

42  
2ij



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONCENTRADOR  
SOLAR CILINDRO-PARABOLICO

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N :

JESUS <sup>Elpidio</sup> GARCIA CANO

FRANCISCO <sup>Javier</sup> MOLINA LEON

ASESOR: ING. FILIBERTO LEYVA PIÑA



CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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.



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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FEB-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. 29 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:  
"Diseño y Construcción de un concentrador solar cilindro-parabólico",

que presenta el pasante: Francisco Javier Molina León  
con número de cuenta: 8509382-7 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 2 de febrero de 1996

PRESIDENTE	Ing. Filiberto Leyva Piña	
VOCAL	Ing. Miguel Angel Barcenás Sarabia	
SECRETARIO	Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez	
PRIMER SUPLENTE	Ing. Emilio Juárez Martínez	
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Eduardo Covarrubias Chávez	



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

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

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

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

AT'Ni: 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 y Construcción de un concentrador solar cilindro-parabólico".

que presenta el pasante: Jesús Elpidio García Cano  
con número de cuenta: 8508970-9 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 2 de febrero de 1996

PRESIDENTE	<u>Ing. Filiberto Leyva Piña</u>
VOCAL	<u>Ing. Miguel Angel Barcenas Sarabia</u>
SECRETARIO	<u>Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez</u>
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Emilio Juárez Martínez</u>
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Eduardo Covarrubias Chávez</u>

*[Firmas manuscritas correspondientes a los miembros del tribunal]*

## INDICE.

INTRODUCCION.....	1
OBJETIVO.....	4

### CAPITULO I

#### ANTECEDENTES DE LA ENERGIA SOLAR.

1.1 ASPECTOS GENERALES DE LA RADIACION SOLAR.....	5
1.2 FACTORES QUE AFECTAN A LA RADIACION SOLAR.....	7
1.3 CONSIDERACIONES ASTRONOMICAS Y GEOGRAFICAS.....	9
1.4 CONSIDERACIONES GEOMETRICAS.....	11
1.5 CONSIDERACIONES FISICAS.....	18

### CAPITULO II

#### COMPORTAMIENTO DE LA RADIACION SOLAR A LO LARGO DEL DIA

2.1 CARACTERISTICAS DE LA RADIACION SOLAR.....	21
2.2 EFECTOS DE LA ATMOSFERA TERRESTRE SOBRE LA RADIACION SOLAR.....	25

### CAPITULO III.

#### COLECTORES SOLARES

3.0 TRANSFORMACION DE LA ENERGIA SOLAR.....	30
3.1 COLECTORES PLANOS.....	32
3.2 CONCENTRADORES SOLARES.....	34
3.3 SUPERFICIE REFLEJANTE.....	36
3.4 ABSORBEDOR SOLAR.....	37

**C A P I T U L O   I V .**

**DISEÑO DEL CONCENTRADOR Y ABSORBEDOR SOLAR.**

<b>4.1 CONCENTRADOR SOLAR.....</b>	<b>40</b>
<b>(CILINDRO PARABOLICO DE ENFOQUE LINEAL).</b>	
<b>4.2 ABSORBEDOR SOLAR.....</b>	<b>45</b>

**C A P I T U L O   V .**

**PRUEBAS DEL CONCENTRADOR SOLAR**

<b>5.1 EFICIENCIA DEL CONCENTRADOR.....</b>	<b>61</b>
<b>(GRAFICAS Y RESULTADOS).</b>	

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>71</b>
--	-----------

<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>73</b>
--------------------------	-----------

## **INTRODUCCION.**

El interés de desarrollar fuentes energéticas a las convencionales como lo son el petróleo, carbón, gas natural y madera, ha crecido en prácticamente todos los países industrializados y antes de que estas fuentes de energía no renovable se agoten, es importante incrementar el uso de nuevas formas de energía alternativa, como lo es :

- a) La energía nuclear.
- b) La energía solar.

La energía nuclear requiere de un alto grado de tecnología, así como de altos costos de operación y de riesgo, lo que la hace prácticamente restringida en su utilización.

La energía solar por su parte representa una prometedora y conveniente fuente de energía alternativa, sin la necesidad de alta tecnología y con la facilidad de utilización muy generalizada. Este tipo de energía ha sido investigada sobre todo en países como Estados Unidos, la URSS, Japón, Alemania Occidental, Francia e Israel.

La energía solar puede ser aprovechada utilizando diferentes

principios de conversión, los cuales se dividen en cuatro grupos de transformación de energía solar en energía útil:

- a) Termoquímicos.
- b) Fotovoltaicos.
- c) Termiónicos.
- d) Termodinámicos (por calentamiento).

Cada uno de los tipos de procesos de conversión implica el desarrollo de tecnologías diferentes. La transformación de la energía solar en calor útil (conversión termodinámica) y el posterior aprovechamiento de esta, resultan atractivos en múltiples aplicaciones:

a) A bajas temperaturas (hasta alrededor de 80°C), en sistemas de acondicionamiento ambiental, calentamiento de agua para uso doméstico ó secado de materias orgánicas.

b) A medianas temperaturas (entre 100 y 150 °C), en procesos industriales con uso intensivo de calor, como los de las industrias siderúrgicas y del vidrio, para precalentar las materias primas; o como una parte del proceso en la industria textil y la del papel.

c) A altas temperaturas (mayores de 200°C), para generar energía mecánica o eléctrica.

Dentro de los sistemas de conversión termodinámica a medianas y altas temperaturas que permiten generar energía eléctrica pueden distinguirse los lagos solares, los sistemas que emplean enfoque en campos distribuidos y los sistemas de torre central que emplean campos de helióstatos.

México esta en una zona geográfica que resulta atractiva desde el punto de vista de disponibilidad del recurso solar, esta y otras razones han propiciado que en nuestro país, desde hace unos años se han venido realizando algunos trabajos sobre el tema de la conversión termodinámica de la energía solar, basados en un campo distribuido de colectores solares del tipo cilindro parabólicos de enfoque lineal. Este tipo de experimentos constan de espejos cilindro parabólicos movibles, los que guiados por dispositivos electrónicos son capaces de seguir el movimiento aparente diario del sol. En el eje focal de los espejos se encuentran tubos, llamados absorbedores, que reciben la energía concentrada por los espejos y por cuyo interior circula un fluido, al cual transmiten en forma de energía calorica la energía radiante absorbida; la energía absorbida o calor ganado por el fluido puede ser aprovechado en energía mecánica, mediante un dispositivo (motor de vapor) o en energía eléctrica, si a este se le acopla un generador.

## **OBJETIVOS:**

- 1.- El presente trabajo pretende el diseño y la construcción de un concentrador solar del tipo cilindro-parabólico, lo cual permita comprender y valorar la importancia de la energía solar y su utilización futura.
- 2.- Obtener energía calorica la cual pueda utilizarse directamente o en posteriores procesos de generación de energía mecánica o eléctrica.
- 3.- Realizar un análisis del funcionamiento del concentrador para determinar la eficiencia del proceso de captación de la energía solar.

## CAPITULO I

### ANTECEDENTES DE LA ENERGIA SOLAR.

#### 1.1 ASPECTOS GENERALES DE LA RADIACION SOLAR.

El Sol es una de las estrellas del Universo y, con relación a la Tierra, es el cuerpo más importante del firmamento. A causa de su temperatura extremadamente alta, el Sol se encuentra rodeado de paredes gaseosas en el que, al cambiar su estructura interna, se produce un desprendimiento de energía en forma de luz y calor; debido a la proximidad con la tierra podemos recibir de este, no solo energía luminosa, sino también la calorica.

Con esto nos referimos a que todas las formas de energía provienen del sol; las más comunes, son los combustibles a partir de fosiles, que recibieron energía solar hace mucho tiempo y han cambiado sus características, de tal manera que actualmente se encuentran en un alto grado de concentración. Pero este aparente almacenamiento, no es suficiente. Esto implica que en un futuro será necesario utilizar nuevas formas de energía; las cuales no

se encuentran almacenadas en la naturaleza, sino que las tomaremos de manera directa de la fuente de energía más grande, el Sol.

La energía se define como la capacidad de realizar un trabajo. Desde el punto de vista práctico, constituye el elemento básico para las sociedades industrializadas y antes de que las fuentes de energía no renovable se agoten; es importante incrementar el uso de nuevas formas de energía, como lo son :

a) LA ENERGIA NUCLEAR.

b) LA ENERGIA SOLAR.

La energía nuclear requiere un alto grado de tecnología así como altos costos de operación y de riesgos en su utilización. La energía solar por su parte representa una prometedora y conveniente fuente de energía, sin la necesidad de los requerimientos de alta tecnología y con la facilidad de que su utilización puede generalizarse. Un punto ahora muy importante, es que representa una alternativa para reducir la contaminación; que es un problema que nos afecta en la actualidad.

La energía solar, además, es inagotable y hasta el momento no se ha encontrado otra que tenga esta propiedad, pues la misma energía nuclear, por el proceso de fusión, aun no esta resuelta todavía.

Este tipo de energía representa una alternativa a la solución de escasos de energéticos. La suma de energía solar que es interceptada por la atmósfera de la tierra es de 170 trillones

de kilowatts, que es aproximadamente 5,000 veces mayor que la suma de todas las energías disponibles. De la energía solar recibida por el sol, 30% es reflejada al espacio, 47% es convertida a baja temperatura y se radia al espacio, el 23% se convierte para el ciclo de evaporación en precipitación en la biosfera; menos del 0.5% se presenta en la energía cinética del viento, las olas y para la fotosíntesis en las plantas. La suma de la energía interceptada por la tierra, es por tanto solo una pequeña fracción un mil de millones del total radiada durante la conversión de 4 millones de toneladas por segundo de hidrógeno a helio en el sol.

La energía solar es transmitida a través del espacio en forma de radiación electromagnética. Esta radiación total recibida en la superficie viene siendo un residuo, después de que el flujo extraterrestre ha sido atenuado por la absorción y dispersión atmosférica; lo que significa que la radiación solar en la ausencia de nubes depende de la altura solar, la distancia tierra-sol y principalmente de la composición de la atmósfera.

## 1.2 FACTORES QUE AFECTAN A LA RADIACION SOLAR.

Debido a que la energía solar sólo esta disponible durante el día y en periodos en los cuales el sol no es oscurecido por las nubes, se requiere de un medio que pueda proveer calor en forma continua.

El potencial total de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, así como su distribución espectral y

espacial, depende de las propiedades del sol, de parámetros astronómicos, así como del estado y características locales de la atmósfera terrestre. De hecho para garantizar un grado de integridad y detalle se debe considerar los diferentes factores que han sido clasificados de la siguiente manera:

**ASTRONOMICOS:**

- 1) Espectro solar.
- 2) Magnitud de la constante solar.
- 3) Variación de la distancia entre la tierra y el sol.
- 4) Declinación solar.
- 5) Variación con el ángulo horario.

**GEOGRAFICOS:**

- 6) Latitud.
- 7) Longitud.
- 8) Altura sobre el nivel del mar
- 9) Geografía de la localidad (costas, montañas, ciudades, desiertos, etc).

**GEOMETRICAS:**

- 10) Altura solar.
- 11) Azimut del sol.
- 12) Inclinação del plano receptor.
- 13) Rumbo del plano receptor.

**FISICOS:**

- 14) Contenido de agua en la atmósfera.
- 15) Turbidez de la atmósfera.
- 16) Contenido de gases permanentes.
- 17) Efectos de la nubosidad del cielo.

### 1.3 CONSIDERACIONES ASTRONOMICAS Y GEOGRAFICAS

La Tierra gira alrededor del Sol en una trayectoria aproximadamente circular con el Sol localizado ligeramente fuera del centro del círculo, a este movimiento en particular se le conoce como traslación de la tierra; y hace posible la existencia de las cuatro estaciones del año, con un periodo cálido, uno frío y dos con temperaturas intermedias; esto es, que mientras el 1 de enero aproximadamente, la tierra está en su posición más cercana al Sol, el 1 de julio, está en la más remota, lo cual es cerca de 3.3% más lejos; por tal razón la Tierra recibe un 7% más de radiación solar en enero que en julio. Mientras que la tierra gira alrededor del sol en su revolución anual, ésta experimenta un movimiento de rotación diario sobre su propio eje, permitiendo así en un término aproximado de 24 horas, transcurra un periodo de día con radiación solar y otro periodo de noche con la ausencia de ésta. Además durante su movimiento tiene lugar otro aspecto importante, que la rotación se ejecuta sobre un eje inclinado que va de  $23.5^\circ$  a  $-23.5^\circ$  con respecto a su órbita alrededor del Sol. La posición inclinada de la Tierra junto a la rotación diaria y el movimiento anual, gobiernan la distribución de la radiación solar sobre su superficie, la longitud variable del día, la noche y el cambio de estaciones. (fig 1.1. )

Con lo anterior tenemos que la radiación solar no llega uniformemente a la Tierra y la naturaleza de esta variación se

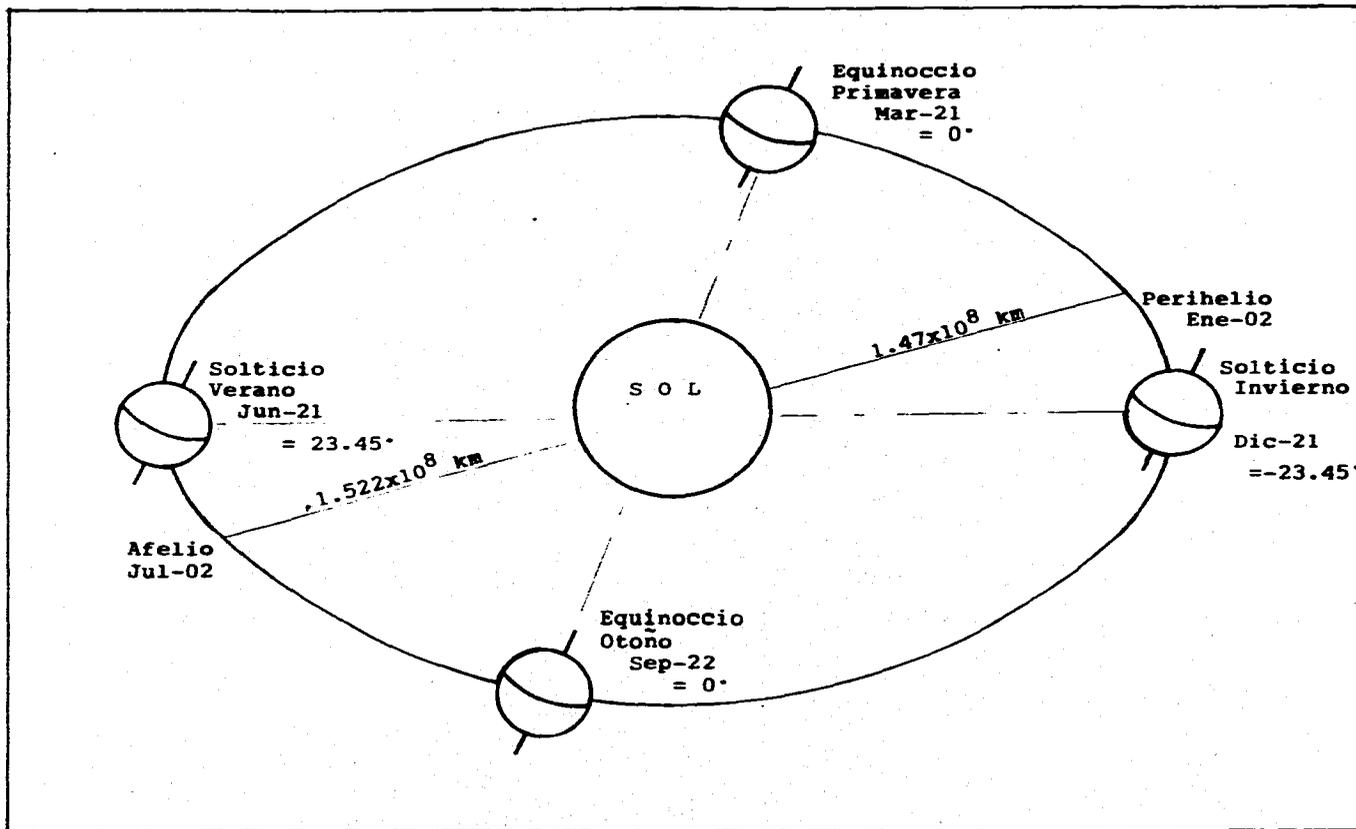


Fig. 1.1. Movimiento de traslación de la Tierra.

debe principalmente a:

- a) El movimiento de rotación.
- b) A la inclinación de la Tierra.
- c) Al movimiento de traslación

A causa de su eje inclinado, la superficie de la tierra se ha dividido en 5 zonas. La zona tórrida incluye todos los lugares donde el Sol está en el cenit (perpendicular a la superficie de la tierra ) al menos una vez al año. La zona tórrida extiende  $23.5^\circ$  a cada lado del Ecuador. Las zonas templadas incluyen todos los lugares donde el Sol aparece todos los días en el horizonte, pero nunca en el cenit. Las zonas templadas se extienden en latitudes de  $23.5^\circ$  a  $66.5^\circ$  (norte y sur). Las zonas frías incluyen todos los lugares donde el Sol permanece por debajo del horizonte (o sobre él) al menos un día completo cada año. Las zonas frías se extienden  $23.5^\circ$  desde los polos.

#### 1.4 CONSIDERACIONES GEOMETRICAS.

Para poder obtener el máximo aprovechamiento de la energía solar es necesario determinar una serie de ángulos que nos ayudaran a obtener este máximo aprovechamiento; estos ángulos pueden ser medidos con respecto al lugar en estudio y de esta forma relacionarlos entre si y determinar la importancia que tiene cada uno de ellos.

LATITUD ( $\phi$ ): La situación geográfica de un lugar de la superficie terrestre puede determinarse por su distancia al norte o al sur de la línea del ecuador. La latitud aumenta desde  $0^\circ$  hasta  $90^\circ$  en dirección al polo norte y de  $0^\circ$  a  $-90^\circ$  al polo sur. Las líneas que sirven para indicar la latitud se denominan "PARALELOS". La distancia de un grado de latitud en kilómetros es aproximadamente la misma cerca del ecuador o de los polos. Sin embargo la superficie terrestre es un poco más curva cerca del ecuador que en las regiones polares, por lo que un grado de latitud en el ecuador es un poco más corto (110.57 Km) que un grado cercano al polo (110.70 Km), siendo ambas distancias medidas sobre la superficie terrestre.

DECLINACION ( $\delta$ ): Es el ángulo que se forma con el plano del ecuador y los rayos solares. Es importante considerar para entender cada ubicación; que el sol se mueve alrededor de la tierra en una trayectoria que forma un ángulo de aproximadamente  $23.5^\circ$ , el cual debido al movimiento de traslación modifica su valor de declinación de  $+23.45^\circ$  a  $-23.45^\circ$  con respecto a los rayos solares (fig 1.2). Un gran cambio en la radiación extraterrestre aparente es causada por la distancia a que se encuentra el Sol de la Tierra, por lo que se dan los cambios de estaciones, al variar la radiación incidida a través del espacio. Debido a lo anterior también existen cambios por la altura del sol y a los ángulos azimutales (relativos al colector solar), así como a los cambios de duración del tiempo en el que el sol permanece en el horizonte. La declinación tiene un efecto hasta

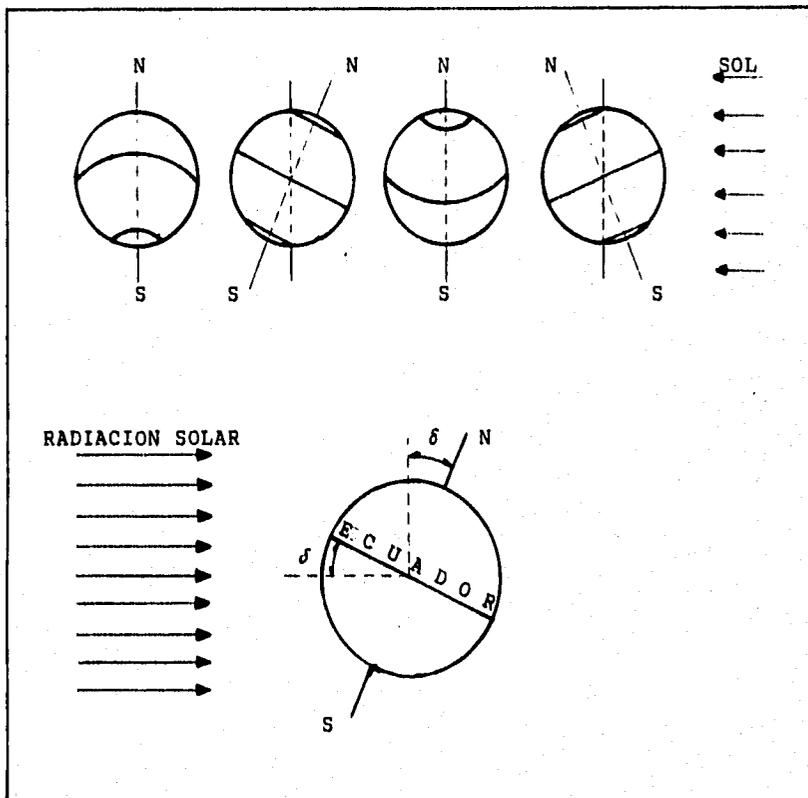


Fig. 1.2. Declinación de la Tierra con respecto al Sol.

importante sobre la radiación total que se recibe en cada punto geográfico.

Cuando la declinación adquiere un valor positivo, la tierra empieza a mostrar el polo norte a los rayos solares y oculta el polo sur; esto sucede en la primavera y los valores cambian de  $0^\circ$

+23.45°. En verano, van de +23.45° hasta 0°. En otoño se modifica de 0 hasta -23.45° y por último, en invierno comienza con -23.45° y finaliza con 0°. El ciclo completo de la declinación se cumple cada año por el movimiento de traslación de la tierra. Por lo anterior, el casquete norte recibe menor cantidad de energía del sol en invierno que el casquete sur, mientras que en verano sucede lo contrario.

La declinación dada en un año difiere de la del año anterior inmediato, aproximadamente en un cuarto de día por eso cada cuatro años hay un factor de corrección, debido a que la declinación se repite exactamente igual en ciclos de cuatro años. El valor de la declinación en un día dado, se puede obtener a partir de las tablas, medidas con anterioridad, o también utilizando la ecuación de Cooper, que es:

$$\delta = +23.45 \cos ((n - 172) * 0.985648)$$

donde : n = Es el día del año cuya declinación se desea conocer.

$\delta$  = Es el ángulo de la declinación (en grados).

**LARGO DEL DIA (Td):** La componen la declinación de la tierra y la latitud del lugar geográfico en estudio. La radiación que se recibe en la tierra va modificando la hora en que sale y se oculta el sol en el horizonte del lugar a lo largo del año; por ejemplo se puede tener luz de día de 0 a 24 horas en los polos,

mientras que en el Ecuador siempre dura 12 horas. Para encontrar cuál es el largo del día que corresponde a un lugar, solo intervienen los ángulos de la latitud y la declinación. El valor de la duración del día se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{2}{15} \cos (-\text{tg } l * \text{tg } \delta)$$

donde:  $l$  = Es la latitud del lugar.  
 $\delta$  = Es la declinación de la tierra.  
 $t_d$  = Largo del día en horas.

Cuando la declinación es nula, la duración del día es de 12 horas (en cualquier lugar), esto es, para el equinoccio de primavera y otoño. Cuando la declinación es máxima suceden los solsticios de verano e invierno.

**ANGULO HORARIO ( $\omega$ ):** Es el desplazamiento angular del Sol del Este a Oeste del meridiano local, debido a la rotación de la Tierra sobre su eje que es perpendicular al plano del Ecuador y cambia a razón de 15 grados por hora.

Para determinar este ángulo es necesario conocer la hora solar del lugar en estudio que corresponde a su meridiano. Esto es, cuando el sol apunta sobre la mitad del día solar, son las 12 horas solares y el meridiano del lugar queda alineado al sol y por tanto el ángulo horario es de cero grados. En las mañanas el valor del ángulo horario es positivo y por las tardes es negativo. La ecuación que representa a este ángulo es la

siguiente:

$$\omega = (12 - \text{hora}) \cdot 15$$

$\omega$  = Es el ángulo horario (en grados).

hora = Es valor decimal de la hora solar (hrs).

**ALTURA SOLAR ( $\alpha$ ):** Es la altura angular del horizonte celeste del observador y de ahí que sea un ángulo entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$

**ANGULO DE INCIDENCIA o INCLINACION ( $\zeta$ ):** Es el ángulo entre la dirección de los rayos solares sobre una superficie (CAPTADOR) y la normal a dicha superficie. Si el captador se levanta hacia el Sur el ángulo es positivo, mientras que si se levanta hacia el Norte es negativo.

**ANGULO AZIMUTAL ( $\theta_z$ ):** Es el ángulo medido horizontalmente entre la proyección de la normal de la superficie y el meridiano local tiene valores entre  $-180^\circ \leq \theta_z \leq 180^\circ$ , siendo negativo al Oeste y positivo al Este. EL ángulo azimutal resulta del giro del captador sobre la superficie del lugar, tomando como eje de giro la vertical del lugar y teniendo como referencia el eje sur.

**ANGULO DEL CENIT ( $\psi$ ):** Es el ángulo formado entre el rayo incidente y la vertical a la superficie horizontal y tiene valores entre  $0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$  ( $\alpha + \psi = 90^\circ$ ).

$$\cos \psi = \cos l \cos \omega \cos \delta + \sin l \sin \delta$$

**HORA SOLAR O TIEMPO SOLAR:**

$$T_s = T_{of} - ET - LA$$

donde:  $T_{of}$  = Tiempo oficial del lugar.  
 $LA$  = Factor de corrección debido a la longitud  
 $ET$  = Ecuación del tiempo

**FACTOR DE CORRECCION DEBIDO A LA LONGITUD.**

$$LA = (\text{long.local} - \text{long.tiempo meridiano oficial}) * 4\text{min}/1$$

**ECUACION DEL TIEMPO:**

$$ET = (0.1236 \text{ sen}x - 0.0043 \text{ cos}x + 0.1538 \text{ sen}2x + 0.0608 \text{ cos}2x)60$$

donde :  $x$  = es función del día del año.

$$x = \frac{360 (n-1)}{365.242}$$

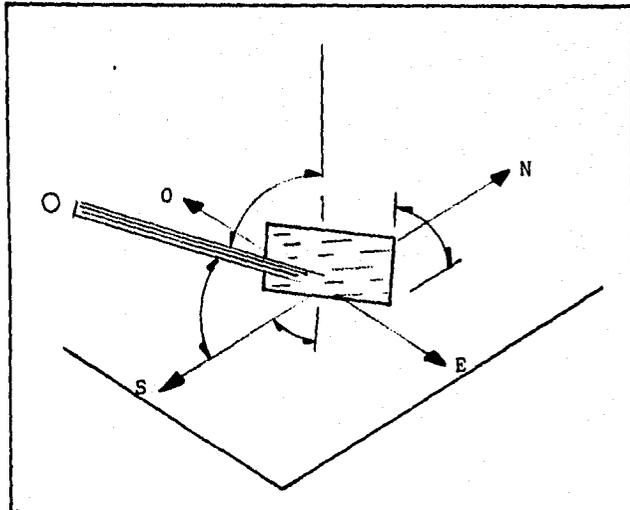


Fig. 1.3. Angulo zenital, de inclinación y azimutal para una superficie inclinada.

## 1.5 CONSIDERACIONES FISICAS.

Se puede considerar que los factores astronómicos así como las propiedades del sol, son de alguna manera lo suficientemente bien conocidas, mientras que la estructura de la atmósfera de la tierra es compleja, siendo su comportamiento más difícil de predecir y de tomar en cuenta.

Esto significa que la composición de cualquier sistema de captación solar depende grandemente de la radiación de que puede disponer; ya que la radiación solar se caracteriza por su variabilidad durante el día y alcanzando su máximo potencial al medio día.

Aún cuando el captador se esté moviendo continuamente hacia el sol, el cambio de altitud y de azimut hacen reducir el calor captado por debajo del máximo potencial, ya que las horas de luz de día, también varían según la estación del año.

Para predecir o evaluar el funcionamiento de cualquier sistema de conversión de energía solar, en energía útil se hace necesario conocer la magnitud de la radiación solar directa y difusa que llega a un lugar dado, sobre la superficie de la tierra.

En algunos países desarrollados existe información histórica experimental horaria, diaria y mensual acerca de la magnitud de la radiación solar en distintos sitios. Sin embargo, en países subdesarrollados o en vías de desarrollo generalmente se carece

de esta información y solo se cuenta con estimaciones mensuales promedio.

En ausencia de datos experimentales existen numerosas correlaciones para estimar la radiación mensual promedio sobre una superficie horizontal en un lugar dado. Estas correlaciones hacen uso de información fácilmente obtenible; número de horas de asoleamiento o porcentaje de horas posibles, latitud del lugar, precipitaciones pluviales, etc.

Por otra parte, existen mapas de radiación mensual promedio para todo el mundo. La figura 1.4 muestra las curvas de radiación global anual para la República Mexicana. En este caso particular se observa que la península de Yucatán, la península de Baja California y la costa Occidental son las zonas más favorecidas con la radiación solar. De una extensión territorial aproximadamente 2,000,000 Km<sup>2</sup>, casi 40% del país recibe más de 500 cal/cm<sup>2</sup> • día (20.93 MJ/m<sup>2</sup> • día).



## C A P I T U L O    I I

### COMPORTAMIENTO DE LA RADIACION SOLAR A LO LARGO DEL DIA.

#### 2.1 CARACTERISTICAS DE LA RADIACION SOLAR.

La estructura y características del Sol determinan la naturaleza de la energía que es radiada hacia el espacio. El sol es una esfera de materia gaseosa de alta intensidad cuyo diámetro es de  $1.39 \times 10^6$  km. En su superficie la temperatura es de  $5762^\circ\text{K}$  la energía es transmitida fuera de la superficie y posteriormente radiada hacia el espacio. La radiación básica en el Sol se encuentra entre los rayos x y gama del espectro de ondas electromagnéticas.

Debido a la excentricidad de la órbita de la tierra, la distancia entre esta y el Sol varía 3% a la distancia de una unidad astronómica; que es la distancia media entre la tierra y el sol. El sol puede verse desde la tierra con un ángulo de 32 minutos (fig 2.1).

La radiación total interceptada por la tierra es de unos  $1.73 \times 10^{14}$  kW. La radiación solar recibida fuera de la atmósfera terrestre es prácticamente constante, mientras que la recibida sobre la superficie terrestre varía considerablemente. La energía recibida del Sol en un área unitaria expuesta perpendicularmente a sus rayos, a una distancia promedio entre el Sol y la Tierra, y en ausencia de la atmósfera terrestre recibe el nombre de **constante solar**, que nos proporciona una medida de la energía total obtenida mediante la adición de todas las longitudes de onda en el espectro.

Si bien es cierto que el término **constante solar** es equivocado porque realmente esta cantidad no es una constante, ya que aparentemente varía unos decimos para periodos de varios años y varía ligeramente con la actividad de las manchas solares; para fines prácticos esta variación es realmente despreciable y se

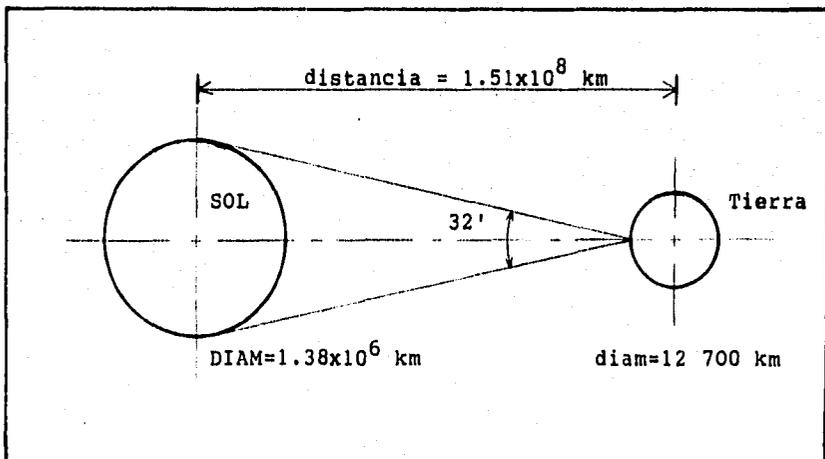


Fig. 2.1. Incidencia de los rayos solares en la Tierra

puede considerar que la energía emitida por el sol es fija. De hecho, el valor exacto de la constante solar aun no ha sido determinado precisamente. El conocimiento de la constante solar es de fundamental importancia para la determinación de los fenómenos de la atenuación de la radiación solar en la atmósfera. Dado un valor de la constante solar, es posible encontrar valores de la radiación a nivel de la superficie terrestre. Es decir la constante solar es la cantidad básica que determina todos los cambios subsecuentes de la radiación en la atmósfera.

En la actualidad el valor que se maneja para fines prácticos y que se a utilizado en una gran cantidad de trabajos es el valor de  $1367 \text{ W/m}^2$ , estimandose un error de  $\pm 1.5 \%$ .

Una vez considerado el problema de la constante solar, se trata ahora el valor de la irradiación solar fuera de la atmósfera, que debe ser diferente del valor de la constante solar, a cada instante como consecuencia de la considerable variación de la distancia entre la tierra y el sol durante el año.

## 2.2 EFECTOS DE LA ATMOSFERA TERRESTRE SOBRE LA RADIACION SOLAR.

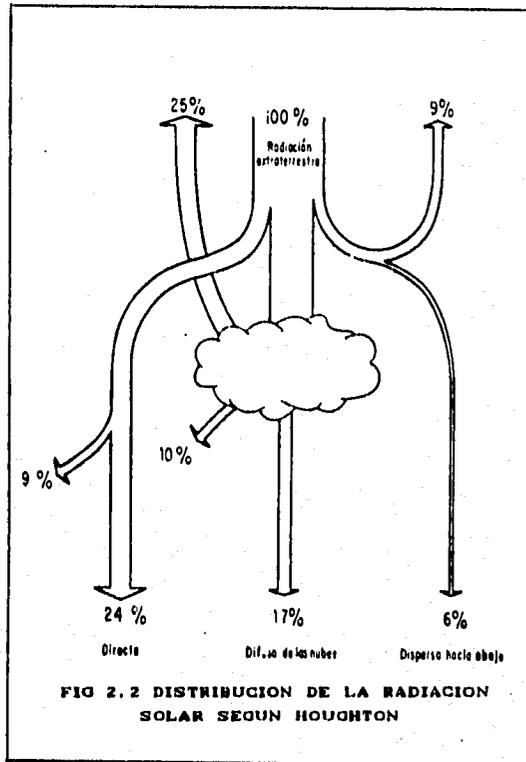
No toda la radiación del Sol tiene la misma longitud de onda. El espectro solar comprende la región ultravioleta con 9.293% de la energía, la región visible con 41.476% de la energía y la región infraroja con 49.231% de la energía. La máxima intensidad de la energía solar ocurre en la región visible del espectro. Las características del espectro solar son

importantes para seleccionar algunos de los materiales empleados en el aprovechamiento de esta fuente.

Como ya se mencionó anteriormente, la radiación solar total recibida en la superficie de la tierra viene siendo un residuo después de que el flujo extraterrestre ha sido atenuado por la absorción y dispersión atmosférica.

La radiación solar se altera considerablemente (por dispersión y absorción) al pasar através de la atmósfera y el total incidente sobre la superficie horizontal terrestre rara vez excede de 1.0 kW/m<sup>2</sup>. La radiación solar se compone de una componente directa y una difusa. La primera de ellas se refiere al flujo de rayos solares recibidos desde la dirección del disco solar; la radiación difusa por su parte es la que llega a la superficie terrestre desde el resto del cielo y es producto de la dispersión que sufre la luz solar a través de la atmósfera terrestre (ver fig 2.2). La proporción de cada una de ellas en la radiación total, depende de la nubosidad, humedad, presencia de partículas suspendidas en la atmósfera y otras condiciones ambientales, pudiendo llegar a corresponder a la radiación difusa desde 10% hasta 85% de la total, siendo esta proporción menor en zonas tropicales; esto es que la radiación solar recibida es diferente para distintas latitudes y la que llega sobre superficies inclinadas difiere de la recibida sobre superficies horizontales.

La radiación total promedio anual sobre la superficie de la Tierra varía entre 2,000 y 2,500 kWh/m<sup>2</sup> en zonas de alta



insolación (zonas áridas) y entre 1,000 y 1,500 kWh/m<sup>2</sup> en lugares localizados en latitudes altas.

Las variaciones estacionales de la radiación total pueden alcanzar proporciones del 1:2 en zonas de alta insolación y hasta 1:10 en zonas de alta latitud; a pesar de esto, comparada con los combustibles fosiles, la energía solar está mejor distribuida desde el punto de vista geográfico.

Para nuestro caso en particular y partiendo del uso de la componente directa de la radiación; esta se ve afectada por la disminución de energía que llega a través de la atmósfera, pero

depende también de la posición del plano de captación, es decir, si se logra apuntar el plano de captación hacia el sol es posible obtener la máxima radiación directa quedando así el ángulo de incidencia de los rayos solares  $\phi$  en función de los ángulos:

- a) Latitud del lugar ( $\lambda$ ).
- b) Angulo horario ( $\omega$ )
- c) Declinación de la tierra ( $\delta$ )
- d) Angulo azimutal ( $\theta_z$ ).
- e) Angulo de inclinación ( $S$ ).

que son los que determinan la posición del plano de captación sobre la superficie de la tierra.

A pesar de que se han desarrollado una gran cantidad de métodos empíricos para estimar la radiación solar, difícilmente podría decirse que todos tienen una validez universal. Sin embargo, un buen método es el propuesto por ANGSTROM, el cual ha sido aplicado con resultados muy satisfactorios en gran cantidad de localidades en el mundo con gran diversidad de climas. Este método permite realizar evaluaciones razonablemente buenas para periodos grandes de tiempo, por lo menos promedios mensuales y no es válido para periodos más pequeños.

En general, los métodos empíricos han sido desarrollados para cuantificar únicamente la irradiación solar total o global.

Se han propuesto una gran diversidad de métodos empíricos que continuamente son modificados con la intención de mejorar las estimaciones.

A continuación presentamos uno de estos métodos empíricos usados para estimar la radiación directa y así determinar la eficiencia del concentrador solar.

#### RADIACION EXTRATERRESTRE.

$$H_o = (4 \cdot 3600) / \pi \cdot G_{cs} \cdot (R/R)^2 \cdot (\cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + (2\pi\omega_s / 360) \cdot \sin\phi \cdot \sin\delta)$$

donde:

$H_o$  = Irradiación solar extraterrestre total diaria. ( MJ /m<sup>2</sup> ).  
 $n_d$  = Día del año.

El factor  $(R/R)^2$  se evalúa con la ecuación de Watt que proporciona expresiones para diferentes épocas del año.

$$(R/R)^2 = (1.0 - 0.0343 \cdot \sin(1.0(n_d - 93))) \quad \text{para } 1 < n_d < 93$$

$$(R/R)^2 = (1.0 - 0.327 \cdot \sin(0.989(n_d - 277))) \quad \text{para } 94 < n_d < 277$$

$$(R/R)^2 = (1.0 - 0.343 \cdot \sin(0.989(n_d - 277))) \quad \text{para } 278 < n_d < 365$$

#### INDICE DE CLARIDAD.

En realidad son varios los parámetros que afectan el nivel de radiación solar difusa, y se pueden reducir a cuatro de importancia: nubosidad, masa de aire, turbidez y reflexiones múltiples entre la atmósfera y el suelo.

Siendo la nubosidad la característica que más afecta el nivel de radiación difusa, la cual se puede expresar como la fracción de horas de insolación ( $\bar{n}/N$ ); parece ser que la mejor manera de medir numericamente es a través del índice de claridad  $K_t$  el cual además incluye los efectos de otros elementos que absorben y dispersan la radiación solar en la atmósfera.

$$K_t = H/H_0$$

donde:  $k_t$  = Índice de claridad.

H = Radiación total.

De lo anteriormente expuesto se derivan las siguientes ecuaciones para evaluar la radiación difusa y directa a partir de conocer la radiación total.

**RADIACION DIFUSA.**

$$H_d = H * (1.0 - 1.13 K_t)$$

donde:  $H_d$  - Radiación difusa.

**RADIACION DIRECTA.**

$$H_b = H - H_d$$

donde;  $H_b$  - Radiación directa.

### RADIACION DIRECTA MAXIMA.

Se ha encontrado que la forma clásica de la distribución instantánea de la radiación global  $G$ , puede aproximarse muy bien, por la expresión:

$$G = G_{\max} \cos^{\alpha} (180 \cdot t/N)$$

donde  $G_{\max}$  es la radiación total máxima recibida a medio día solar,  $\alpha$  es un exponente cuyo valor se determina empíricamente,  $t$  es la hora solar verdadera, positiva en la tarde y negativa en la mañana ( $t = \omega / 15$ ) y  $N$  es la duración del día solar. Lo mismo puede decirse del valor instantáneo de la radiación solar directa colocando el subíndice  $b$  en la ecuación anterior.

Se ha encontrado que se obtiene buenos resultados con  $\alpha = 1.5$  para evaluar  $G_b$  con lo que se llega a la siguiente ecuación:

$$G_{b\max} = 1.797210352 \cdot (H_b/N)$$

donde:  $G_{b\max}$  = Radiación solar directa máxima ( $W/m^2$ )

$H_b$  = Radiación directa en  $MJ/m^2$

$N$  = Largo del día en seg.

### EFICIENCIA DEL CONCENTRADOR

$$\eta_c = \frac{q_{\text{agua}}}{G_b} \cdot 100$$

## C A P I T U L O     I I I

### COLECTORES SOLARES.

#### 3.1 TRANSFORMACION DE LA ENERGIA SOLAR.

La energía solar puede ser aprovechada utilizando diferentes principios de conversión, los cuales se dividen en cuatro grupos de transformación de energía solar en energía útil:

- a) Termoquímicos.
- b) Fotovoltaicos.
- c) Termoiónicos.
- d) Termodinámicos (por calentamiento).

Las tecnologías termodinámicas tienen como propósito capturar la energía solar y convertirla en calor útil, el que posteriormente puede ser transformado en energía mecánica o eléctrica. Los sistemas fotovoltaicos convierten directamente la energía solar captada en energía eléctrica, al generarse portadores móviles de carga eléctrica, como resultado de la absorción de la energía de los fotones que inciden sobre

materiales semiconductores. La conversión fotoquímica se refiere a tecnologías que producen energía química libre a partir de la radiación solar. Los procesos termiónicos aprovechan la emisión de electrones desde un cátodo caliente, convirtiendo así la energía calorífica directamente en electricidad. Los dos primeros grupos de tecnologías han sido los más estudiados y en los que se ha logrado un mayor desarrollo. Algunos autores consideran que la mayor parte de las tecnologías solares no son todavía alternativas realmente viables pero también señalan como excepción algunas de ellas, entre las que se encuentran: los colectores planos para calentamiento de agua (de tipo termosifónico, sin bombas, controladores o mantenimiento); los sistemas térmicos pasivos (generalmente vinculados con la helioarquitectura); los colectores planos (para aire) asociados con sistemas para secar diferentes materiales orgánicos, y otros sistemas como los lagos solares o sistemas de concentración para proporcionar calor industrial, aunque solo viables en situaciones específicas.

La conversión termodinámica ha sido sin duda el proceso de aprovechamiento de la energía solar más estudiado y explotado desde la antigüedad. Se trata en esencia de colocar, expuesta a la radiación solar (directa o reflejada) una superficie (colector-absorbedor) que, por efecto de la radiación que recibe, aumenta su temperatura. el calor así ganado se transfiere a algún fluido (aire, agua, aceites, fluidos de alto peso molecular, etc), empleado para proporcionar energía útil (calorífica, mecánica,

eléctrica). Las tecnologías para la conversión termodinámica eficiente de la energía solar en energía calorífica presentan grandes diferencias y niveles de complejidad según las temperaturas con las que se aproveche. Los sistemas más económicos y simples son aquellos que operan a temperaturas menores de 100 °C, los que requieren mayores inversiones y tecnologías más avanzadas son las que generan calor a altas temperaturas (mayores de 200- 250 °C) y que están normalmente asociados con la generación de energía eléctrica.

Un colector de energía solar, es un dispositivo que capta la energía solar tanto directa como difusa y su principal aplicación depende, a que se destine esta energía. Los colectores térmicos solares, es decir, los que aprovechan la energía calorífica de radiación solar, se pueden clasificar en:

- a) Colectores planos de baja temperatura y sin concentración.
- b) Colectores con concentradores para temperaturas intermedias.
- c) Colectores de gran concentración y altas temperaturas.

### 3.1 COLECTORES PLANOS.

Este tipo de colectores planos se usan generalmente para calentar agua o para calefacción de edificios y solo son capaces de alcanzar temperaturas de funcionamiento de unos 65°C por

encima de la temperatura ambiente. En esencia constan de una placa negra cubierta por una o varias láminas transparentes de vidrio o plástico, aisladas por la base y los lados de la caja. La cubierta transparente debe ser opaca a la radiación infrarroja emitida por la placa colectora caliente y limitar también las pérdidas de calor por convección. La placa negra se calienta y calienta a su vez el fluido que circula bajo, a través, o por encima de la misma. Generalmente como fluido de trabajo se usa agua; una ventaja que ofrecen es que aprovechan tanto la energía solar directa como difusa.

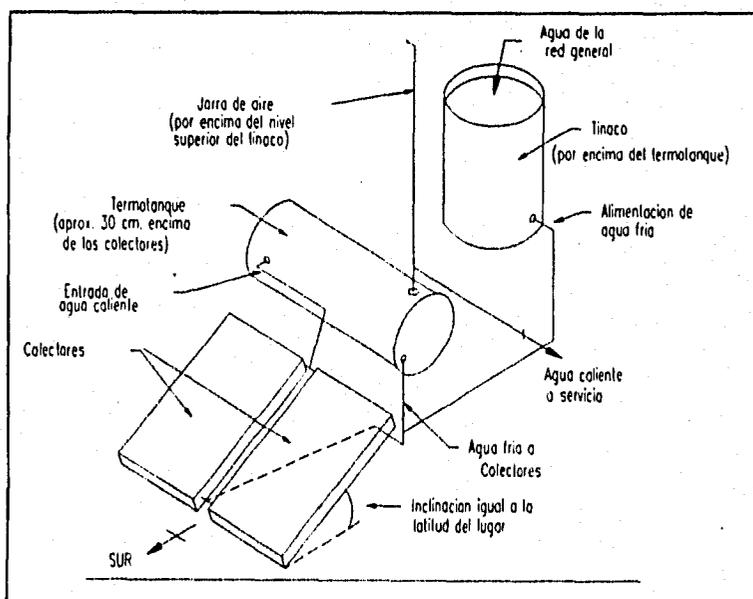


FIG 3.1 SISTEMA PARA CALENTAMIENTO DE AGUA QUE UTILIZA COLECTORES PLANOS

### 3.2 CONCENTRADORES SOLARES.

Si se desea obtener temperaturas superiores a los 150°C, sea para la producción eficiente de energía eléctrica, para secado industrial y agrícola, o para cualquier otra aplicación en la que se necesita calor a alta temperatura; existe la posibilidad de emplear concentradores para incrementar el rendimiento de los colectores. La gran mayoría de los concentradores solares emplean sistemas reflectores (espejos).

Para alcanzar una gran concentración, la forma ideal del espejo, desde el punto de vista de la óptica, es la parabólica sin embargo, este tipo de reflector tiene que ser orientado continuamente hacia el Sol y el colector o cambiador de calor mantenido exactamente en su foco.

Obviamente, la temperatura máxima alcanzada con un concentrador solar no puede exceder la temperatura del Sol. Teóricamente para un paraboloide ideal, con una reflectividad de 100 % y funcionando en el espacio, fuera de la atmósfera terrestre, la temperatura de un cuerpo negro colocado en la mancha focal podría llegar a 5400°C, pero la atmósfera reduce considerablemente la intensidad de la radiación solar incidente. La radiación solar, reflectividad del espejo, junto con otras imperfecciones, limitan la temperatura alcanzada por los colectores solares.

Un colector solar concentrador de tipo muy sencillo utiliza un reflector cilindro-parabólico para concentrar la luz solar sobre un tubo ennegrecido situado en el foco. El tubo colector,

evita las pérdidas de calor por convección. su diseño puede variar según las necesidades de transformación de la energía. ver fig. 3.2. El reflector se orienta mecánicamente durante el día



FIG 3.2 FOTOGRAFIA DE COLECTOR  
CILINDRO-PARABOLICO

para mantener enfocada la luz solar sobre el colector. Este tipo de concentrador cilindro-parabólico no es capaz de producir temperaturas tan altas como los concentradores PARABOLICOS DE ENFOQUE PUNTAL O DE REVOLUCION, pero si muy superiores a la alcanzada con paneles planos.

### 3.3 SUPERFICIE REFLEJANTE.

Uno de los objetivos de este proyecto es lograr la concentración de los rayos solares en un punto para lo cual es necesario aprovechar una propiedad física de los espejos, que consiste en que el mayor porcentaje de luz y calor (ondas electromagnéticas) que inciden sobre ellos sea reflejado y por lo tanto pueda ser utilizado. Lo que se busca es lograr una alta concentración de energía, para lo cual los espejos deberán ser colocados sobre una superficie cilindro-parabólica y así adquieran esta forma geométrica, dando la posibilidad de reflejar los rayos solares que inciden sobre el espejo hacia el punto focal de la parábola (fig 3.3).

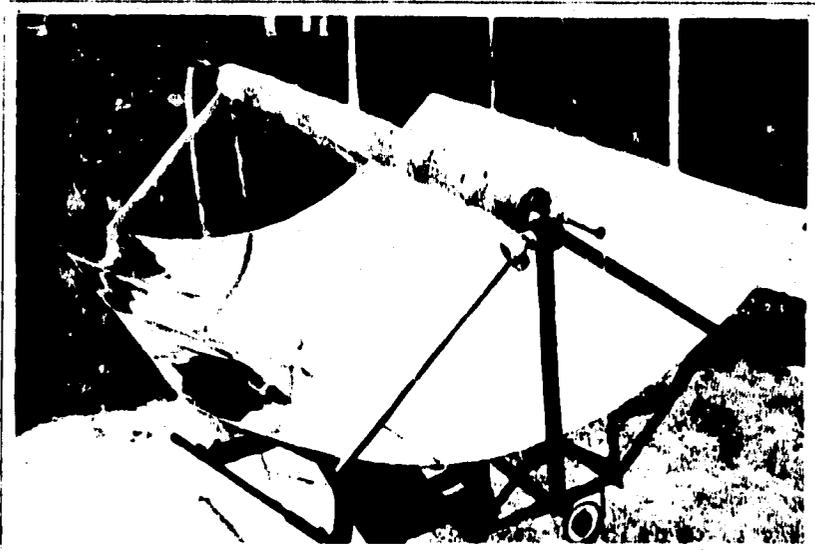


FIG. 3.3 FOTOGRAFIA QUE MUESTRA LA DISPOSICION DE LA SUPERFICIE REFLEJANTE

### 3.4 ABSORBEDOR SOLAR.

La energía que incide del Sol se puede aprovechar mediante la utilización de un espejo parabólico cuyo fin es aumentar la concentración de la energía, es decir, aumentar el flujo de radiación por unidad de área y lograr así un incremento considerable en la temperatura de equilibrio, que permite calentar el agua y producir vapor. Teniendo en consideración lo anterior, la base del generador de vapor debe estar colocada en la zona focal de la parábola. La energía que proviene del Sol va ha ser reflejada por los espejos hacia el generador de vapor (ver fig 3.4); una parte de esta energía se perdere por la

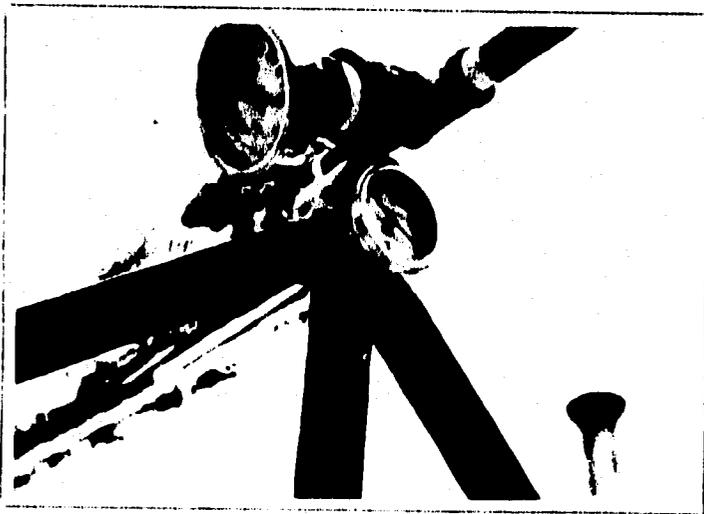


FIG. 3. 4 LA ILUSTRACION MUESTRA LA FRANJA FOCAL Y LA MANERA EN QUE SE SUJETO EL ABSORBEDOR.

deficiencia de la reflexión de la radiación solar en los espejos y otra parte la determinara la calidad del acabado del paraboloide cilindrico. Otros factores que intervienen en el aprovechamiento de la energía solar son: la eficiencia del seguimiento solar que nos permite tener enfocado al colector durante toda la trayectoria de la luz solar, la energía que llega al punto focal que es la reflejada por los espejos, con una eficiencia de reflexión. Otro porcentaje que afecta el aprovechamiento de la energía, es la absorción que es característica del material utilizado en la base del absorbedor y depende también del acabado de éste, así como la temperatura a la que sea sometido el material de la base del absorbedor.

De lo anterior se obtiene la energía reflejada por el espejo con seguimiento solar que va a absorber la línea focal y le llamaremos energía incidente en el absorbedor. Las superficies de captación y absorción de la energía solar son elementos comunes a todos los dispositivos térmicos solares. En los absorbedores se emplean superficies selectivas para lograr eficiencias térmicas más altas. Se ha desarrollado este tipo de superficies para un amplio intervalo de temperaturas de operación. Pueden emplearse diferentes recubrimientos con pintura negra, hasta unos 80°C; el cromo negro elemento depositado parece ser el más conocido y exitoso dentro de una variedad de recubrimientos producidos por técnicas de conversión química y electrodepositado, para aplicaciones de hasta unos 250°C. Para sistemas con seguimiento y temperaturas de superficie de hasta 700°C, se han desarrollado

películas de carburos metálicos y combinaciones de cerámica y metales, capas múltiples de silicio estabilizado fabricadas por deposición química de vapores y cobalto negro. Para temperaturas mayores que 700°C que se logran en sistemas de enfoque puntual (discos parabólicos y sistemas de torre central), se han investigado pinturas refractarias no selectivas y recubrimientos oxidados de acero o aleaciones. Las propiedades ópticas de superficie, la absorptancia solar y la emitancia térmica de los recubrimientos de los absorbedores solares deben caracterizarse, al menos por el intervalo espectral, de longitudes de onda de 0.25 a 50  $\mu\text{m}$ . Una propiedad deseable de los recubrimientos es que tengan alta conductancia térmica, también es importante su respuesta variaciones en el ángulo de incidencia de la radiación solar y térmica. Finalmente, es muy importante determinar la duración del recubrimiento, para poder predecir de manera segura el ciclo de vida útil y ayudar al entendimiento de los mecanismos y procesos responsables de la degradación de las superficies.

## CAPITULO IV

### DISEÑO DEL CONCENTRADOR Y ABSORBEDOR SOLAR.

#### 4.1.- CONCENTRADOR SOLAR.

Para el desarrollo de este proyecto se desean obtener temperaturas superiores a los  $150^{\circ}\text{C}$  ya que a estas temperaturas la producción de energía tiene su principal utilización en la producción de energía eléctrica o mecánica, por tal razón la selección para desarrollar el colector solar más adecuado para este fin se ubica en el diseño de un concentrador cilindro parabólico de enfoque lineal.

Para diseñar el colector cilindro-parabólico se tiene definidas las siguientes dimensiones (fig 4.1):

$$D = 150 \text{ cm}$$

$$L = 200 \text{ cm}$$

$$\theta = 75^{\circ}$$

A partir de estos datos se calcula la ecuación que nos

define la parábola con tales características. La parábola se define como el lugar geométrico de todos los puntos equidistantes de una recta fija y de un punto fijo; al punto fijo "F" se le llama foco y a la recta fija "l" se le llama directriz de la parábola. Por supuesto, la ecuación de la curva dependerá de las coordenadas que se seleccionen para el foco y la directriz. La ecuación más sencilla resulta cuando se escogen ejes como los de la figura 4.2

La ecuación de la parábola con respecto a estos ejes se determina de la siguiente manera: sea  $P(x,y)$  un punto del plano, y sean  $d_1$  y  $d_2$  sus distancias no dirigidas FP y LP, respectivamente, por lo tanto.

$$d_1 = \sqrt{(x - p/2)^2 + y^2} \quad \text{y} \quad d_2 = \sqrt{(x + p/2)^2}$$

Cada punto tal que  $d_1 = d_2$  debe tener  $d_1^2 = d_2^2$  y se debe satisfacer

la ecuación :

$$(x - p/2)^2 + y^2 = (x + p/2)^2$$

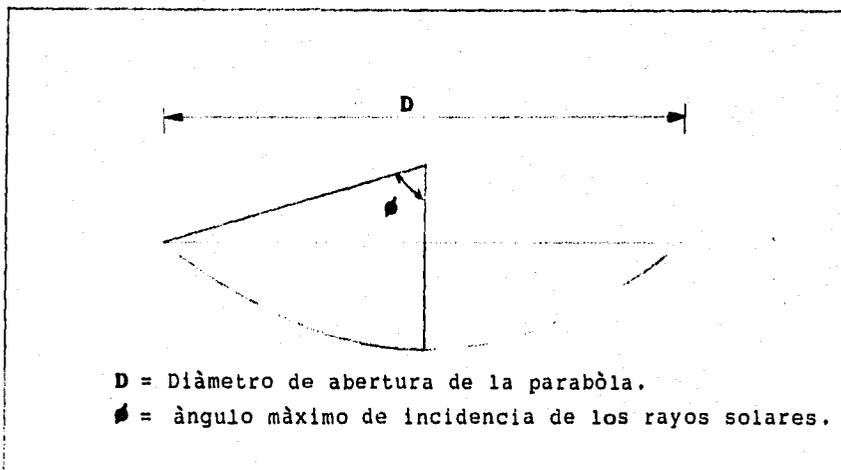


Fig. 4.1. Dimensiones de la parábola.

Esta ecuación puede expresarse de la forma:

$$x^2 - px + p/4 + y^2 = x^2 + px + p/4$$

o bien 
$$y^2 = 2px$$

Sustituyendo los valores conocidos de la parábola, obtendremos el valor de  $p$ , el cual definirá la ecuación que necesitamos. De la figura 4.1 obtenemos que:

$$FP = 75/\text{sen } 75^\circ \qquad FP = 77.64 \text{ cm}$$

$$dF = 75/\text{tan } 75^\circ \qquad dF = 20.10 \text{ cm}$$

$$p = 77.64 + 20.10 = 97.74$$

y la ecuación de la parábola que satisface nuestras condiciones es.

$$y^2 = 2(97.74) x$$

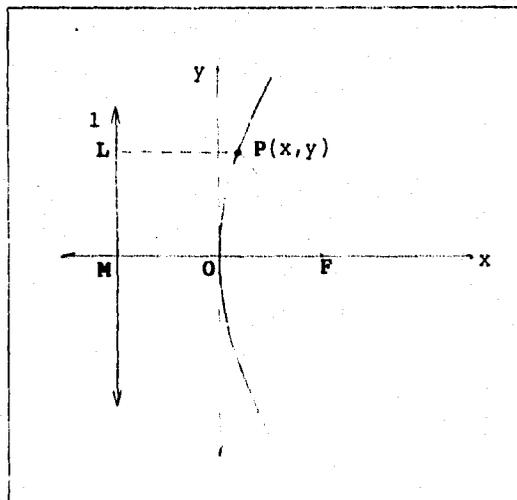
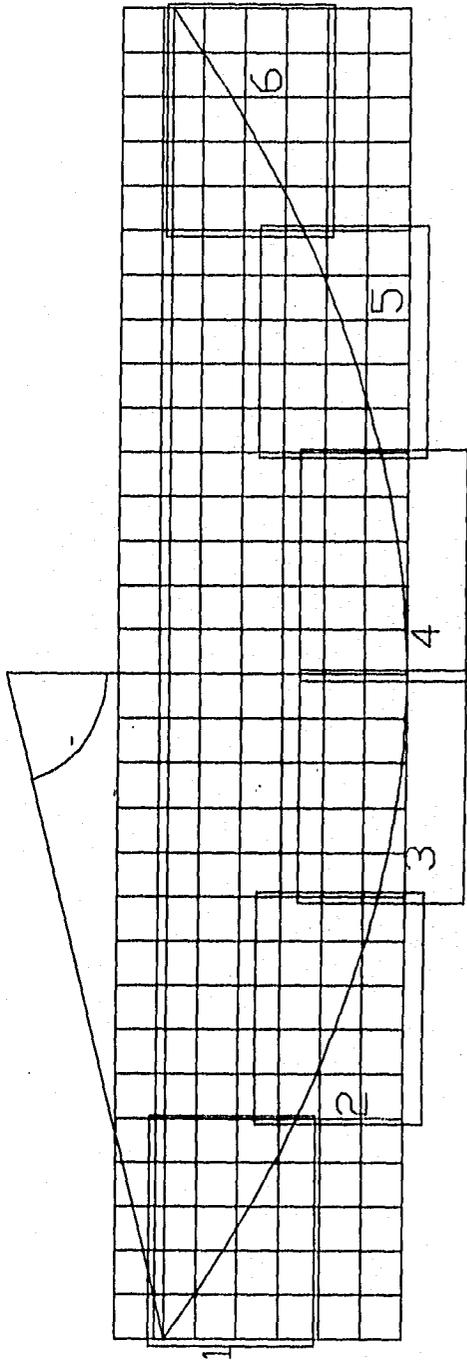


Fig. 4.2. Parábola y su directriz.

**Fig. 4.3. Representación gráfica de la parábola con la cual se realizo un molde.**



Una vez determinada la ecuación que cumple con nuestras condiciones iniciales se obtiene un gráfico por computadora con las dimensiones reales (fig 4.3), de este gráfico se obtiene un molde en madera de la parábola deseada, con el molde ya en madera se comienza a construir las estructuras que sostendrán a la superficie reflejante.

Las estructuras que formaran la base (fig 4.4) tiene un diseño de acuerdo a las fuerzas axiales que soportaran la superficie reflejante y al absorbedor solar.

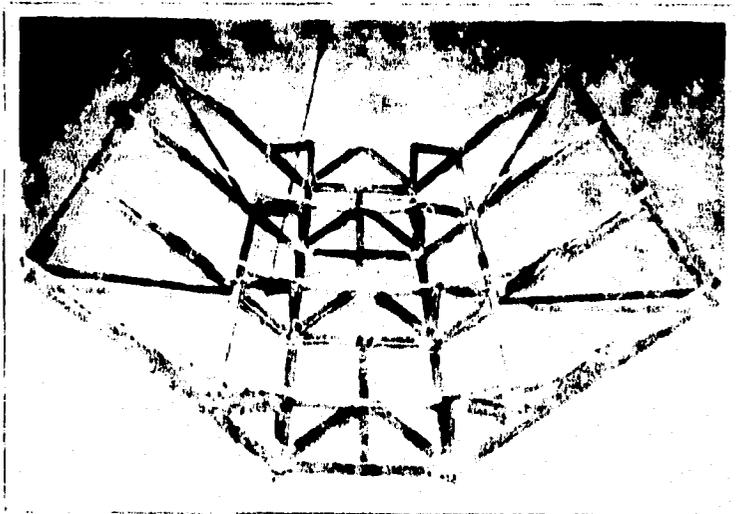


FIG 4.4 FOTOGRAFIA DE LA BASE CONSTRUIDA PARA LOGRAR DAR LA FORMA CILINDRO-PARABOLICA A LOS ESPEJOS.

Una vez que se tienen las estructuras se coloca una base de la superficie reflejante (lámina de fierro calibre 22), la cual tomara la forma del concentrador cilindro parabolico.

## 4.2.- ABSORBEDOR SOLAR.

El sistema usado para la captación de la radiación de nuestro concentrador cilindro-parabólico hara referencia a la imagen solar teórica; el receptor tendra una geometria especial, con una cavidad que nos permitira disminuir las pérdidas por convección con el ambiente (fig 4.5). Además mostrara el balance

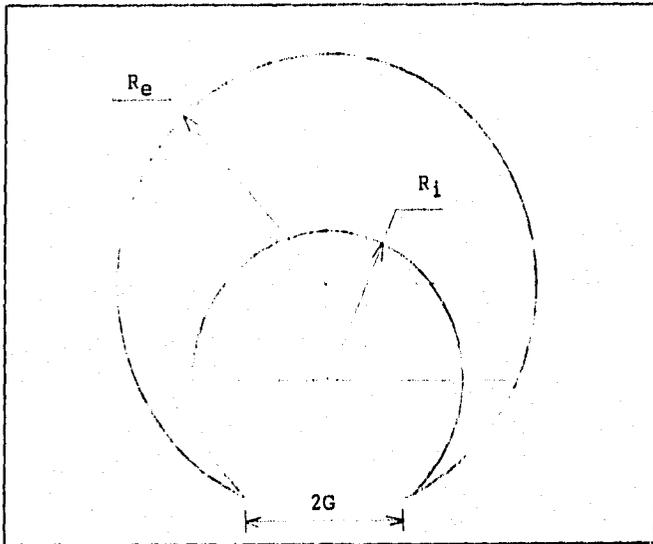


Fig. 4.5. Esquema de la posición de los tubos para formar la ventana del absorbedor.

de energía usado para describir el funcionamiento del sistema de concentración de enfoque lineal.

De acuerdo a los datos geométricos siguientes:

$$\begin{aligned} D &= 1.50 \text{ m} \\ L &= 2.0 \text{ m} \\ \phi &= 75^\circ \\ A_s &= 3.27 \text{ m} \\ \theta &= 32' = 0.5334^\circ \end{aligned}$$

evaluamos la distancia focal.

$$f = \frac{(1 + \cos \phi) D}{4 \operatorname{sen} \phi}$$

$$f = 0.489 \text{ m.}$$

el diámetro aparente del sol

$$ds = f \tan \theta$$

$$ds = 4.55 \text{ E-3 m}$$

donde

f.- Distancia focal.

$\theta$ - Angulo de apertura focal.

D.- Diámetro de la parábola.

**DISTANCIA AL FOCO DESDE CUALQUIER PUNTO.**

$$r = \frac{2 f}{1 + \cos \phi}$$

$$r = 77.64 \text{ cm}$$

**IMAGEN TEORICA DEL SOL.**

$$W = \frac{2r \operatorname{tg} 16'}{\cos \phi}$$

$$W = 2.79 \text{ cm}$$

el ancho de la ventana sea igual al eje mayor de la elipse que se forma en plano focal.

$$2 \theta = \frac{2 ds}{(1 + \cos \phi)(\cos \phi)}$$

$$2 \theta = 0.0279 \text{ m}$$

Para que el factor de forma sea lo más pequeño posible y con ello evitar pérdidas por radiación y reflexión en la cavidad, el área total de la ventana será:

$$A_1 = (2 \theta) L$$

$$A_1 = 0.0558 \text{ m}^2$$

ENERGIA DISPONIBLE EN EL PLANO FOCAL.

$$\frac{q_f}{A_s} = \frac{2 \cdot E \cdot \sin \phi}{\phi}$$

$$q_f/A_s = 4914.74 \text{ W/m}^2$$

$$q_f = 16071.2 \text{ W.}$$

donde

$A_s$ .- Área efectiva del paraboloide (3.27 m<sup>2</sup>).

$E$ .- Constante solar (1357 W/m<sup>2</sup>)

$q_f$ .- Energía disponible en el plano focal.

RAZON DE CONCENTRACION "C"

El principio del colector de concentración es captar el calor del Sol en una superficie más o menos grande y concentrarlo en una zona reducida. A tal fin se define como el factor de concentración  $C$  y es la relación entre el área efectiva del sistema óptico de captación de la radiación solar y la superficie del absorbedor.

dependiendo el tipo de colector usado, el factor de concentración varía debido a la geometría de sus componentes ( fig 4.6).

Para definir el factor de concentración que rige a nuestro concentrador tenemos que.

$$C = \frac{\text{Area de captación}}{\text{Area de concentración}}$$

$$\text{Area de captación} = D * L$$

$$\text{Area de concentración} = (2 G) * L$$

$$C = \frac{2 (1.50)}{0.0279 * 2}$$

si sustituimos valores tenemos que  $C = 53.76$

Pero la razón de concentración se ve afectada por la eficiencia total del sistema, que implica la eficiencia de orientación del mecanismo de seguimiento, de la reflexión de la superficie selectiva y de la exactitud en la captación de los rayos del sol; las cuales dependen de la construcción y diseño de los mecanismos que componen al colector. Considerando tales eficiencias de la siguiente manera tenemos.

EFICIENCIA REFLECTIVA.	$\eta_r = 80 \%$
EFICIENCIA DE EXACTITUD	$\eta_e = 80 \%$
EFICIENCIA DE ORIENTACION	$\eta_o = 80 \%$
EFICIENCIA TOTAL	$\eta_t = \eta_r \eta_e \eta_o$
	$\eta_t = 51.2 \%$

Por lo tanto la razón de concentración corregida es:

$$C_c = \eta_t * C$$

$$C_c = 27.53$$

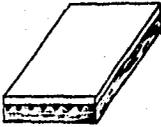
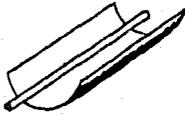
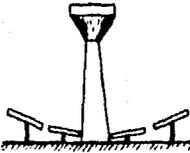
Tipo de colector	Factor de concentración "C"	Temperatura de utilización °C	Campo de aplicación
<b>PLANO</b> 	0 a 1	50-90	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calefacción</li> <li>- Agua caliente</li> <li>- Climatización de piscinas</li> </ul>
<b>CILINDRICO-PARABOLICO</b> 	2 a 40	100-400	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calefacción</li> <li>- Agua caliente</li> <li>- Climatización de piscinas</li> <li>- Potencia industrial</li> <li>- Desalinización de agua del mar</li> </ul>
<b>PARABOLOIDE</b> 	100 a 10.000	1.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Procesos de calor industrial</li> <li>- Máquinas térmicas</li> </ul>
<b>HELIOSTATOS</b> 	Depende del número de espejos 100 a 2.000	1.000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquinas térmicas</li> <li>- Estaciones de potencia solar</li> <li>- Hornos solares para fines especiales</li> </ul>

FIG 4.6 COMPARACION DE VARIOS SISTEMAS DE COLECTORES SOLARES

**CALOR ABSORBIDO POR LA CAVIDAD:**

El material usado es un tubo con diámetro nominal de 1.5 plg, cedula 40 y de tablas tenemos los siguientes datos.

Material : acero inoxidable A312

$$D_i = 1.61 \text{ plg} = 0.040894 \text{ m}$$

$$D_e = 1.90 \text{ plg} = 0.048260 \text{ m}$$

$$\text{Absortividad } a_s = 0.84$$

$$\text{Emisivida } e_2 = 1 - r = 0.78$$

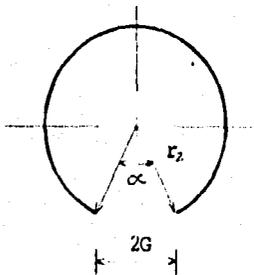
$$\text{reflectividad } r = 0.2$$

El área de la sección de la cavidad será:

$$\text{Circ.} = (\pi \cdot D_i - r \cdot 2 \cdot \alpha)$$

donde  $r\alpha$  representa la longitud de arco que es removido para obtener la ventana.

por trigonometría



$$\alpha = 2 \arcsin (G/r_2)$$

$$r_2 = 0.20447 \text{ m}$$

$$\alpha = 86.04^\circ = 1.5 \text{ rad}$$

$$\text{Circ.} = 0.0978 \text{ m}$$

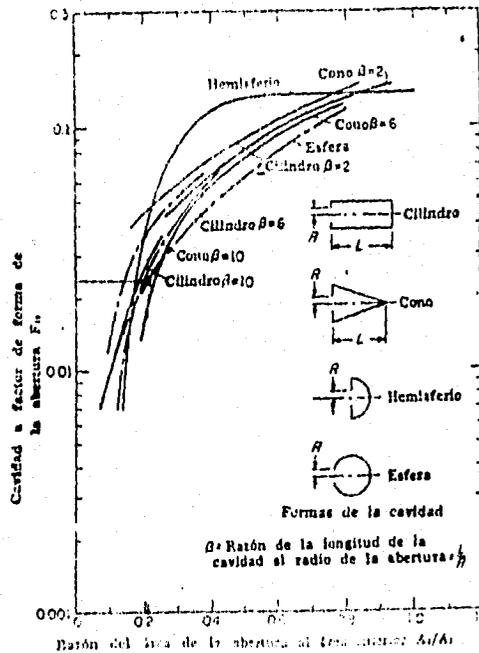
AREA  $A_2 = \text{circunferencia} \cdot L$

$$A_2 = 0.1955 \text{ m}^2$$

y la razón de áreas en el absorbedor es.

$$A_1/A_2 = 0.285$$

Hay varios métodos para calcular la energía recibida por radiación en la cavidad, los investigadores han logrado reducir las operaciones, utilizando un factor que corresponde a las características de los cuerpos radiantes y del que la absorbe, a este factor se le denomina "factor de forma" y depende de la forma de la cavidad y del tamaño de la abertura como lo muestra la gráfica siguiente



Cavidad, a factores de forma de abertura. (Cortesía de C. W. Stephens, A. M. Hain, y The American Rocket Society)

De la gráfica anterior, y la razón de áreas encontrada tenemos un  $F_f$  correspondiente.

$$F_f = 0.029$$

Ahora bien, la fracción de radiación solar (B12) emitida desde el foco y que es absorbida por la cavidad esta en función del factor de forma y la emisividad del material.

FRACCION DE RADIACION SOLAR.

$$B_{12} = \frac{e_2}{1 - (1 - F_f)(1 - e_2)}$$

$$B_{12} = 0.992$$

Mientras la fracción de radiación solar (B21) rechazada en la ventana sera:

$$B_{21} = \frac{F_f * e_1}{1 - (1 - F_f)(1 - e_2)}$$

$$B_{21} = 0.0369$$

donde:  $e_1 = 1.0$

CALOR ABSORBIDO POR LA CAVIDAD.

$$Q = A_1 * B_{12} * C_c * E$$

$$Q = 2067 \text{ watts}$$

El calor rechazado en la cavidad se determina de la siguiente manera. Con la temperatura de saturación en la localidad y las tablas de vapor para una presión  $P = 585 \text{ mm Hg}$  (presión atmosférica en Cuautitlán) encontramos.

$$T = 365.87 \text{ } ^\circ\text{K}$$

entonces tenemos que el calor rechazado  $Q_r$  es

$$Q_r = A_2 \cdot \epsilon_2 \cdot \tau \cdot T_2^4 \cdot B_{21}$$

$$\tau = 5.6696 \text{ E-8 W/m}^2$$

$$T_2^4 = 1.7918 \text{ E+10 } ^\circ\text{C}^4$$

$$Q_r = 5.71 \text{ W.}$$

Podemos ahora evaluar la eficiencia teórica en la cavidad y la temperatura que se alcanza en el punto focal.

La eficiencia en la cavidad.

$$\eta_c = \frac{Q_a - Q_r}{C_c \cdot A_1 \cdot E}$$

$$\eta_c = 98.93.0\%$$

## TEMPERATURA EN EL FOCO ( $T_f$ )

$$Q_a = \tau * A1 * T_f^4$$

$$T_f = \frac{(Q_a)^{1/4}}{(\tau * A1)^{1/4}}$$

$$T_f = 898.54^\circ\text{K}$$

$$T_f = 625.54^\circ\text{C}$$

En cualquier sistema de conversión de energía fototérmica y en especial un receptor solar; este absorbe y transfiere de 80 a un 95 % de la energía reflejada a el fluido térmico.

La determinación de las pérdidas de calor en un receptor son de gran importancia, ya que la eficiencia térmica del mismo, así como el costo total de la energía térmico solar, se ven afectadas por dichas pérdidas.

Las pérdidas pueden tener una fuerte influencia en problemas fundamentales, tales como:

- a) Tipo de receptor a usar.
- b) Temperatura de diseño.
- c) Tipo de ciclo asociado.

Dada una opción de diseño puede influir grandemente en el arreglo de las superficies del intercambio de calor, la

orientación y el tamaño de la apertura, la configuración externa e interna del mismo.

Las pérdidas térmicas en el receptor incluyen radiación reflejada, radiación emitida, convección y otras pérdidas (energía que no acierta en el receptor calor perdido en los ductos que transportan el fluido térmico).

El diseño que se desarrolla a continuación busca disminuir este tipo de pérdidas ya antes mencionadas; por lo que se tomaron las siguientes consideraciones donde; la parte exterior del absorbedor que denominamos como área exterior, sera la camisa de agua y para ello empleamos tubo de acero comercial y que forraremos para aislarlo; la resistencia total al flujo de calor es un arreglo en serie de las resistencias que ofrecen el tubo, el aislante y la convección con el aire.

#### RESISTENCIA EN LA TUBERIA.

$$R_t = \frac{\ln (r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot K_t \cdot L}$$

Tubo de acero inoxidable 312

Di = 0.04089 m

De = 0.04826 m

Kt = 45 W/m °C

L = 2.0 m

Rt = 2.93 E-4 W/°C

RESISTENCIA CONVECTIVA EN EL INTERIOR DE LA TUBERIA

$$R_{\text{conv.}} = \frac{1}{h_e * 2 * \pi * r_e * L}$$

$$h_e = 281.63 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$r_e = 0.02413 \text{ m}$$

$$R_{\text{conv}} = 0.01171 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

RESISTENCIA DEL AISLANTE.

$$R_{\text{aisl.}} = \frac{\text{Ln}(r_2/r_1)}{2 * \pi * K_a * L}$$

$$K_a = 0.0411 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$r_2 = 0.0508 \text{ m}$$

$$r_1 = 0.0381 \text{ m}$$

$$R_{\text{aisl.}} = 0.557 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

RESISTENCIA CONVECTIVA DEL AIRE.

$$R_{a_{\text{conv.}}} = \frac{1}{h_a * 2 * \pi * r_2 * L}$$

$$h_a = 11.16 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$r_2 = 0.0508 \text{ m}$$

$$R_{a_{\text{conv.}}} = 0.14037 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

La resistencia total se determina como.

$$R_t = R_a + R_{\text{aisl}} + R_{\text{conv}} + R_s$$

$$R_t = 0.7094 \text{ W/}^\circ\text{C}$$

Calor total que se pierde en la tubería aislada se calcula según.

$$Q_p = \Delta T / R_t$$

$$Q_p = 77.53 \text{ W}$$

Considerando que  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura del agua de salida ( $70^\circ\text{C}$ ) y la temperatura del agua a la entrada ( $15^\circ\text{C}$ ), las cuales son temperaturas promedio esperadas.

Teniendo así un calor neto en el agua.

$$Q_t = Q_f - Q_p - Q_r$$

$$Q_t = 2067 - 77.53 - 5.71 \text{ W}$$

$$Q_t = 1984 \text{ W}$$

con este valor calculamos la cantidad de agua calentada.

$$Q_t = v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)$$

Corroboraremos nuestros resultados, considerando el fenómeno de convección forzada de flujo alrededor del tubo, evaluando el

numero de Nuselt generado por el flujo volumetrico obtenido.

El numero de Nuselt se define como:

$$N_U = (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{0.666}) Pr^{0.4} (\mu/\mu_w)^{0.25}$$

para una temperatura de 70 °C de tablas obtenemos.

$$\begin{aligned} \rho &= 972.72 \text{ Kg/m}^3 \\ C_p &= 4.1904 \text{ E+3 J/Kg} \cdot \text{K} \\ \nu &= 0.421 \text{ E-6 m}^2/\text{s} \\ K &= 0.6595 \\ P_r &= 2.62 \\ \mu &= 0.4115 \text{ E-3} \end{aligned}$$

por lo tanto tenemos que:

$$v = \frac{1984}{(979.72 \cdot 4.1904 \text{ E+3} \cdot 55)}$$

$$v = 8.787 \text{ E-6 m}^3/\text{s}$$

$$v = 0.53 \text{ lt/min.}$$

$$U_{\text{prom.}} = \frac{v}{A}$$

$$U_{\text{prom}} = \frac{8.787 \text{ E-6}}{1.25966 \text{ E-3}}$$

$$U_{\text{prom}} = 6.9757 \text{ E-3 m/seg.}$$

Calculando el número de Reynolds (considerando tubo circular).

$$Re = \frac{\rho * u * D}{\mu}$$

$$Re = \frac{979.72 (6.9757 \text{ E-3}) (0.04826)}{0.4115 \text{ E-3}}$$

$$Re = 801.5$$

para una temperatura de superficie de 15 °C tenemos.

$$\rho_w = 1000.96$$

$$v_w = 1.2015 \text{ E-3}$$

$$\mu_w = 0.12026 \text{ E-3}$$

$$\frac{\mu}{\mu_w} = 0.524$$

evaluamos el número Nusselt

$$Nu = (0.4 Re^{0.5} + 0.06 Re^{0.666}) Pr^{0.4} (\mu/\mu_w)^{0.25}$$

$$Nu = 20.61$$

El coeficiente de conductividad térmica en la pared interna del tubo .

$$h_e = \frac{K * Nu}{D}$$

$$h_e = 281.65 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

para obtener la temperatura promedio tenemos que.

$$T_w - T_b = \frac{Q}{A_1 * h}$$

$$T_w - T_b = \frac{1984}{0.30323 * 281.65} = 23.23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

finalmente la temperatura en la pared interna del tubo se define como.

$$T_t = (T_w - T_b) + 70^\circ\text{C}$$

$$T_f = 93.23 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Faltaria considerar que los resultados obtenidos son puramente teóricos y suponen condiciones ideales; acerca del absorbedor algunos calculos fueron realizados suponiendo un tubo circular para facilitar operaciones.

La alimentación la realizara una bomba, el agua obtenida al final del proceso puede ser usada directamente para consumo doméstico, o puede ser utilizada como fluido de alimentación en un intercambiador de calor, cediendo energia a otro fluido de trabajo, el cual permitirá llevar a cabo procesos de refrigeración, generación de energia eléctrica o mecánica.

## CAPITULO V

### PRUEBAS DEL CONCENTRADOR SOLAR.

#### 5.1 EFICIENCIA DEL CONCENTRADOR.

Las pruebas se realizaron en la F.E.S. Cuautitlán los días 24 y 25 de Agosto de 1995, debido a que no se conto con instrumentos para medir la radiación directa instantánea se utilizo el modelo descrito en el capítulo II.

Para estos días se trabajo con una serie de datos y de radiación total diaria (método de insolación) que la estación meteorológica de la facultad proporcionó y son los siguientes:

FECHA	DIA	DECLINACION	LARGO DIA hrs	ANGULO ALBA	RADIACION TOTAL cal/ cm <sup>2</sup> dia	HORAS DE INSOLACION hrs
24/08/95	236	10.62°	12.49	93.70°	599.78	10:40
25/08/95	237	10.26°	12.48	93.57°	549.0	9:47

Para el día jueves se trabajo con un flujo de agua promedio de:

$$\nu = 0.85 \text{ lt/min.}$$

obteniendo los siguientes datos para una primera lectura:

Para :

$$n_d = 236$$

$$G_{cs} = 1357 \text{ W/m}^2$$

$$\omega_s = 93.69^\circ$$

$$l = 19$$

$$\delta = 10.61$$

$$(R/R)^2 = (1.0 - 0.327 \cdot \text{sen}(0.989(n_d - 277))) \quad \text{para } 94 < n_d < 277$$

$$(R/R)^2 = 1.2106$$

#### RADIACION EXTRATERRESTRE.

$$H_o = (4 \cdot 3600) / \pi \cdot 1357 \cdot (1.2106) \cdot (\cos 19 \cdot \cos 10.61 \cdot \text{sen } 93.69 + (2 \pi \cdot 93.69 / 360) \cdot \text{sen } 19 \cdot \text{sen } 93.69)$$

$$H_o = 46328336.6 \text{ MJ/m}^2$$

$$H_o = 1030.34 \text{ W/m}^2$$

#### RADIACION TOTAL.

$$H = 599.78 \text{ cal/cm}^2 \text{ dia}$$

Horas de insolación = 10:40 hrs

$$H = 25111589 \text{ MJ/m}^2$$

$$H = 653.95 \text{ W/m}^2$$

#### INDICE DE CLARIDAD

$$K_t = H/H_o$$

$$K_t = 25111589 / 46328336.6 = 0.542$$

#### RADIACION DIFUSA

$$H_d = H * (1.0 - 1.13 K_t)$$

$$H_d = 25111589 * (1.0 - 1.13 (0.542))$$

$$H_d = 9730746.48 \text{ MJ/m}^2$$

#### RADIACION DIRECTA

$$H_b = H - H_d$$

$$H_b = 25111589 - 9730746 = 15380842.54 \text{ MJ/m}^2$$

$$H_b = 400.54 \text{ W/m}^2$$

**RADIACION DIRECTA MAXIMA.**

$$G_{bmax} = 1.797210352 * (Hb/N)$$

$$G_{bmax} = 1.797210352 * ( 15380842.54 / 44964 )$$

$$G_{bmax} = 614.8 \text{ W/m}^2$$

**RADIACION DIRECTA INSTANTANEA.**

$$G_b = G_{bmax} \cos^{1.5} ((180 * \omega)/(15 * N))$$

$$G_b = 614.8 \cos^{1.5} (( 180 * 9.38 ) / ( 15 * 12.49 ) )$$

$$G_b = 603.27 \text{ W/m}^2$$

**EFICIENCIA DEL CONCENTRADOR.**

$$\eta_c = \frac{q_{agua}}{G_b} * 100$$

$$\eta_c = \frac{378.16}{603.27} * 100 = 62.69 \%$$

De igual manera se trabajo con las demas mediciones que dan como resultado la tabla 5.1.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

**TABLA 5.1. DATOS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL COLECTOR**

HORA OFICIAL HR.	ANGULO HORARIO	TEMPERATURA		CALOR DEL AGUA W/M2	RADIACION DIRECTA W/M2	EFICIENCIA COLECTOR %
		ENTRADA °C	SALIDA °C			
12:05	9.38	22	45	378	603	62.69
12:08	8.63	22	44	422	605	69.75
12:11	7.88	22	47	575	606	94.87
12:14	7.13	22	48	598	608	98.51
12:17	6.38	22	47	540	609	82.69
12:20	5.63	22	46	502	610	82.33
12:25	4.38	22	38	100	612	16.47
12:28	3.63	22	41.5	113	612	18.51
12:31	2.88	22	44	125	613	20.52
12:34	2.13	22	46	141	614	23.09
12:45	-0.63	22	45	99	614	16.28
12:47	-1.13	22	48	124	614	20.31
12:49	-1.63	22	48	103	614	16.81
12:50	-1.88	23	57	713	614	116.25
12:51	-2.10	23	59	639	614	103.66
12:55	-3.13	23	58	688	613	112.28
13:00	-4.38	23	51	483	612	78.93
13:02	-4.88	23	48	493	611	80.63
13:03	-5.13	23	44	415	611	67.93
13:10	-6.88	23	36	242	608	39.85
13:12	-7.38	23	47	372	607	61.43
13:14	-7.88	23	48	403	606	66.60
13:17	-8.63	23	49	393	605	65.08
13:35	-13.13	23	49.5	403	592	68.10
13:36	-13.38	23	39	259	591	43.86
13:37	-13.63	23	37	233	590	39.51
13:38	-13.88	23	34	187	589	31.13
13:40	-14.38	23	32	148	588	25.18
13:44	-15.38	23	32	224	584	38.49
13:45	-15.63	23	34	245	583	42.07
13:46	-15.88	23	35	249	582	42.87
13:47	-16.13	23	38	352	581	60.75
13:48	-16.38	23	39.5	326	580	56.27
13:52	-17.38	23	41.5	460	576	79.97
13:54	-17.88	23	42.5	385	574	67.20
13:55	-18.13	23	43	470	573	82.15
14:24	-25.63	23	47	481	533	90.27
14:26	-26.13	23	49	419	530	79.11
14:27	-26.63	23	49.5	476	526	90.67
14:29	-27.13	23	50	540	523	103.40
14:30	-27.38	23	50	453	522	86.80
14:33	-28.13	23	50	515	517	99.77
14:35	-28.63	23	49	424	513	82.81
14:37	-29.13	23	49	512	510	100.50

\*aproximadamente las 12:00 horas solar

El viernes 25 de Agosto no se obtuvo el dato de radiación total en la estación meteorológica solo se conoce el tiempo de insolación y para evaluar la radiación total diaria se usara el método de estimación de Angot.

$$H_t = a + (b * n/N)H_a$$

$H_a$  = Radiación astronómica

Esta relación se ve restringida por las asignaciones del valor de las constantes a y b, pero estos valores nos fueron proporcionados por la estación, los cuales se tiene bien definidos para la región y son:

$$a = 0.29$$

$$b = 0.42$$

Con estos datos se estimo la radiación total diaria del día, donde se obtuvieron los resultados antes mencionados.

El flujo de agua promedio, usado el día viernes fue:

$$v = 0.43 \text{ lt/min}$$

Los calculos de eficiencia del concentrador se repitieron usando el procedimiento descrito para el día jueves y la recopilación de estos se muestra en la tabla 5.2.

**TABLA 5.2. DATOS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON EL COLECTOR**

HORA OFICIAL HR.	ANGULO HORARIO	TEMPERATURA		CALOR DEL AGUA W/M2	RADIACION DIRECTA W/M2	EFICIENCIA COLECTOR %
		ENTRADA °C	SALIDA °C			
12:17	6.38	23	55	345	514	67.03
12:20	5.63	23	57	331	515	64.31
12:23	4.88	23	58	336	516	65.08
12:25	4.38	23	58	323	517	62.59
12:28	3.63	23	60	324	517	62.67
12:32	2.63	23	61	309	518	59.64
12:35	1.88	23	61.5	328	518	63.30
12:38	1.13	23	63	307	518	59.16
*12:43	-0.13	23	63	290	519	56.01
12:51	-2.13	23	65	314	518	60.60
13:10	-6.88	24	66	863	513	168.04
13:12	-7.38	24	63	876	513	170.75
13:14	-7.88	24	56	440	512	85.96
13:15	-8.13	24	54	387	511	75.69
13:17	-8.63	24	53.5	355	510	69.48
13:30	-11.88	24	60	664	503	131.88
13:39	-14.13	24	60	445	497	89.86
13:42	-14.88	24	63	472	495	95.49
13:44	-15.38	24	63	442	493	89.58
13:46	-15.88	24	64	437	491	86.92
13:48	-16.38	24	66	447	490	91.20
13:51	-17.13	24	68	452	487	92.79
13:53	-17.63	24	69	474	485	97.62
13:55	-18.13	24	71	441	483	91.35
13:58	-18.88	24	72	458	480	95.24
14:03	-20.13	24	73	413	475	86.94
14:10	-21.88	24	73	472	468	100.83
14:12	-22.38	24	73	459	465	98.54
14:14	-22.88	24	74	474	463	102.36
14:15	-23.13	24	74	461	462	98.54
14:17	-23.63	24	75	424	459	92.39
14:19	-24.13	24	75	430	457	94.05
14:20	-24.38	24	77	446	456	97.93
14:22	-24.88	24	78	423	453	93.31
14:24	-25.38	24	78	413	451	91.93

\* aproximadamente las 12:00 hora solar para la localidad en la cual se experimento con el colector.

#### GRAFICA DE EFICIENCIA.

De las tablas anteriores se trabaja con los valores correspondientes de temperatura de salida y eficiencia, ajustandose una recta a dichos puntos por el método de mínimos cuadrados. Hay que agregar que de las tablas no se incluyen los puntos que a nuestro juicio mostraron error, al presentar eficiencias superiores al 100 % o por debajo del 20 % con respecto a algunas temperaturas de salida semejantes.

La ecuación que muestra el comportamiento general del día jueves es la siguiente:

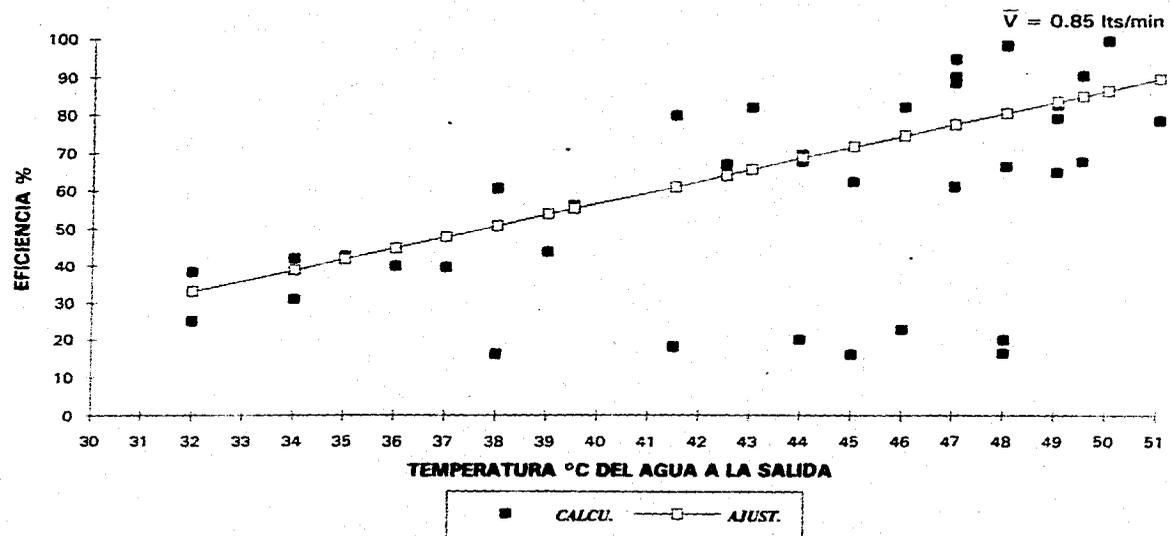
$$y = 2.98 x - 62.26$$

Mientras que para el día viernes, el ajuste de los datos de la tabla 5.2 fue el siguiente:

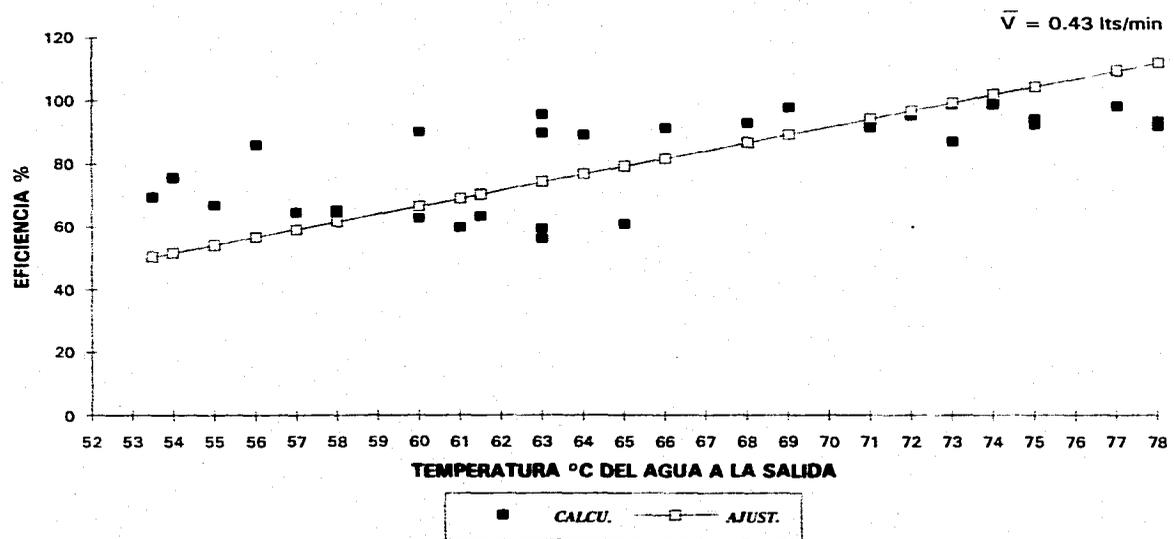
$$y = 2.51 x - 84.06$$

Las gráficas obtenidas muestran el comportamiento de la eficiencia del concentrador debido a la temperatura en el agua a la salida, aunque son distintas, ya que cada una esta en función del gasto de agua y de la radiación instantánea a la cual se trabaje; dando por resultado la siguiente gráfica.

## EFICIENCIA DEL CONCENTRADOR SOLAR (DIA JUEVES)



## EFICIENCIA DEL CONCENTRADOR SOLAR (DIA VIERNES)



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

La realización de este trabajo dio los resultados esperados al captar la radiación solar directa y aprovechar el calor ganado; al desarrollar un colector solar del tipo concentrador parabólico de enfoque lineal, para experimentar en la posible generación de energía calórica, mecánica o eléctrica.

El proyecto desarrolló el mecanismo reflector y de captación de la energía solar; sin embargo los resultados obtenidos no hubieran sido posibles sin el mecanismo de seguimiento, que fue coordinado como un proyecto independiente por un ingeniero de la Facultad.

En la práctica el calor ganado por el fluido de trabajo depende de la calidad óptica del reflector, la eficiencia de absorción del receptor y de la precisión del mecanismo de seguimiento principalmente; sin embargo el aprovechamiento de energía solar en su proceso de conversión termodinámica permitió obtener eficiencias de entre 60 y 80 % en el concentrador solar y de las temperaturas alcanzadas por el fluido de trabajo (agua), bajo las condiciones de operación fueron de 60 °C por arriba de

la temperatura ambiente. Los resultados de este trabajo como otros mas que se han venido realizando en la facultad permiten confirmar que es un buen comienzo en la práctica de la posible utilización de energía solar y la importancia que tiene en la actualidad en otros países como una fuente de energía alternativa, a los problemas de contaminación, ahorro de energía y como posible fuente energética futura.

Ademas cabe mencionar que para este proyecto en particular, sera necesario mejorar el diseño de algunos de sus componentes, experimentar con nuevos materiales y métodos de construcción, resolver problemas de mantenimiento, ensayar difrentes politicas de coordinación para obtener mejores resultados, ya que uno de los problemas que presento el concentrador parabólico fue la manera de sujeción de los espejos en la base; ésta provocó en su exposición al sol que los espejos se dilataran, presentadose ondulaciones en algunas partes de la superficie reflejante; ondulaciones que formaron averraciones en la franja fócal; otro punto importante es la manera de adherirlo, en nuestro caso se utilizo un pegamento, que junto con la dilatación provocaron el desprendimiento del acrilico asi como del metalizado de pequeñas secciones. En cuanto al absorbedor se experimento con un modelo no muy usual que trata de evitar pérdidas de calor y se fabrico de dos materiales diferentes (lamina-acero inoxidable) y no del mismo material como se determino inicialmente, en cuanto a una mejora sera necesario utilizar materiales mas ligeros y que permitan una ganacia mayor de la radiación solar.

## BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Aden B. Meinel y Marjorie P. Meinel.  
Aplicaciones de la energía solar.
- 2.- Vicente Estrada Cajigal.  
Análisis crítico de procedimientos para estimar la radiación solar.  
Tesis profesional, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 1985.
- 3.- Filiberto Leyva Piña.  
Estudio Técnico Económico de un destilador para suministro de agua potable aprovechando la energía solar.  
Tesis profesional, Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 1976.
- 4.- Jose Acosta Rubio.  
Energía solar utilización y aprovechamiento, Madrid, Paraninfo, 1983.
- 5.- Farrinton Daniels.  
Uso directo de la energía solar, España, Blume, 1985.
- 6.- Duffie J. A. y Beckman W. A.  
Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Sons. U.S.A. 1980.
- 7.- Almanza R. y López S.  
Radiación Solar en la República Mexicana mediante datos de insolación. México, D. F. Instituto de Ingeniería. Informe serie Azul No. 357. 1990
- 8.- James L. Therked.  
Ingeniería del ámbito térmico.
- 9.- J. Richard Williams.  
Tecnología y Aplicaciones de la energía solar.
- 10.- Edward E. Anderson.  
Fundamentals of solar energy conversion.
- 11.- Kreith Frank.  
Transmisión de calor por radiación.