula con;
 $Q=VA$(74)

El área la determinamos con;
 $A=\pi D^2/4$(75)

$$A=\pi(0.195)^2/4$$

$$A=0.02986m^2$$

Por lo tanto Q es;
 $Q=0.08344m^3/s=5m^3/min.$

2.- DIAMETRO DE LA CAMPANA:

Para poder calcular el diámetro de salida de la campana (transformación de cuadrado a redondo, ver apéndice lamina 3), necesitamos conocer el flujo recomendado en ductos verticales; así tenemos que:

El flujo recomendado en ductos verticales a velocidad máxima es de $500ft^3/min$; por lo tanto tenemos que:

El flujo que proporciona el extractor es de $5 m^3/min$
 $=176.5733 ft^3/min$, así tenemos que el área de la ecuación 74 es;
 $A=0.3531 ft^2$.

Por lo tanto, al tener el área se calcula el diámetro con;
 $D=(4(A)/\pi)^{1/2}$(76)

Así, tenemos que;

$$D=0.6705 ft=20.43 cm$$

3.- CALCULO DEL EJE:

El diseño de ejes consiste básicamente en la determinación del diámetro correcto del eje para asegurar rigidez y resistencias satisfactorias cuando el eje transmite potencia en diferentes condiciones de carga y operación. Generalmente los ejes tienen sección transversal circular y pueden ser huecos o macizos.

El diseño de ejes de materiales dúctiles, basado en la resistencia, está controlado por la teoría del esfuerzo cortante máximo. Los ejes de materiales frágiles deben diseñarse en base a la teoría del esfuerzo normal máximo.

Generalmente los ejes están sometidos a torsión, flexión y cargas axiales.

Los factores principales que influyen en el diseño de ejes son; los momentos de Torsión y de Flexión, Uno de los primeros

pasos en el diseño de ejes es hacer el diagrama de momentos flectores, si las cargas que actúan sobre el eje están en más de un plano axial. Los puntos de esfuerzo crítico de flexión pueden determinarse del diagrama de momentos flectores.

El momento de torsión que actúa sobre el eje puede determinarse con:

$$M_t = (H_p \times 63000) / \text{rpm} \dots \dots \dots (77)$$

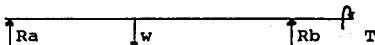
Nota;
 M_t en lb-plg.

Así, al hacer el cálculo del diámetro del eje es conveniente hacer un análisis del diagrama de cuerpo libre, donde la fuerza que se aplica en el eje se obtiene de:

$$T = ((0.25 \text{ Hp} (63000) / 10 \text{ rpm})) = 1575 \text{ lb-plg}$$

$$T = 18.162 \text{ Kg-m}$$

Diagrama de cuerpo libre



Nota;
 R_a es la reacción A.

R_b es la reacción B.

w es el peso tanto del cilindro, como el del maíz (100 Kgs aprox.)

T es el momento torsionante.

Así, tenemos que por suma de momentos obtenemos las reacciones en los puntos de apoyo.

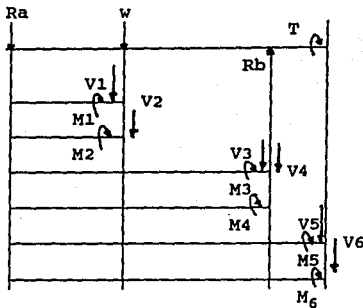
$$\Sigma M_A = 52(100) - R_b(105) + 18.162 = 0$$

$$R_b = 49.69 \text{ Kg}$$

$$\Sigma M_B = R_a(105) - 53(100) + 18.162 = 0$$

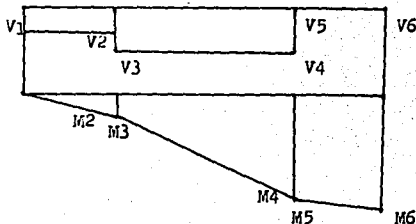
$$R_a = -50.64 \text{ Kg}$$

Por lo que el sentido de la fuerza es contrario al supuesto y esto lo aclaramos en el análisis para obtener la fuerza torsionante (V) y momento flexionante (M).



$\Sigma F_y = -R_a - V_1 = 0$	$V_1 = -R_a = -50.64 \text{ Kg}$
$\Sigma M_1 = R_a(0) + M_1 = 0$	$M_1 = 0$
$\Sigma F_y = -R_a - V_2 = 0$	$V_2 = -R_a = 50.64 \text{ Kg}$
$\Sigma M_2 = R_a(52) + M_2 = 0$	$M_2 = -2633.28 \text{ Kg}$
$\Sigma F_y = -R_a - w - V_3 = 0$	$V_3 = 150.64 \text{ Kg}$
$\Sigma M_3 = R_a(52) + M_3 = 0$	$M_3 = -2633.28 \text{ Kg}$
$\Sigma F_y = -R_a - w - V_4 = 0$	$V_4 = 150.64 \text{ Kg}$
$\Sigma M_4 = R_a(105) + 53(100) + M_4 = 0$	$M_4 = 10617.2 \text{ Kg}$
$\Sigma F_y = -R_a - w + R_b - V_5 = 0$	$V_5 = 0$
$\Sigma M_5 = R_a(105) + 53(100) + M_5 = 0$	$M_5 = 10617.2 \text{ Kg}$
$\Sigma F_y = -R_a - w + R_b - V_6 = 0$	$V_6 = 0$
$\Sigma M_6 = R_a(111) + 59(100) - R_b(6) + M_6 = 0$	$M_6 = 11222.9 \text{ Kg}$

Diagramas de fuerzas torsionantes y momentos flexionantes son:



Para obtener el diámetro de la flecha usaremos la fórmula siguiente:

$$D^3 = \frac{16 M_G}{\pi \tau_{\text{máximo}}} \dots\dots\dots (78)$$

Nota;
 $\tau = 0.6(\sigma_{\text{fluencia}}) / F.S \dots\dots\dots (79)$
F.S: Es el factor de seguridad y varía de 1.2 a 2, considero el valor de 1.2.
 $\sigma_{\text{fluencia}} = 65000 \text{ psi}; \tau = 32500 \text{ psi}$

Sustituyendo en la ecuación 78 tenemos:

$D = 1.17 \text{ pulg} \approx 1 \text{ pulg aprox.}$

$D = 2.54 \text{ cms}$

CAPITULO 4

PRUEBAS

Debido a lo imposible de trasladar el aparato al lugar pensado originalmente (Salvatierra, Gto.), las pruebas del secador se realizaron en la escuela FES-C, por lo tanto en los resultados que se obtuvieron hubo ciertas variaciones como se verá a continuación:

La fecha en que se realizaron estas pruebas fue el 27 de Marzo de 1995, la latitud del lugar sigue siendo 20° por lo tanto, dichos cálculos fueron los siguientes;.

$$\begin{aligned}\delta &= -2.4177 \\ w &= 15^\circ \\ \alpha &= 63.18^\circ \\ \infty &= 34.96^\circ \\ ws &= 89.11^\circ = 1.55 \text{ rad} \\ Ts &= 11.88 \text{ horas de soledamiento} \\ ws' &= 90^\circ = 1.57 \text{ rad}\end{aligned}$$

$$\bar{H}G = 5871.7588w/m^2 \text{ día}$$

$$\bar{H}o = 9558.1454w/m^2 \text{ día}$$

$$\bar{K}t = 0.6143$$

$$\bar{I}dh/\bar{H}G = 0.3058$$

$$\bar{R}b = 1.0901$$

$$\bar{R}d = 0.9698$$

$$\bar{R}r = 0.1507$$

$$\bar{R} = 1.204$$

$$\bar{H}t = 7069.4099w/m^2 \text{ día}$$

$$rd = 0.1274$$

$$a = 0.6507$$

$$b = 0.4311$$

$$Idh = 1795.8245w/m^2$$

$$r_c = 0.13604$$

$$HG = 798.794w/m^2$$

$$H_r = 775.07319w/m^2$$

$$\theta_i = 15.18^\circ$$

$$\theta_s = 10.05^\circ$$

$$p_s^* = 0.04412$$

$$p_p = 0.03639$$

$$P^* = 0.04025$$

rx=0.8254
ra=0.8852
r=0.7307
α=0.22905
Γ=0.1909
S=147.961w/m²
U_{fondo}=1.5748w/m²°K
U_{lados}=0.3794w/m²°K

\bar{h}_{p-c} ; apartir de esté momento se estará empleando las
temperaturas obtenidas en las pruebas; T_a=27°C, T_p=70°C y
T_c=41°C.

D_h=0.112577319
T_f=321.5°C
d=1.16663K^{-g}/m³
v=15.9848^{-g}/m²/s
k=0.0264674w/m²°K
Pr=0.70734
V=1.5262m/s
Re=12539.7328

$\bar{Nu}=32.406$

$\bar{h}_{p-c}=7.6187w/m^2\text{°K}$
 $h_{p-c}=6.98199w/m^2\text{°K}$

$\bar{h}_v=15.58w/m^2\text{°K}$
 $hr_{c-f}=286.827w/m^2\text{°K}$
U_{sup}=8.6129w/m²°K
U_f=10.5671w/m²°K
T_p=43.34°C
T_c=31.51

Nueva iteración;

\bar{h}_{p-c} ;
T_f=308.17°C
d=1.14808K^{-g}/m³
v=16.51007^{-g}/m²/s
k=0.02685
Pr=0.7062
V=1.5262m/s
Re=11947.7351
Nu=31.146

$\bar{h}_{p-c}=7.4284w/m^2\text{°K}$
 $h_{p-c}=5.87206w/m^2\text{°K}$

$\bar{h}_v=15.58w/m^2\text{°K}$
 $hr_{c-f}=5.16304w/m^2\text{°K}$
U_{sup}=8.1041w/m²°K

$U_r=10.0583w/m^2\cdot K$
 $T_p=44.17^\circ C$
 $T_c=31.19^\circ C$
Haciendo una segunda iteración;

\bar{h}_{p-c} :
 $T_f=308.58^\circ K$
 $d=1.1465K_g/m^3$
 $v=16.552236^{-6}$
 $k=0.02689w/m^2\cdot K$
 $Pr=0.7061$
 $V=1.5262m/s$
 $Re=11900.8982$
 $Nu=31.0457$

$\bar{h}_{p-c}=7.4155w/m^2\cdot K$
 $h_{p-c}=5.7706w/m^2\cdot K$

$\bar{h}_v=15.58w/m^2\cdot K$
 $hr_{f-c}=5.1545w/m^2\cdot K$
 $U_{sup}=8.06021w/m^2\cdot K$
 $U_L=10.0144w/m^2\cdot K$
 $T_p=44.25^\circ C$
 $T_c=31.15^\circ C$

El calor que proporciona la placa al aire;

$T_f=308.62^\circ K$
 h :
 $d=1.1464K_g/m^3$
 $v=16.5563^{-6}m^2/s$
 $k=0.02689w/m^2\cdot K$
 $Pr=0.7061$
 $C_p=1006.26J/K_g\cdot K$
 $v=1.5262m/s$
 $Re=11896.9391$
 $Nu=31.03753$
 $h=7.4135w/m^2\cdot K$
 $Q=127.882w$

El calor que proporciona las barras;

$A_{min}=0.0315238m^2$
 $V=2.6435m/s$
 $Re=20606.488$
 $Nu=133.0974$
 $h=281.81w/m^2\cdot K$
 $Q=1.0064w$ por barra (77)=77.498w

El calor de la placa quitando el area transversal de los barras;

$A_{trans}=991.245881^{-3}m^2$
 $Q=543.594w$

El calor total;

$Q_t=621.092w$

La temperatura de salida del aire;

$T_e=33.70^\circ C$

La última prueba en el Secador solar, fue con carga de maíz, se realizó los días Miércoles 24 y Jueves 25 de Mayo de 1995, y se procedió de la siguiente manera;

El maíz que se tenía pesaba originalmente 6547.69 gramos, luego se humedeció durante 19 horas, aumentando su peso en 9011.64 gramos. Una vez húmedo se procedió a cargar el cilindro del secador con dicho maíz, se instrumentó el secador de la siguiente manera; los termopares 1 y 2 se colocaron sobre la placa del colector, el termopar 3 se colocó en la campana antes del extractor. Se puso a funcionar el extractor, se dieron vueltas al cilindro cada 15 minutos (vueltas 15), inició la prueba las 10:20 horas, se terminó a las 15:00 horas los resultados que se obtuvieron fueron:

Miércoles 24 de Mayo de 1995.

Hora	T. ambiente	Termopares		
		1	2	3
10:18	26	58	58	22
10:30	26	56	55	22
11:00	26	50	57	20
11:30	25.5	43	55	20
12:00	27	50	55	20
12:30	28	42	50	18
13:00	27	42	55	20
13:30	27.8	40	55	20
14:00	27.5	40	43	21
14:30	24.8	35	38	20
15:00	25	30	37	21

Nota: Todas las temperaturas están en °C.

Al finalizar la prueba se procedió a recoger todo el maíz para posteriormente pesarlo. El peso que se obtuvo fue de 8127.44 gramos que representa el 35.82% menos de humedad. El maíz se guardó en una bolsa de plástico con el fin de que no absorbiera más humedad.

En la prueba del día Jueves 25 de Mayo, se empezó a las 10:00 horas, a partir de las 13:00 se empleó el psicrómetro para medir temperaturas de bulbo húmedo y seco a la entrada y salida del secador, con objeto de saber el porcentaje de humedad que se extrae de la semilla.

Jueves 25 de Mayo de 1995.

Hora	T amb.	Termopares			Tbhe Entrada	Tbse	Tbhs Tbss Salida	
		1	2	3				
10:00	22	21	38	44				
10:30	21.8	22	39	41				
11:00	24	22	38	43				
11:30	23	20	21	40				
12:00	25	21	27	40				
12:30	27	20	30	40				
13:00	28	20	30	40	15.5	28	17.5	34.5
13:30	26.5	20	25	40	13.5	26.5	16.5	34.5
14:00	28	23	24	38	15	28	17	36
14:30	27	21	25	38	14	27	17	35
15:00	28	20	20	30	13.5	28	16	36

Nota; todas las temperaturas están en °C.

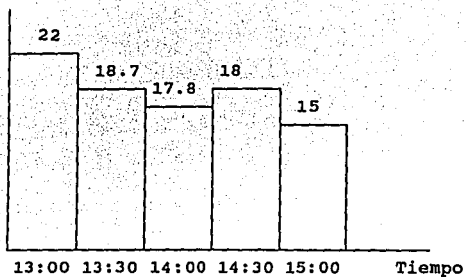
Con las temperaturas tanto de bulbo seco como húmedo, se obtienen porcentajes de humedad relativa en la Carta Psicrometrica, (ver apéndice página 66) a una presión barométrica de 584 mm Hg., (Escuela) dichos porcentajes son los siguientes:

Porcentaje de Humedad relativa

Hora	% de humedad entrada	% de humedad salida
13:00	31	22
13:30	28	18.7
14:00	28	17.8
14:30	26	18
15:00	23	15

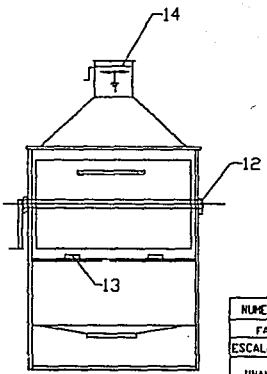
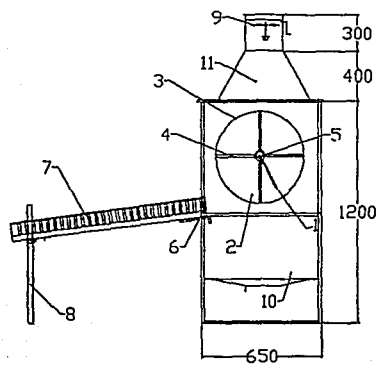
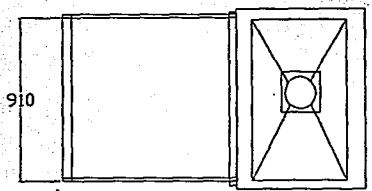
Al dar por terminada la prueba se peso el maíz, obteniendose un peso de 7541.16, lo que representa un 59.60% menos que el peso original (9011.64 gramos) con el que se empezó dicho experimento.

% Humedad relativa



GRAFICA DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD RELATIVA A LA SALIDA.

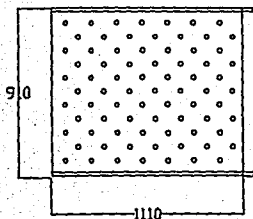
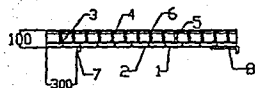
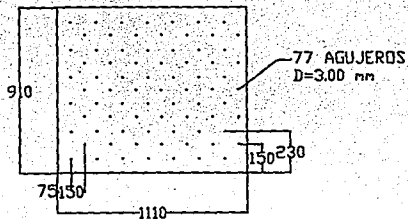
APENDICE



- LISTA
- 1.- MANIVELA
 - 2.- TAPA
 - 3.- CAMARA DE SECADO
 - 4.- ALABES
 - 5.- EJE
 - 6.- BASTIDOR
 - 7.- COLECTOR
 - 8.- PIE DEL COLECTOR
 - 9.- VENTILADOR
 - 10.- CRIBA
 - 11.- CAMPANA
 - 12.- CHUMACERAS
 - 13.- BISAGRAS
 - 14.- MARIPOSA

NUMERO	CANTIDAD	MATERIAL	OBSERVACIONES
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN			
ESCALA 1:50	ACOTACION	FECHA	REVISORLEYVA
UNAH	SECADOR SOLAR		DIBUJO CARAPIA
TESIS			LAMINA 1

PLACA DE ALUMINIO
(pintada de negro mate)

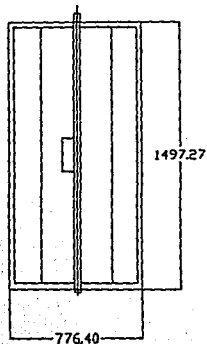
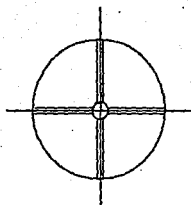


BARRA DE ALUMINIO
ESCALA 1/10

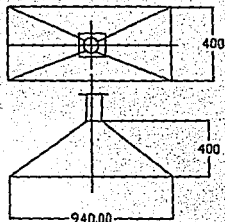
LISTA

- 1.- ANGULAR
- 2.- MADERA
- 3.- AISLANTE
- 4.- LAMINA DE ALUMINIO
- 5.- BARRA DE ALUMINIO
- 6.- VIDRIO
- 7.- APOYO
- 8.- BASTIDOR

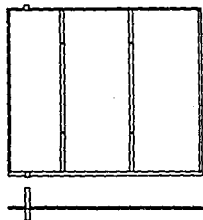
NUMERO	CANTIDAD	MATERIAL	OBSERVACIONES
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN			
ESCALA 1/100	ACDT. mm	FECHA:	Rev. LEYVA
UNAM	SECADOR SOLAR		DIBUJO
TESIS			CARAPIA.
			LAMINA 2



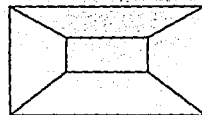
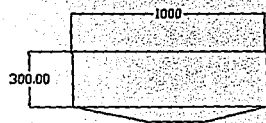
CAMARA DE SECADO



CAMPANA



ESQUELETO DEL COLECTOR



CRIBA

NUMERO	CANTIDAD	MATERIAL	OBSERVACIONES
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUATITLAN			
ESCALE 1:22	ACOTACION mm	FECHA	REVISOR LEYVA
UNAM	SECADOR SOLAR		DIBUJADOR CARAPIA
TESIS			LAMINA 3

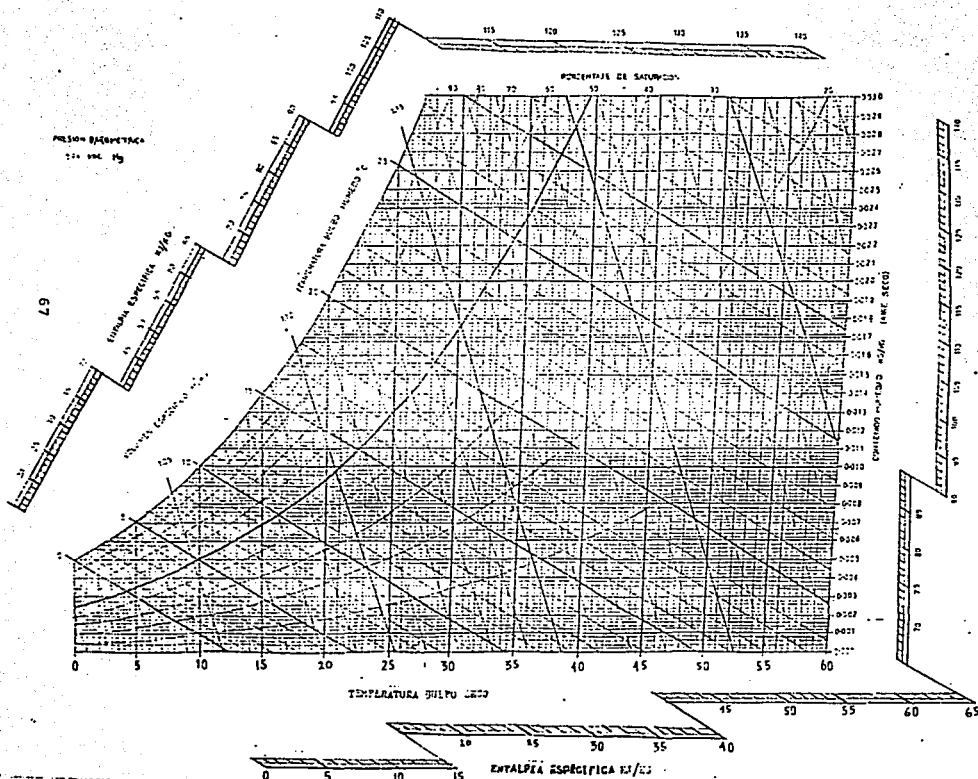
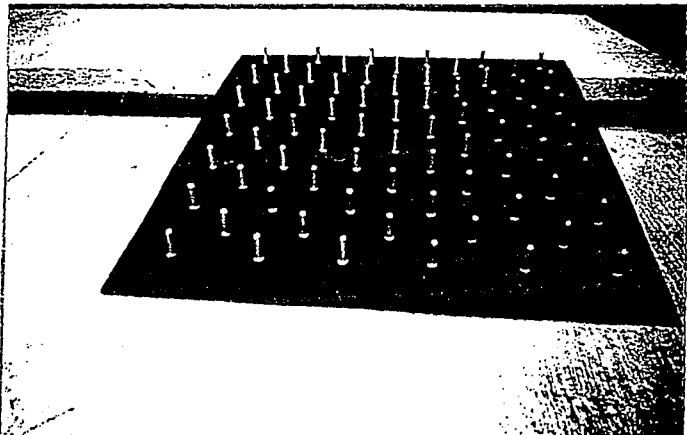




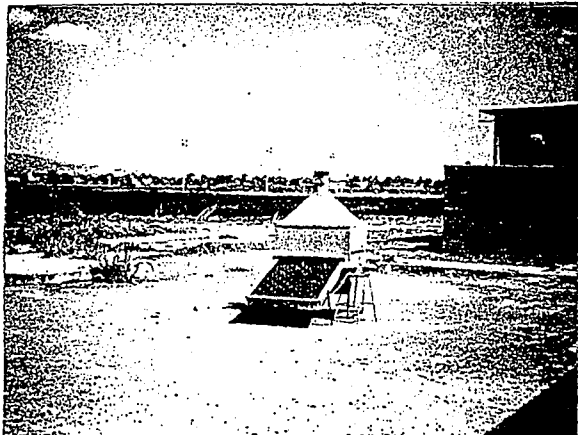
Foto: 1.- Cámara de secado.



Fotografía 2.- Banco de barras sobre la placa absorbedora.



Fotografía 3.- Secador solar.



Fotografía 4.- Secador solar, instalado y listo para llevar a cabo pruebas de eficiencia.

CONCLUSIONES

El maíz en el momento de su cosecha contiene entre un 24 y 30% de humedad, y para un óptimo almacenamiento se requiere como mínimo tenga el 18%, al utilizarse el secador solar, en la prueba que realizamos en las instalaciones de la escuela se utilizaron 9011 gramos, procesándose dicho maíz por solo dos días que fueron los siguientes: Miércoles 24 y Jueves 25 de Mayo de 1995, de las diez a las quince horas, se obtuvo como resultado el que se haya logrado obtener una pérdida de peso y de humedad del 59.60% que contenían tales granos, y toda vez que dadas las condiciones climatológicas que imperan en el Valle de México, dado el smog y las nubes que se presentaron en las fechas en que se llevó a cabo la prueba, se desprende que la eficiencia del secador solar, resulta que sí es eficaz y rentable en el secado de las semillas y granos, en el almacenaje, a fin de evitar el deterioro por el exceso de humedad.

De las pruebas realizadas los días 24 y 25 de Mayo de 1995, podemos concluir que el secador solar si resulto eficiente en virtud de que se obtuvo una pérdida del 59.60% del peso original del maíz al concluir los dos días de práctica, por lo que estimamos que dicho secador tiene probabilidades de aplicarse en el nivel agroindustrial. Por último, no queremos pasar por alto que el presente trabajo de investigación tendiente a obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista, no fue posible continuar con las pruebas durante un período prolongado, por lo que los resultados obtenidos en nuestra Comunidad Universitaria, podrán ser objeto de una mayor investigación hasta probar al 100% la eficacia de nuestro secador, a fin de que se pueda patentar por la Universidad Nacional Autónoma de México, y así lograr un mayor de los recursos agrícolas con que cuenta nuestro país, a fin de satisfacer adecuadamente las demandas alimenticias del pueblo mexicano, pues es un hecho notorio la crisis económica por la que estamos atravesando.

Estimamos que el secador solar diseñado con nuestro trabajo de investigación que presentamos para la obtención y el título de Ingeniero Mecánico Electricista, resulta viable a utilizarse la energía solar en el secado de granos y semillas, invitando a la Comunidad Universitaria a que se siga investigando a fin de obtener mejores resultados en esa técnica de secado de granos y semillas; máxime que el resultado obtenido en esta investigación se debe de ponderar, ya que no se realizó en Salvatierra, Gto., en donde imperan condiciones climatológicas diversas.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Marcos Ramírez Genel.
Almacenamiento y conservación de granos y semillas.
Editorial CECSA.
Séptima impresión Sep. 1980.
- 2.- P.E. Berry.
Desecación y almacenamiento de granos.
Editorial Acribia.
Zaragoza, España.
- 3.- Héctor Tocagni.
El maíz.
Editorial Albatros.
Impreso en Argentina.
- 4.- José J. García-Badell.
La energía solar, el hombre y la agricultura.
Serie Técnica.
Editada por servicios de publicaciones agrarias.
Tercera edición Junio 1982.
- 5.- Hans Rau.
Energía solar, aplicaciones prácticas.
Boixareu editores.
Barcelona, España.
- 6.- José A. Manrique.
Energía solar fundamentos y aplicaciones fototérmicas.
Editorial Harla.
Impreso en México, 1984.
- 7.- Richard C. Schubert, L.D. Ryan.
Fundamentals of solar heating.
Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs New Jersey.
Printed in USA, 1981.
- 8.- B.V. Karlekar, R.M. Desmond.
Transferencia de calor.
Mc. Graw-Hill.
Impreso en México, 1985.
- 9.- C.H. Jensen.
Mecánica de fluidos.
LIMUSA.
- 10.- José A. Manrique, Rafael S. Cárdenas.
Termodinámica.
Editorial Harla.
México, 1981.