



38  
2y

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS  
PROFESIONALES ARAGÓN**

**GENERACION DE VAPOR Y ELECTRICIDAD  
EN UNA PLANTA TERMOSOLAR**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

PRESENTA:

**ALVARO EDUARDO LENTZ HERRERA**

Noviembre 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  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO CAMPUS "ARAGON"

JEFATURA DE CARRERA DE INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

Secretaría Técnica

DR. RAFAEL ALMANZA SALGADO (ASESOR)  
ING. RAUL BARRON VERA  
ING. MEJIA ROLDAN JOSE JUAN RAMON  
ING. RODRIGUEZ LUNA JORGE ANTONIO  
ING. MIGUEL ANGEL MALDONADO MUÑOZ

**ASUNTO: Revisión previa de Tesis, antes  
de autorizar su impresión.**

En forma anexa le hago entrega de un ejemplar del proyecto de Tesis titulado:  
"GENERACION DE VAPOR Y ELECTRICIDAD EN UNA PLANTA  
TERMOSOLAR", del alumno (s): ALVARO EDUARDO LENTZ HERRERA, con  
número de cuenta: 9057173-8.

Esto con el fin de que sea revisada por Usted, y que nos de su evaluación y comentarios por  
escrito, mismo que le pido me haga llegar a la brevedad posible.

Agradezco de antemano su colaboración y aprovecho la oportunidad para enviarle un cordial  
saludo

**ATENTAMENTE**

**"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"**

San Juan de Aragón, Edo. de México, 24 de octubre de 1996

**EL SECRETARIO TECNICO**

  
**ING. MIGUEL ANGEL MALDONADO MUÑOZ**

c.c.p. Expediente  
Alumno (s)

## DEDICATORIA

---

## DEDICATORIA

A mis padres y a mi hermano por todo el apoyo y el amor que me dieron, por todas sus enseñanzas que despertaron en mi el deseo de superarme día con día.

A todos mis familiares y amigos que de alguna manera hicieron posible el que me encuentre terminando una etapa importante de mi vida.

INDICE

Introducción	4
Capítulo I Radiación solar en la República Mexicana	8
Capítulo II Concentradores solares	18
Capítulo III Generación de vapor	38
Capítulo IV Sistema motor-generator	47
Capítulo V Planta termosolar	61
Resultados y Conclusiones	67
Glosario de Términos	71
Anexo	74
Referencias y Bibliografía	78
Agradecimientos	81

**TESIS**

**COMPLETA**

En México, así como en otras partes del mundo, el consumo energético es grande. Se hace uso de diferentes fuentes de energía convencionales como el carbón, el petróleo, el gas natural y en menor medida lo que en la actualidad se denomina recursos energéticos no convencionales en los que encontramos la energía generada por la fuerza del viento, aquella proporcionada por el calor interno de la tierra y la que se obtiene por la radiación solar.

Nuestro país afortunadamente goza de una privilegiada situación geográfica, ya que recibe un alto grado de radiación solar que puede ser utilizada para la obtención de energía eléctrica, y otros usos, como desalación de agua de mar, secado de alimentos y materiales, calentamiento de agua, cocción de alimentos y otros usos.

En Estados Unidos las plantas SEGS (Solar Electric Generating Systems) instaladas en el sureste del estado de California para la generación de 354MW han estado trabajando exitosamente por más de una década. Estos sistemas fueron instalados de 1984 a 1990 por la Compañía International Limited y representan a 3 generaciones de colectores denominados LS.(Luz System) Estas plantas utilizan un aceite sintético (óxido de bifenil-difenil ) para transportar el calor generado en los concentradores tipo canal parabólico a una temperatura de 390°C y posteriormente generar vapor en un intercambiador de calor.[1]

Con estos generadores solares se han producido más de 4000 GWh a lo largo de su vida, sin embargo existen problemas que se están estudiando y como resolverlos. Se han realizado varias mejoras, sin embargo la generación directa de vapor en los concentradores solares se encuentra actualmente en estudio en varios países ya que este aspecto sería lo más deseable debido a que bajaría los costos de estas plantas.

Con esta opción se eliminará el costoso aceite sintético que actualmente se usa, así como los generadores de vapor (solar-vapor) donde se intercambia el calor del aceite para producir vapor de agua. Para esta alternativa se piensa utilizar concentradores cilíndricos parabólicos conocidos como LS-4 con una apertura de 10.5 m y una longitud de 49m, esta elección la maneja actualmente Solel Solar System de Israel. Con esta tecnología se ha estimado que los costos de US\$3000/KW bajarían a US\$2300/KW y con una planta con ciclo combinado se podría llegar a US\$ 1600/KW.[1]

## INTRODUCCION

---

Se considera que las plantas SEGS producen alrededor del 85% de la generación eléctrica solar en el mundo.[2]

Esta industria logró con éxito la instalación de 354 MW con tecnología de canal parabólico que contó a su vez de un favorable precio en dólares y un impuesto bajo. Estos 1.25 billones de dólares de capital invertido han generado más de 4000GWh de electricidad por medio de energía solar y ahorraron más de 600 millones en créditos, ahorrando 2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas al ambiente.

En estudios efectuados en Alemania,[3,4] se considera prioritario reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> en la generación de electricidad convencional. Se plantea que una planta solar de 80 MW operando 2000 horas/año puede reducir en 30 años los siguientes valores comparada con una planta de carbón como combustible.

consumo de carbón 3.5 millones de toneladas  
emisiones de cenizas 1.25 millones de toneladas.  
emisiones de SO<sub>2</sub> 42 000 toneladas  
emisiones de NO<sub>2</sub> 11 000 toneladas  
emisiones de CO<sub>2</sub> 5.6 millones de toneladas

La búsqueda de oportunidades y la necesidad hacen a México el siguiente candidato para un sistema eléctrico de canales parabólicos solares. México tiene una demanda creciente, excelente radiación solar en regiones donde existe gas natural y líneas de transmisión y un impuesto favorable aplicado a sistemas solares.

Recientes estudios realizados por "Spencer Management" y patrocinados por el Banco Mundial con la anuencia de CFE, se plantea un concepto avanzado para un sistema solar acoplado con un ciclo combinado de combustión con gas natural en una turbina. La gran eficiencia del ciclo combinado hace posible la integración de un sistema solar para ventaja de ambos, el resultado muestra ventajas técnicas y de costos comparados con el ciclo Rankine; en efecto, la proyección de costos de electricidad para una planta de éstas en México es menor y presenta una reducción de costos que debe de ser tomada en cuenta.[1]



## INTRODUCCION

---

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se tiene experiencia en la generación de vapor desde 1976 utilizando concentradores solares tipo canal parabólico.

El siguiente trabajo muestra la generación de vapor por medio de concentradores de canal parabólico; el objetivo principal es lograr la generación del vapor directamente en dichos concentradores, así como la utilización del vapor producido para la generación de energía eléctrica por medio de un motor de vapor de pistones que tiene acoplado un generador eléctrico.

## CAPITULO I

## RADIACIÓN SOLAR EN LA REPUBLICA MEXICANA

## RESUMEN

Al elaborar mapas climatológicos de radiación total, es común emplear mediciones de esta en su forma directa más difusa, medida en unidades de energía por unidad de tiempo, por unidad de área sobre un plano horizontal mediante un piranómetro, aún cuando existen otros tipos de mediciones meteorológicas que se relacionan con la energía solar, siendo los datos de radiación la mejor fuente de información; sin embargo, en ausencia de éstos es factible emplear relaciones empíricas para estimar la radiación global a partir de las horas de insolación, porcentajes de posible insolación o nubosidad. Es importante conocer las regiones de la República Mexicana en la que es factible instalar sistemas que utilicen la componente directa de la radiación solar, por eso la necesidad de contar con mapas climatológicos.

## LA RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar se compone de ondas electromagnéticas provenientes del Sol. Este puede considerarse como un cuerpo negro, emitiendo a una temperatura de  $5\,762\text{ K}^1$  y como tal ésta es la temperatura teórica que debería

---

<sup>1</sup> Grados Kelvin.

alcanzarse en la superficie de la Tierra; sin embargo, la temperatura máxima lograda es de alrededor de 3 800 K, mediante el uso de concentradores.

Se considera que la radiación no sufre alteraciones durante su trayecto por el espacio exterior fuera de la atmósfera terrestre. Varios investigadores han medido la radiación solar que incide sobre una placa plana en el exterior de la atmósfera; el valor más aceptado es de 1.367 KW/m<sup>2</sup> (4.9 x10<sup>3</sup> KJ/m<sup>2</sup>h) y se le conoce como constante solar.

Dentro de la atmósfera la radiación solar es reflejada, dispersada y absorbida por componentes usuales de aquélla, como son O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y partículas de polvo. La radiación solar que sufre estos efectos es la que tiene una longitud de onda entre 0.29 y 2.5 μm, ya que casi toda la radiación fuera de este intervalo es dispersada y absorbida de inmediato.

La radiación de onda corta (ultravioleta) se absorbe principalmente por O<sub>3</sub>, mientras que la radiación de onda larga se absorbe por vapor de agua. La radiación reflejada y dispersa se convierte en radiación difusa y la que continúa su camino es la directa.

Con base en el método deducido por Jeevananda Reddy, se realizaron mapeos mensuales de la República Mexicana a fin de conocer la radiación solar global diaria, en ly, mediante datos de horas de insolación. Además se obtuvo el mapa de radiación solar media anual en las mismas unidades.

Para la presentación de los mapas se utilizó una proyección cilíndrica; se seleccionó un intervalo de 50 ly/día entre isolíneas de radiación para valores menores de 500 ly/día, y para mayores un intervalo de 100 ly/día.[5]

Esto se muestra en los mapas siguientes.



Promedio de irradiación global diaria, en MJ/m<sup>2</sup>



Promedio de irradiación global diaria, en MJ/m<sup>2</sup>



Promedio de irradiación global diaria, en MJ/m<sup>2</sup>



Promedio de irradiación global diaria, en MJ/m<sup>2</sup>



Promedio de irradiación global diaria , en MJ/m<sup>2</sup>



Promedio de irradiación global diaria , en MJ/m<sup>2</sup>



Promedio de irradiación global diaria, en MJ/m<sup>2</sup>



Promedio de irradiación global diaria, en MJ/m<sup>2</sup>



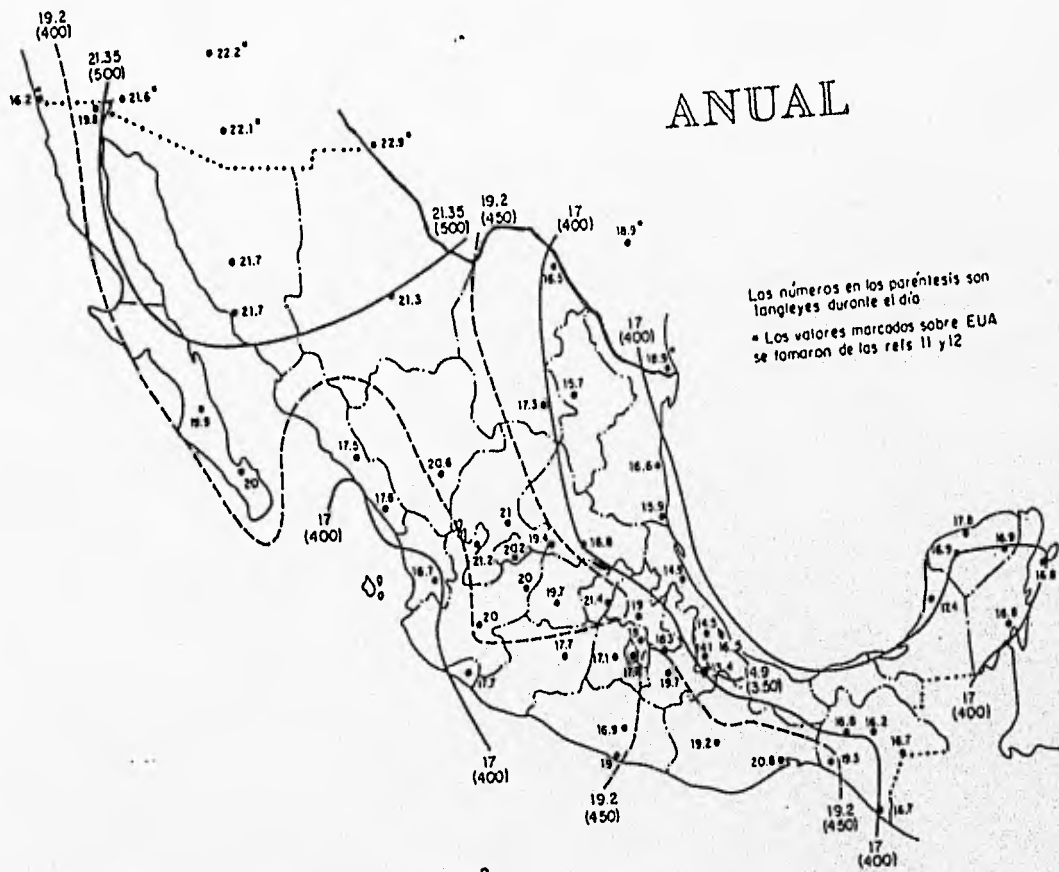
Promedio de irradiación global diaria , en MJ/m<sup>2</sup>



Promedio de irradiación global diaria , en MJ/m<sup>2</sup>







Promedio de irradiación global diaria, en MJ/m<sup>2</sup>

En el mapa correspondiente al promedio anual se observa que las regiones de mayor radiación solar en la República son las del norte de Sonora y Chihuahua, que serían las más propicias para fines de instalaciones que requieran de una incidencia alta de energía solar. Existen otras dos regiones bastante definidas, con más de 450 ly/día en el año: una que abarca Durango, Zacatecas, Aguascalientes, la mayor parte de Guanajuato y el noroeste de Jalisco, otra que comprende parte de Puebla y otra, bastante amplia, de Oaxaca. Además, se aprecia que más de la mitad del país recibe 400 ly/día en el año, lo que significa que en México el uso de la energía solar representa una fuente importante de energéticos para el futuro. [5]

Aún cuando existen otros tipos de mediciones meteorológicas relacionadas con la energía solar, los datos de radiación medidos directamente son la mejor fuente de información para la realización de experimentos, ésta puede medirse en sus componentes directa y difusa.

La directa es aquella que llega directamente del Sol y la indirecta es aquella que llega reflejada por algún objeto que pueden ser las nubes y la atmósfera.

La suma de la componente directa y la indirecta nos da la radiación total. Estas componentes medidas de manera instantánea se expresan en unidades de  $W/m^2$ .

Otra forma de determinar la irradiación de un lugar es por medio de la integración bajo la curva de todos los valores instantáneos de radiación solar diaria o mensual que dan como resultado la radiación global. La unidad en sistema internacional en que se maneja la radiación global es en  $MJ/m^2$ .

## CAPITULO II

### CONCENTRADORES

#### RESUMEN

Existen muchas formas para el aprovechamiento de la radiación solar entre las que destacan los captadores planos, los concentradores de enfoque que siguen el sol y concentradores estacionarios.

Los captadores planos son los más sencillos, obtienen temperaturas máximas hasta 100°C aproximadamente.

Los concentradores son dispositivos que aumenten la intensidad solar sobre una superficie absorbente.

En este capítulo se presenta un panorama general de los diferentes tipos de concentradores estacionarios y con seguimiento continuo.

#### CONCENTRADORES

La conversión de la energía solar en calor mediante colectores comprende una tecnología bien conocida. La complejidad de los dispositivos de conversión depende del nivel de temperatura que se desea alcanzar. En forma general, un colector es un dispositivo que transforma la energía solar en calor para transferirlo a un fluido determinado.

Los colectores solares pueden dividirse en tres clases: captadores planos, concentradores de enfoque que siguen el sol y concentradores estacionarios.

Los captadores planos son los más sencillos, capaces de obtener temperaturas que van desde algunos grados arriba de la temperatura ambiente hasta otras del orden de 100°C; En esta clase se encuentran los colectores planos para calentamiento de agua o aire, los estanques solares y los destiladores solares de agua.

Los dispositivos que aumentan la intensidad solar sobre una superficie absorbente, la cual recibirá solamente el flujo solar debido a su apertura, se llaman concentradores. La concentración de la radiación solar se logra mediante dispositivos ópticos que reflejan la radiación solar, de manera que concentran el flujo incidente sobre un absorbedor de área mucho menor que la de apertura.

La principal ventaja de un concentrador sobre colector plano es que el fluido de energía es mayor por unidad de superficie de absorción, por lo que se reducen las pérdidas térmicas, ya que el área del absorbedor es menor, lográndose en esa forma temperaturas más altas.

A continuación se presenta un panorama general de los diferentes tipos de concentradores, comunes en aplicaciones de energía solar; se discuten los concentradores estacionarios y concentradores con seguimiento continuo.

Los concentradores son dispositivos en los que se obtiene alta densidad de energía (radiación concentrada) sobre un absorbedor, superficie para lograr temperaturas mayores de 200°C, pudiéndose llegar hasta 3800°C. Para lograr altas concentraciones (arriba de 100°C) se requiere de mecanismos muy precisos para seguir el movimiento virtual del sol.

Los concentradores estacionarios se caracterizan por su concentración: mayor de 1 y menor de 10; no requieren un seguimiento preciso sino sólo un ajuste ocasional a lo largo del año. En cambio los concentradores con razón de concentración dentro de 10 a 3000 necesitan de curvaturas muy precisas, al igual que su mecanismo seguidor.

Algunas definiciones necesarias que ayudarán a entender los concentradores solares se encuentran en un apéndice al final del capitulado.

### Ventajas del empleo de concentradores:

1.- La cantidad de energía colectada sobre la superficie de absorción por unidad de área se aumenta, con lo cual se pueden alcanzar altas temperaturas aprovechables en algún ciclo termodinámico o en dispositivos termoiónicos, termoelectrónicos, magnetohidrodinámicos u otros.

2.- Reduciendo las pérdidas de calor al utilizar un absorbedor de menor área no sólo se mejoran las eficiencias térmicas sino que también se reducen efectos transitorios, ya que la masa térmica es mucho más pequeña que en colectores planos.

3.- Los costos se reducen, pues se reemplaza un absorbedor costoso, por un área reflectora o refractora menos costosa.

### Principales desventajas de los concentradores.

1.- Trabajan sólo con la componente directa de la radiación solar; el criterio de selección de estos sistemas debe incluir características geográficas, quedando restringida su utilización a lugares de alta insolación.

2.- La calidad óptica de la superficie reflectora requiere mantenimiento y protección intensiva contra su exposición a la intemperie.

Se ha mencionado que la temperatura máxima que se puede lograr con los colectores planos es del orden de  $100^{\circ}\text{C}$ ; la eficiencia de Carnot de una máquina térmica que opere en esta temperatura y la del ambiente, se limita al 20 % aproximadamente, por lo que utilizarlos en un sistema termodinámico que incluya una máquina tal no resulta atractivo. En cambio, al trabajar a temperaturas del orden de  $300^{\circ}\text{C}$ , mismas que pueden lograrse con captadores de enfoque, la eficiencia de Carnot se incrementa al doble.

Una aplicación importante de concentradores en países desarrollados o en vías de desarrollo sería en los procesos industriales; por ejemplo, se conoce que las necesidades de calentamiento en dichos procesos, operando a temperaturas menores de  $100^{\circ}\text{C}$ , es de sólo el 5%, correspondiendo el restante a mayores temperaturas, por lo que un impacto significativo del empleo de la energía solar en este sector sería con captadores de enfoque.

Cuanto más alta es la temperatura a la cual la energía va a ser entregada en un concentrador, mayor deberá ser la razón de concentración ; para lograr esto, la geometría del concentrador necesita ser lo más precisa posible, así como del sistema que permite seguir al Sol ; en la figura 1 se muestran los valores de razón de concentración y tipos de colectores con los que se puede entregar energía a diferentes temperaturas sobre un absorbedor.

Tipos de concentradores con seguimiento del Sol.

Los concentradores se pueden clasificar según las características:

Temperatura de operación;  
Exactitud en el seguimiento aparente del Sol, y  
Tipo de seguimiento, que puede ser de un solo eje o biaxial.

Concentradores estacionarios

Los concentradores menos complejos son los que no requieren seguimiento continuo del sol; éstos tienen un ángulo de aceptación muy grande, concentración baja y diseño con base en alguna curvatura sencilla; su orientación debe ser en dirección este-oeste (E-W) a fin de obtener mejor aprovechamiento de los ángulos de aceptación grandes; las concentraciones pueden llegar hasta 10 con un tiempo de captación del orden de 7 horas, con ajuste una vez al día. Los concentradores más simples se muestran en las figuras 2 y 3, la primera corresponde a un colector plano inclinado un ángulo  $\beta$  (latitud del lugar) que recibe la radiación solar proveniente del sol y la reflejada por un espejo horizontal; la segunda presenta colectores horizontales con espejos inclinados que reflejan la radiación sobre el colector.

Los concentradores estacionarios de mayor concentración son los llamados parabólicos (CPC), desarrollados por Welford y Winston (1978) y Rabl (1976) figura 4. Están formados por dos segmentos parabólicos simétricamente colocados alrededor de un eje; el foco de cada parábola se localiza en el extremo de la superficie absorbidora coincidente con la parábola opuesta. El ángulo de cada eje de la parábola proporciona el ángulo de aceptación del concentrador.

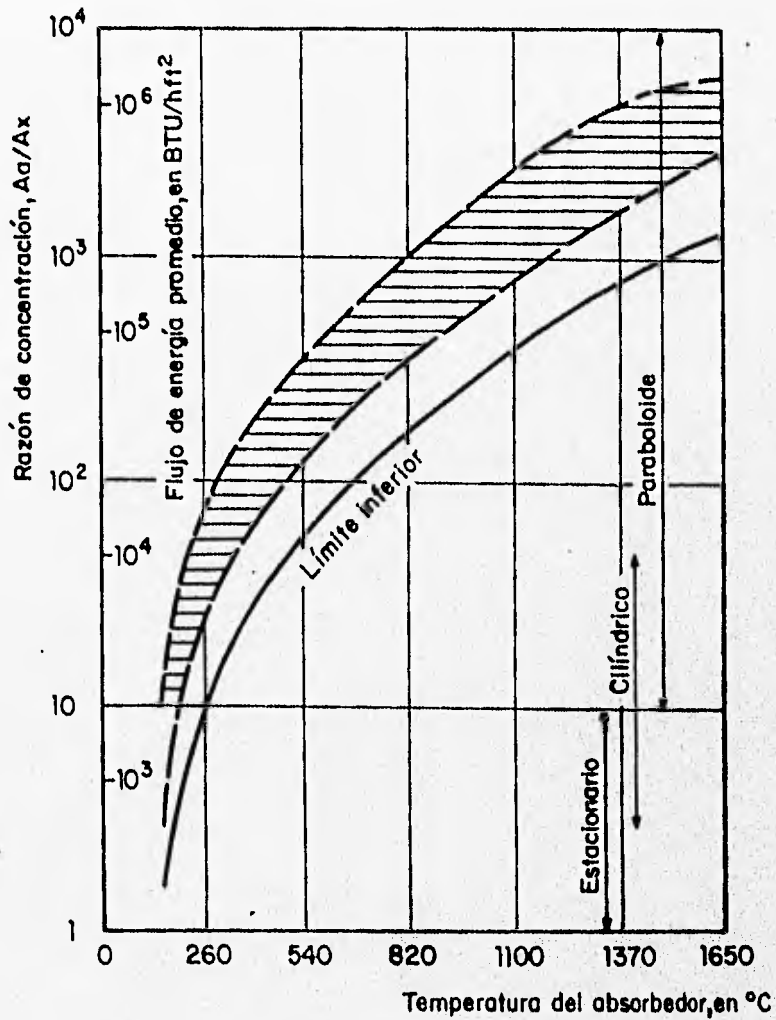


Figura 1.

Relaciones entre razón de concentración y temperatura de operación del absorbedor. La curva límite inferior representa razones de concentración a las cuales las pérdidas térmicas son iguales a la energía generada. La región sombreada corresponde a eficiencias de colección de 40 a 60 por ciento y representa el intervalo usual de buena operación. La escala de densidad de flujo muestra la densidad de flujo promedio de radiación reflejada en el área focal.



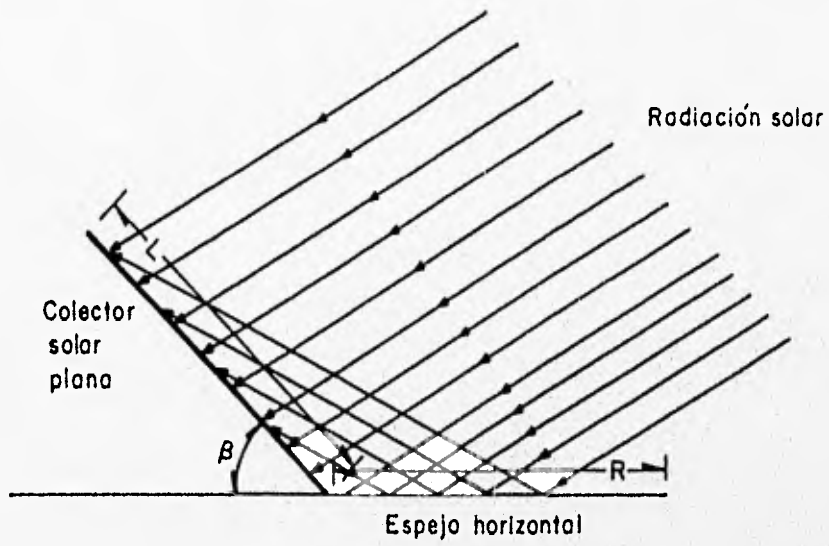


Figura 2  
Colector plano con un espejo plano.

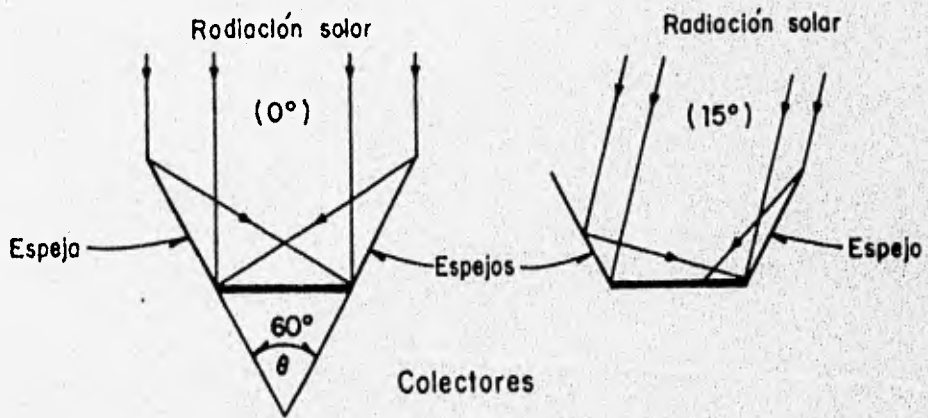


Figura 3  
Colector plano con dos espejos planos

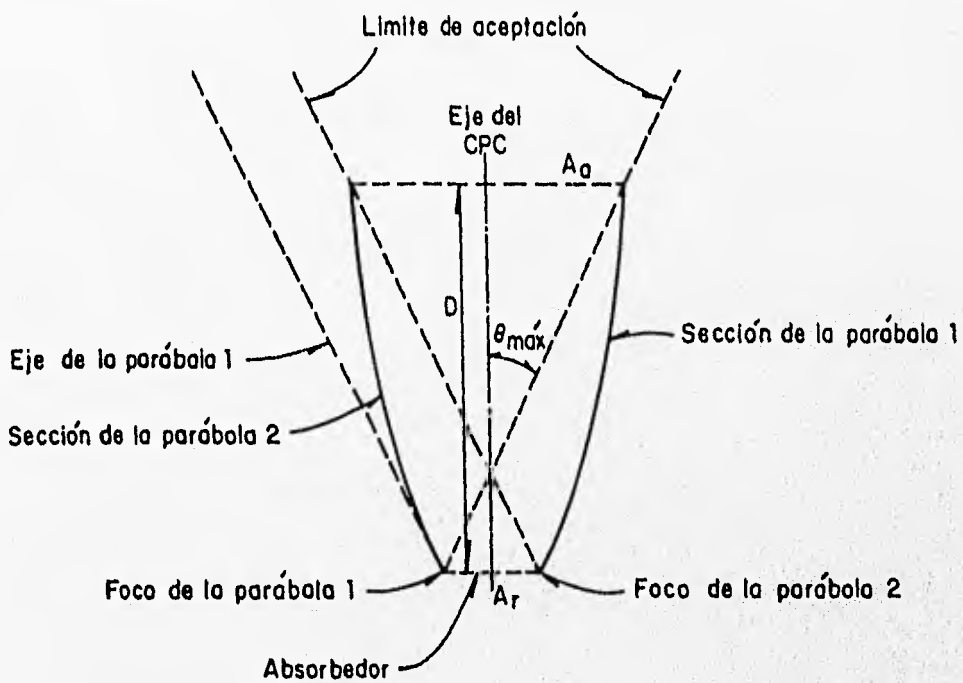


Figura 4  
Concentrador parabólico compuesto.

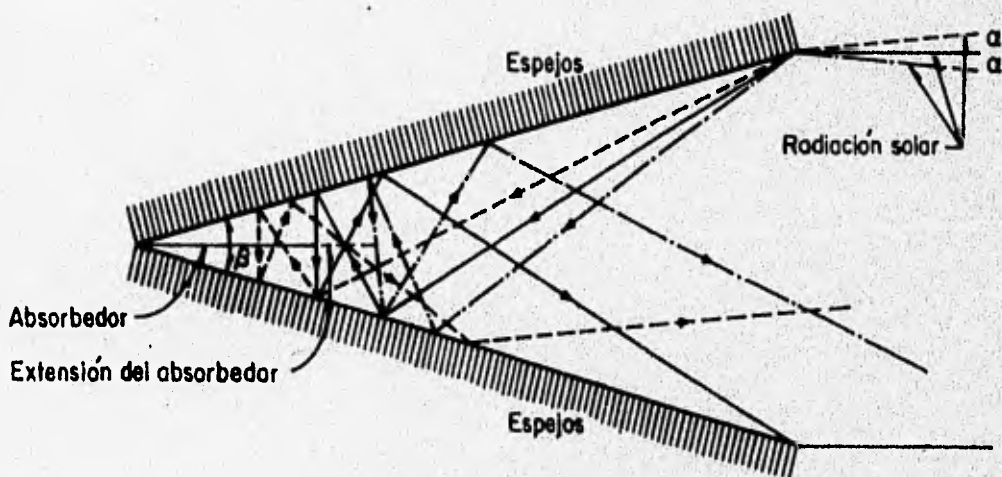


Figura 5  
Sistema de dos espejos planos en forma de "V".

Algunos valores representativos de los concentradores CPC son:

Razón de concentración	Angulo de aceptación ( $\theta_{max}$ )	Número de reflexiones en el espejo
10	5.7	1.25
5	11.5	.99
1.4	36	.25

Otro tipo sencillo de concentradores se puede construir con dos espejos en forma de V. Con este sistema es factible obtener concentraciones hasta de 3.(figura 5)

A continuación se muestran algunos intervalos de temperaturas con concentradores estacionarios.

Concentrador estacionario	Temp. máxima de operación sobre el absorbedor, en °C	Concentración
CPC fijo	100 sin vacío 120 con vacío	1.5 a 2
CPC con 2 ajustes de inclinación por año	160 con vacío	3
CPC con ajuste diario de inclinación	180 con vacío	3 a 10
Espejos en V con 2 ajustes de inclinación por año	120 con vacío	2
Espejos en V con ajuste diario de inclinación	140 con vacío	3

### Concentradores con movimiento continuo

Cuando se necesitan concentraciones mayores de 10 por periodos diarios de 6h o más a lo largo de todo el año, se requieren sistemas con seguimiento del sol. Existen dos tipos diferentes de concentradores al respecto: los de curvatura simple o concentradores cilíndricos, ya sea con curvatura circular o parabólica, y los de curvatura compuesta, o tipo platillo como los paraboloides de revolución y los casquetes semiesféricos. Los concentradores de curvatura simple necesitan mecanismo seguidor con un grado de libertad, y los de curvatura compuesta dos grados de libertad mecánica (foco puntual) (figura 6).

En estos sistemas, el seguimiento del sol se hace generalmente a través de sensores fotosensitivos que envían una señal de naturaleza eléctrica a un sistema eléctrico y un servomecanismo.

### Concentradores con curvatura sencilla

Uno de los sistemas que más se ha desarrollado en los últimos años es el concentrador cilíndrico-parabólico. En general, en los sistemas que están operando actualmente, el absorbedor y el concentrador pueden o no girar simultáneamente; el objetivo principal es que exista un buen enfoque sobre el tubo absorbedor que se encuentra a lo largo del foco de la parábola. (figura 7) Las concentraciones en dichos sistemas están en el intervalo de 15 a 50, y las temperaturas de trabajo alcanzables entre 200 y 350 °C.

Estos sistemas pueden operar con orientación N-S, E-O, o polar. Con forme su orientación, el movimiento angular necesario para seguir el sol será más rápido o más lento; por ejemplo, en el caso de ser N-S, el movimiento es alrededor de 15°/h, en tanto que en E-O el movimiento alrededor del mediodía (4 h antes y 4 h después) es mínimo. (figura 8). La selección de la orientación dependerá de la cantidad de energía requerida a lo largo del día o a lo largo del año.

En la figura 9 se muestra la eficiencia de los concentradores según la temperatura del tubo absorbedor; se observa que las pérdidas por reflexión debidas a la reflejancia de los espejos es del 15 %; estas pérdidas no se pueden eliminar, ya que técnicamente sería difícil fabricar espejos baratos con mejores características ópticas.

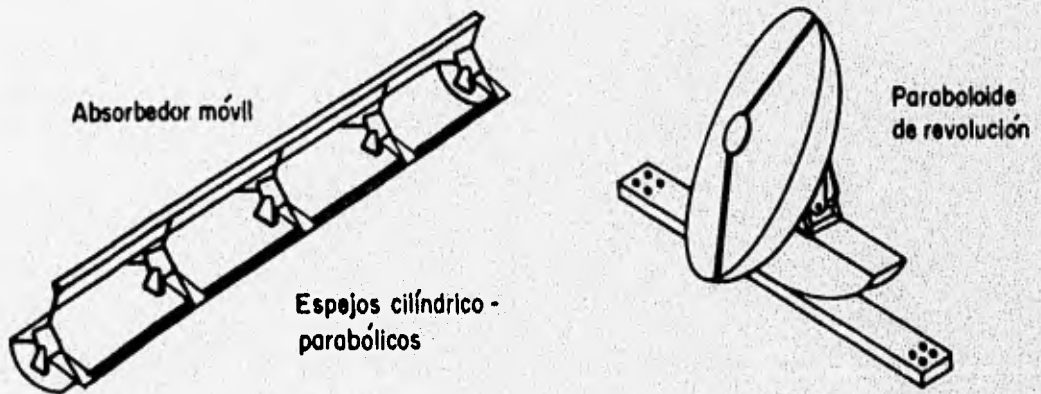
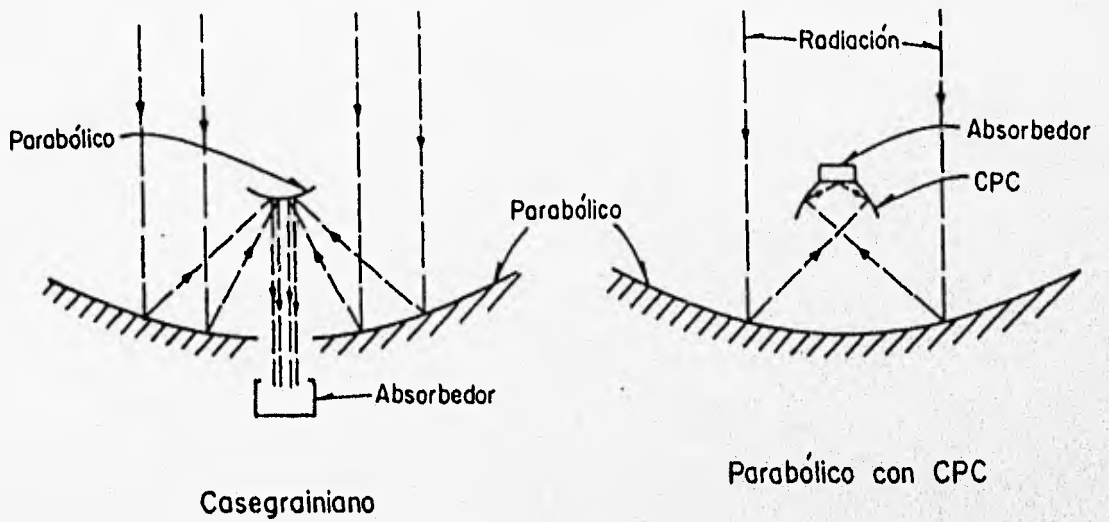


Figura 6  
Algunos concentradores de seguimiento continuo.

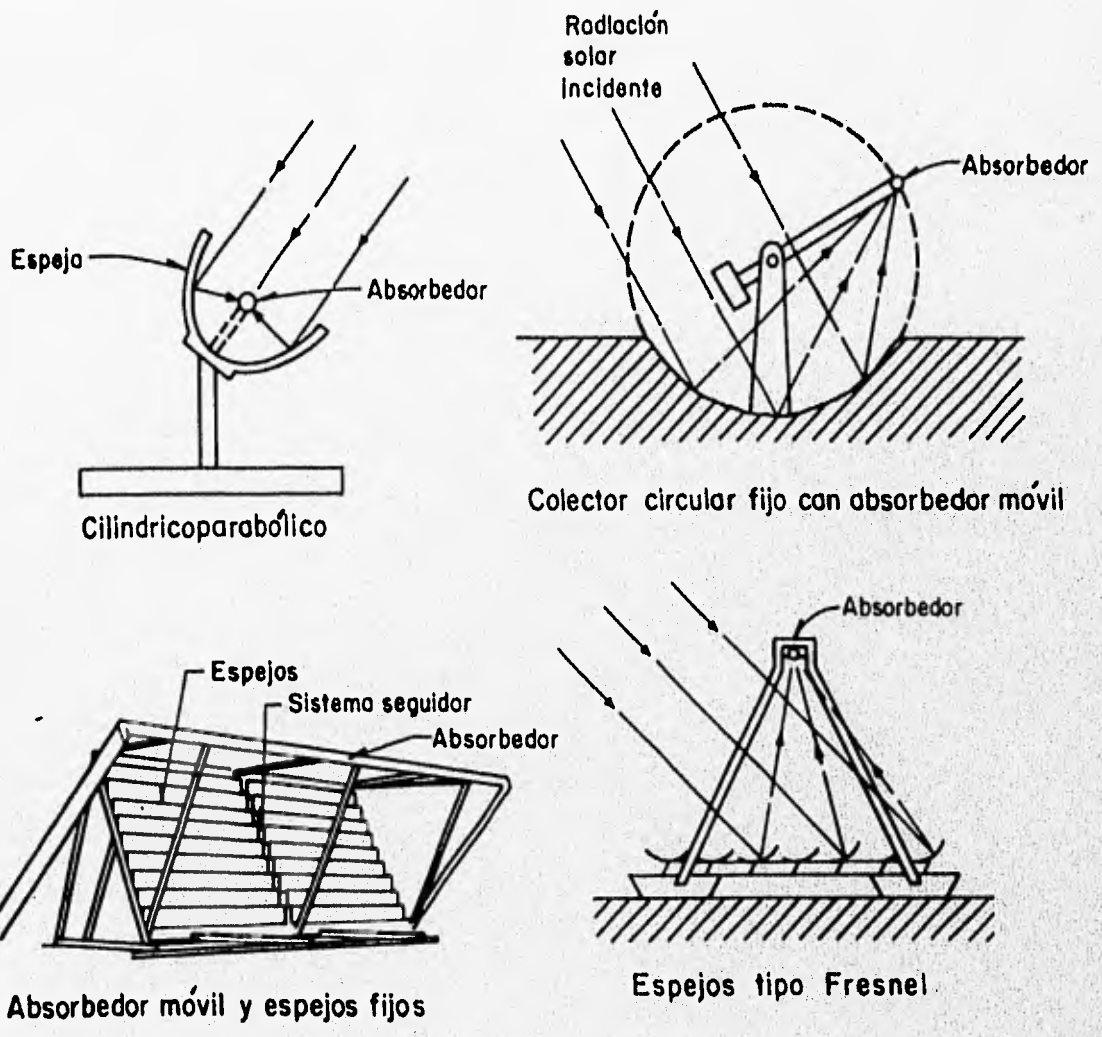


Figura 6  
(continuación)

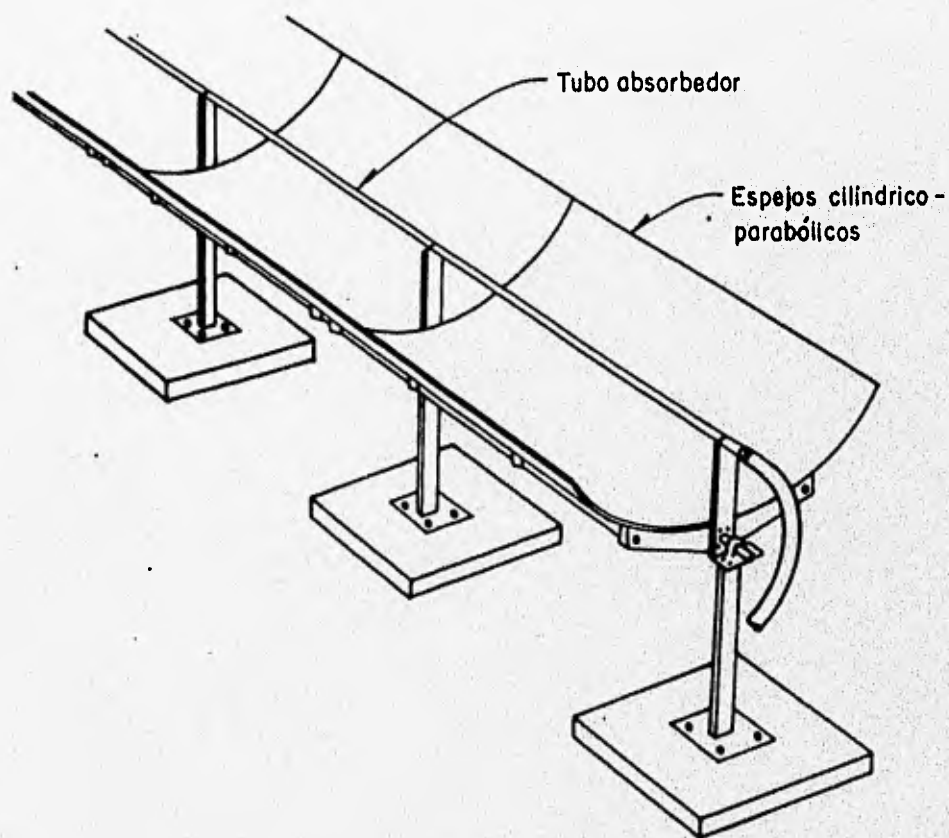


Figura 7  
Captador cilíndricoparábólico.

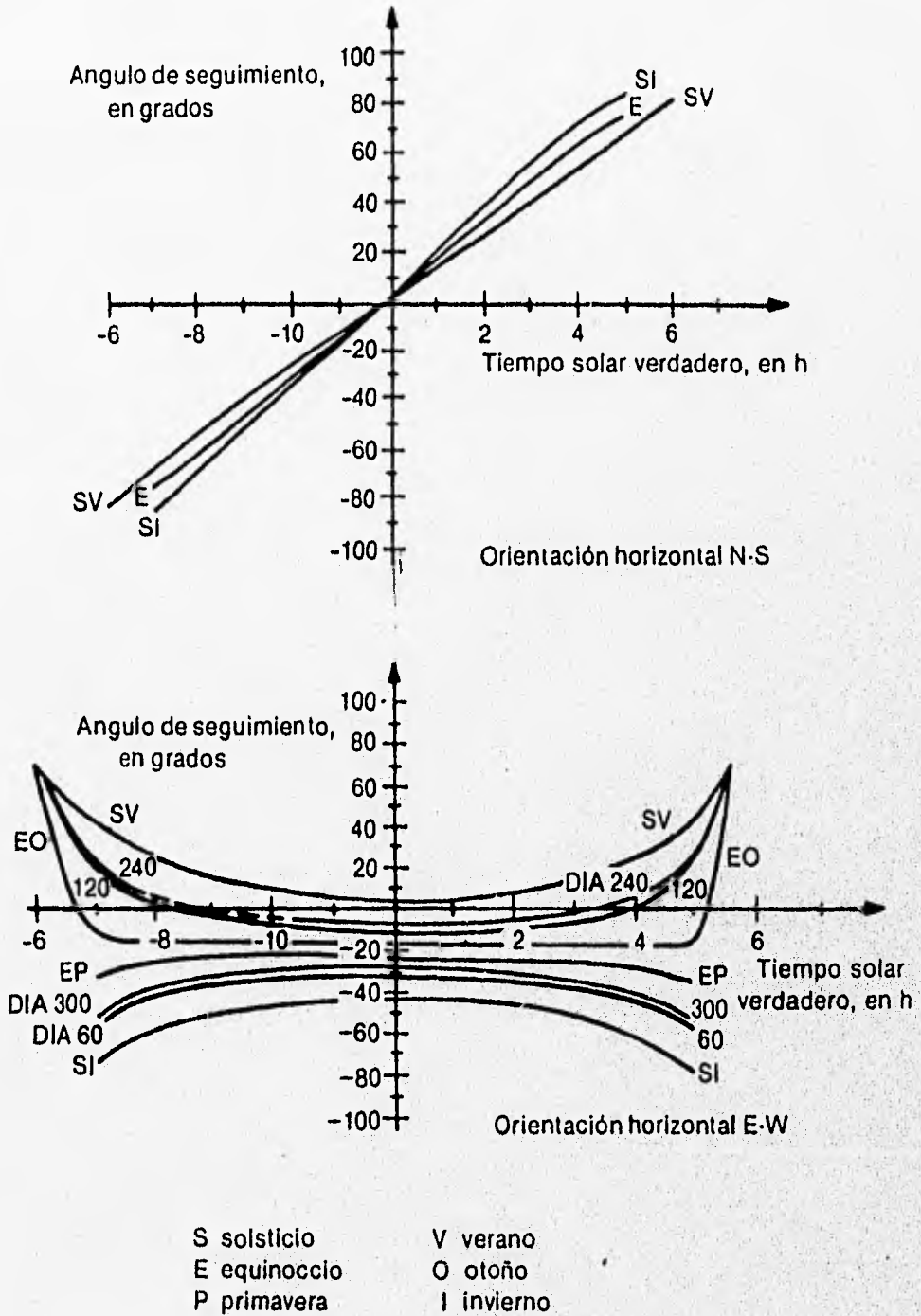


Figura 8  
 Curva de seguimiento de colectores cilíndrico-parabólico.



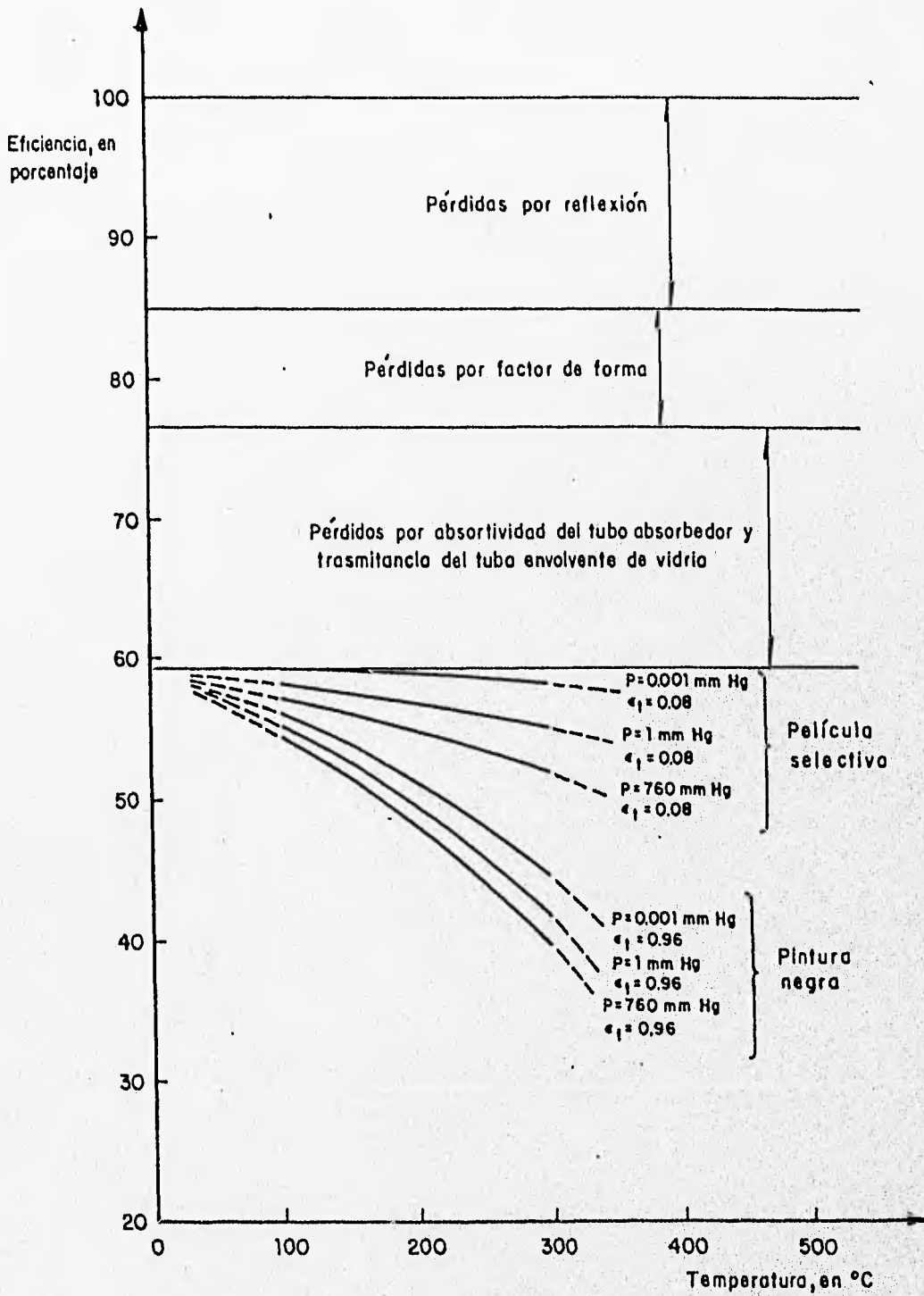


Figura 9  
Eficiencia vs. temperatura de un colector cilindrico-parabólico.

Las pérdidas por el factor de forma son las que se deben a la conservación de una buena geometría durante la construcción de cilindros parabólicos; este factor puede empeorar a lo largo del tiempo si la geometría se deforma.

Un aspecto muy importante en el funcionamiento de un concentrador es el absorbedor. Como intento inicial para fijar el diámetro del absorbedor, es apropiado tratar de captar toda la energía reflejada por el espejo parabólico. El diámetro del receptor dependerá del tamaño angular del Sol, de la magnitud del error cometido en el seguimiento, del error de curvatura del espejo, de la irregularidad de la superficie reflejante y de la absortancia angular característica de la superficie receptora. (figura 10)

Las pérdidas térmicas son directamente proporcionales al diámetro del receptor; para tener un receptor con el menor diámetro posible y así reducir las pérdidas térmicas, es necesario seleccionar un ángulo de borde para el espejo de tal forma que se logre minimizar la distancia máxima ( $r_{\text{máx}}$ ) de la superficie reflejante al foco. Como se observa en la figura 10, el cono de radiación aumenta su sección circular conforme se incrementa la distancia reflector-receptor, ya que ésta aumenta al irse alejando del foco; es por esto que se requiere minimizar la distancia reflector-receptor. Un ángulo de borde de  $90^\circ$  minimiza dicha distancia. (figura 11)

Cuando la apertura del concentrador se conoce, el diámetro del receptor se puede calcular tomando en cuenta las características ópticas del espejo.

Una vez que la radiación solar llega al absorbedor, es importante sea captada en la mayor medida posible, por eso es necesario cubrir el absorbedor con sustancias de alta absortividad. En la figura 9 se muestra como aumenta la eficiencia al usar cromo negro (absortividad  $\alpha = 0.92$  y emisividad  $\varepsilon = 0.08$ ).

Otro tipo de pérdidas importantes en estos concentradores son las debidas a la convección y conducción del calor al medio ambiente, por lo que es necesario reducirlas mediante el encierro del tubo absorbedor dentro de tubos de vidrio y bajar la presión del espacio intermedio. En la figura 9 se muestra cómo mejorar la eficiencia con la reducción de la presión.

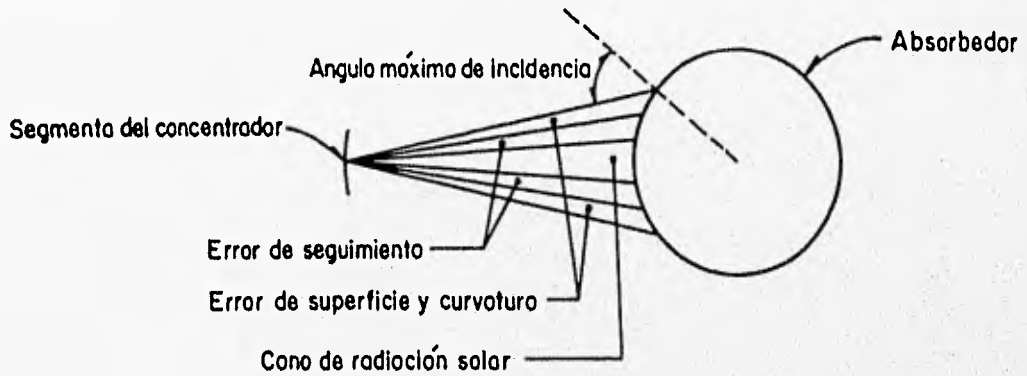


Figura 10  
Factores que intervienen en la elección del diámetro de un absorbedor.

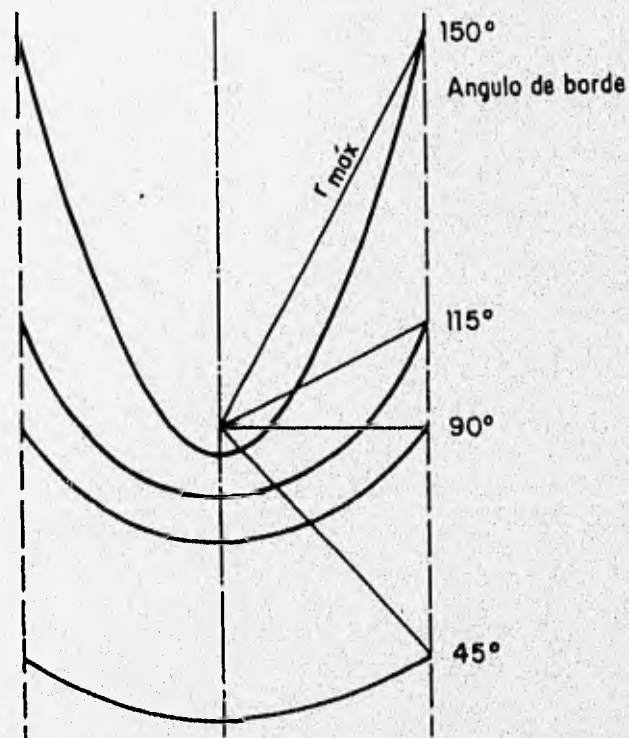


Figura 11

Varios ángulos de borde para una apertura fija. Para un foco común y una temperatura fija  $r_{m\acute{o}x}$  es mínima a un ángulo de borde de 90°, por tanto, se requiere un absorbedor de menor diámetro para los otros ángulos de borde.

Para concentraciones mayores de 50 es necesario utilizar sistemas de curvatura compuesta, como son los reflectores paraboloides de revolución o los casquetes semiesféricos. Idealmente, estos sistemas funcionan durante todo el día con una incidencia de radiación normal a su apertura con excepción del sistema conocido como *Reflector Esférico Estacionario* con absorbedor móvil (SRTA), que se discute adelante.

#### Paraboloides de revolución.

Los espejos parabólicos son los únicos que mantienen una distancia focal constante desde el vértice del propio espejo.

El paraboloide de revolución es una superficie producida al girar una parábola alrededor de su eje óptico.

En este tipo de concentradores se pueden alcanzar concentraciones de 500 a 3600. Debido al tamaño finito del Sol y a imperfecciones en la construcción de espejos, el foco en sistemas de este tipo no es puntual. Las temperaturas que se han logrado alcanzar en estos sistemas van desde los 500 hasta los 2000°C.

Debido a que el área del absorbedor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente por radiación; generalmente no es necesario utilizar cubierta en el absorbedor para evitar efectos convectivos.

El funcionamiento de un paraboloide de alta concentración es mucho más sensible a las propiedades ópticas del sistema que a las pérdidas térmicas.

#### Sistema SRTA

En la figura 12 se muestra cómo con un espejo a base de un casquete semiesférico se efectuaría el enfoque sobre un absorbedor lineal de tamaño apreciable, colocado paralelo a la radiación solar incidente.

Dado que el espejo es estacionario en este tipo de concentradores, se pueden construir con relativa facilidad unidades grandes. Además, se reducen grandemente las pérdidas que ocurren al transportar la energía térmica, y los costos de instalación y bombeo del fluido de trabajo. Con excepción de la torre central ( que se discutirá más adelante), otros tipos de concentradores consisten en muchos colectores pequeños que sufren pérdidas térmicas y mecánicas al transportar los fluidos de trabajo.

Radiación solar

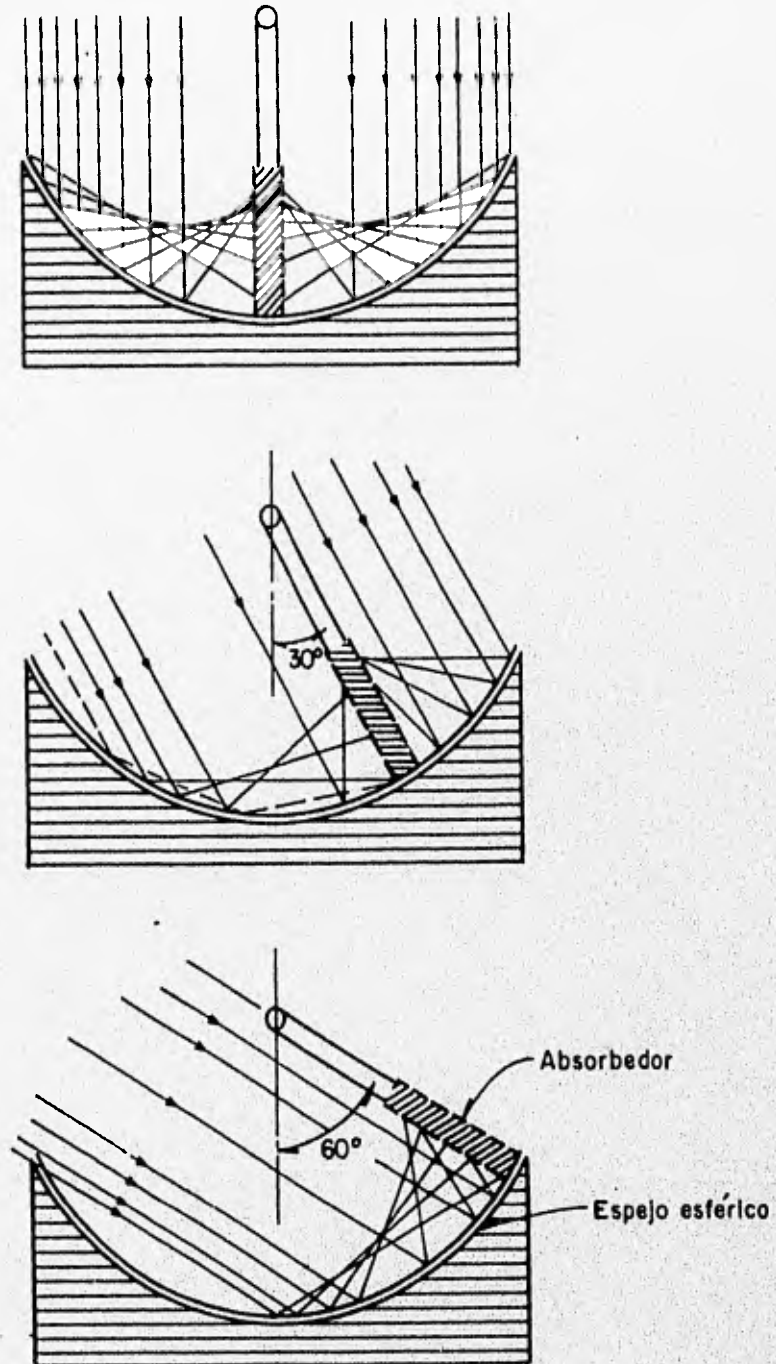


Figura 12  
Sistema SRTA con diferentes posiciones de la radiación solar incidente.

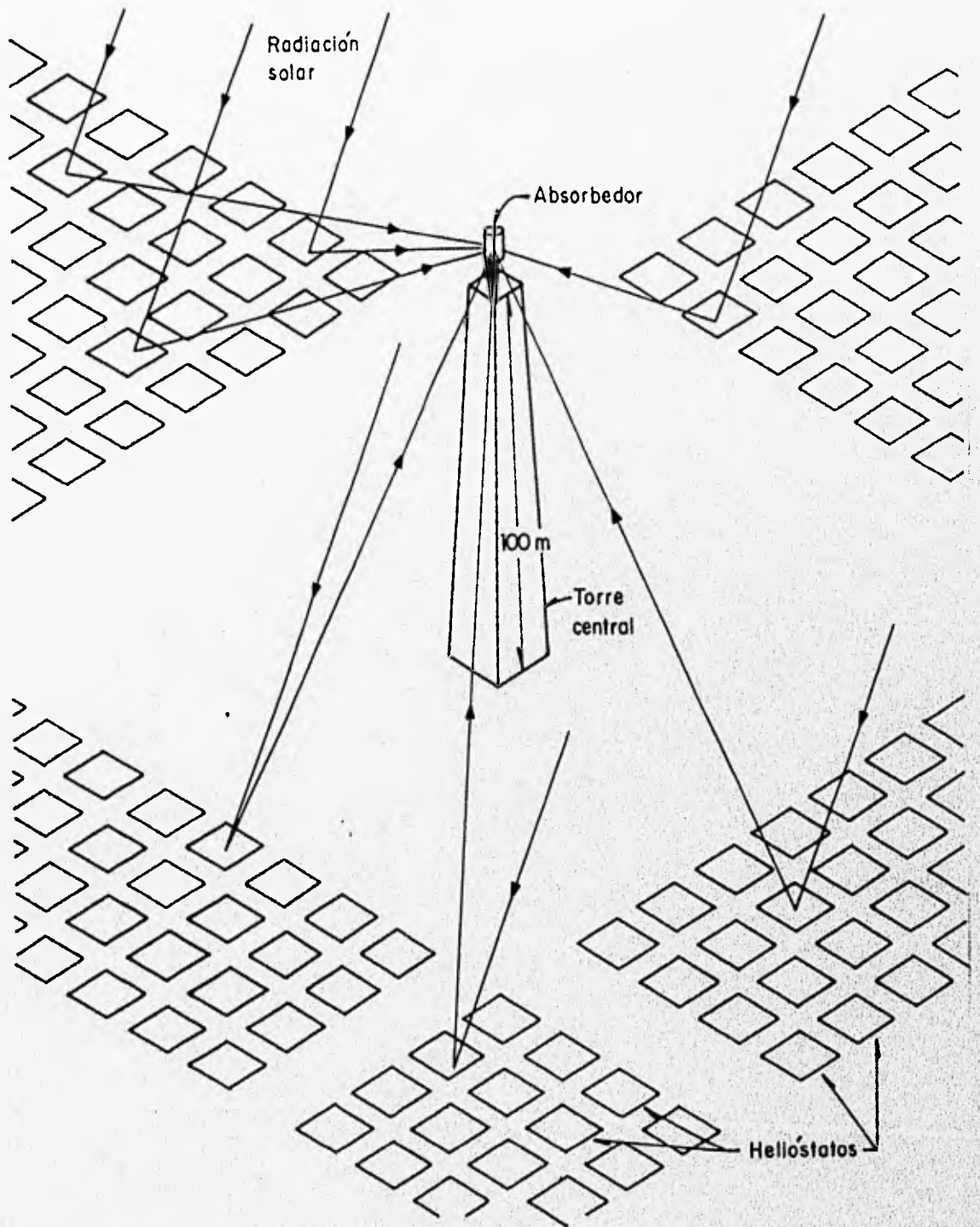
Una de las desventajas de este sistema es la llamada *pérdidas por el coseno del ángulo de incidencia de la radiación solar*. Ya que la apertura de este concentrador no sigue al Sol, la componente directa de la radiación solar es proporcional al coseno del ángulo entre los rayos solares y la normal al plano de apertura, o sea al ángulo de incidencia, el cual depende de la latitud del lugar y de la orientación del espejo, y varía con la hora del día y la época del año. Dado que las pérdidas del absorbedor por convección y radiación son constantes para una temperatura dada, la eficiencia de este sistema depende del ángulo de incidencia, por lo que resultan adecuados en regiones de baja latitud.

### Sistema de torre central.

Se desarrolla actualmente para generar altas potencias, del orden de MW (figura 13).

Consiste en un conjunto de helióstatos que reflejan la radiación solar directa hacia una torre central, con un absorbedor colocado en la parte alta de la torre.

En dichos sistemas se logran razones de concentración máximas de 3000 y temperaturas en el intervalo entre 500 y 2000°C. El arreglo del sistema de torre central evita gran cantidad de tuberías para cubrir grandes distancias de transporte del fluido de trabajo, reduciendo así las pérdidas de calor. El mayor costo de este tipo de instalación se debe a la gran cantidad de helióstatos que siguen al Sol y a que el absorbedor debe ser capaz de recibir de 1 a 2 MW/m<sup>2</sup> de flujo de energía solar y transferir el calor con un mínimo de pérdidas.



Area de espejos  $\approx 10 H_0$

Figura 13  
Sistema de torre central

## CAPITULO III

### GENERACIÓN DE VAPOR EN UNA PLANTA TERMOSOLAR

#### RESUMEN

La generación del vapor para fines de generación de energía se puede lograr de muy variados métodos, en nuestros días con el aumento de la conciencia ecológica, se ha considerado importante el generar vapor disminuyendo las emisiones de contaminantes a la atmósfera, esto ha despertado el interés por la generación utilizando sistemas solares.

Esta puede ser de manera directa o indirecta, nos dedicaremos al estudio de los aspectos referentes a la generación directa de vapor.

Se presentan los materiales utilizados en concentradores de canal parabólico, así como los problemas de generación

#### GENERACION DE VAPOR

La generación de vapor mediante concentradores se logra de dos maneras distintas principalmente, la primera es la indirecta y consiste en que la energía que llega al tubo absorbedor por medio de los concentradores solares se transfiere a un fluido de transferencia, que por lo general es aceite y éste a su vez al agua para generar vapor, a través de un intercambiador de calor.

La segunda es de manera directa, esto es, hacer pasar el agua a través del tubo absorbedor y generar el vapor directamente.



En nuestro caso nos dedicaremos a ver los aspectos relacionados con la generación directa de vapor, así como, las consideraciones y problemas que se presentan.

### EL CICLO RANKINE EN LA GENERACION DE VAPOR.

El ciclo termodinámico que se usa para la generación de electricidad utilizando vapor es el ciclo Rankine. La fig. 14 muestra la expansión completa del vapor en un ciclo Rankine en un diagrama temperatura-entropía.

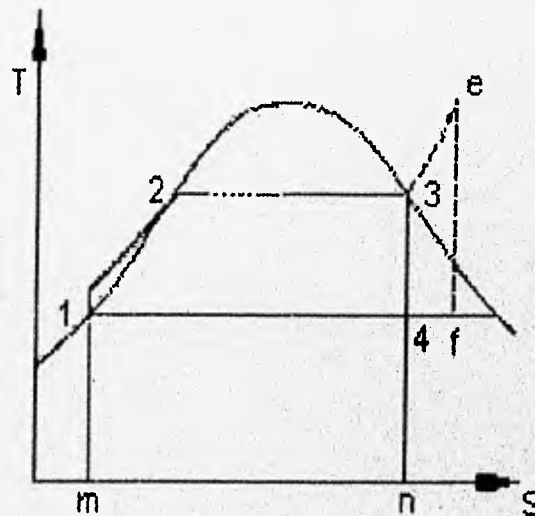


FIGURA 14  
Ciclo Rankine con recalentamiento, diagrama T-S.

1. Compresión isentrópica en una bomba.
2. Suministro de calor a presión constante en una caldera.
3. Expansión isentrópica en una turbina.
4. Extracción de calor a presión constante en un condensador.

En el estado 1 se comprime isoentrópicamente el líquido que sale del condensador hasta que alcanza la presión deseada en el proceso de suministro del estado 2, a esta presión, se suministra energía a presión constante hasta que el agua se evapora completamente a vapor saturado del estado 3, Luego se permite que el vapor se expanda isoentrópicamente en una turbina hasta el estado 4, entonces el vapor humedo que sale de la turbina se condensa a presión constante hasta regresar al estado 1.

El calor suministrado en el proceso 2-3 puede provenir de la combustión de combustibles convencionales, de una fuente solar o de un reactor nuclear.

Los motores de vapor son máquinas que reciben el flujo de trabajo bajo condiciones bien definidas y lo expulsan a una presión definida; teóricamente se desea que exista una expansión isoentrópica del vapor.

El ciclo Rankine es el que expresa en forma ideal el funcionamiento del motor de pistones o turbinas de vapor que funcionan junto con las otras componentes de una planta generadora de potencia, tales como condensador, bombas y caldera.

En nuestro caso la caldera es el concentrador solar, el cual va a generar vapor. La eficiencia de operación determinada con estas componentes no es la eficiencia total de la planta, la cual es la relación del calor equivalente a la salida de la planta a la energía calorífica suministrada por el combustible quemado en los hornos de la caldera.

### MATERIALES UTILIZADOS PARA LA GENERACION DE VAPOR

Por lo visto en el capítulo anterior los concentradores solares son una buena opción para la generación de vapor, para poder generar vapor en un concentrador de canal parabólico existen ciertas consideraciones que deben tomarse en cuenta.

## Espejos

El espejo es parte muy importante del concentrador ya que es esta superficie la que refleja la radiación solar directa al tubo absorbedor, existen varios tipos de espejo por ejemplo : espejos de primera y de segunda superficie.

Los espejos de segunda superficie, son aquellos en los que la radiación solar (rayo incidente) tiene que pasar a través de el sustrato que contiene al material reflejante (vidrio). (fig.15)

El vidrio utilizado en este último tipo de espejos debe ser lo más transparente ya que los rayos solares lo atraviesan dos veces y existen pequeñas impurezas de fierro que pueden bajar la eficiencia de un concentrador de un 5 a un 7 por ciento. Es importante también el evitar al máximo las burbujas dentro del vidrio.

Los espejos hechos a base de vidrio o cerámica vítrea son excelentes. Estos espejos son dimensionalmente estables y pueden fabricarse fácilmente en formas bidimensionales para darles diferentes formas geométricas por métodos de deformación térmica por gravedad, sin dañar la calidad original de las superficies externas.

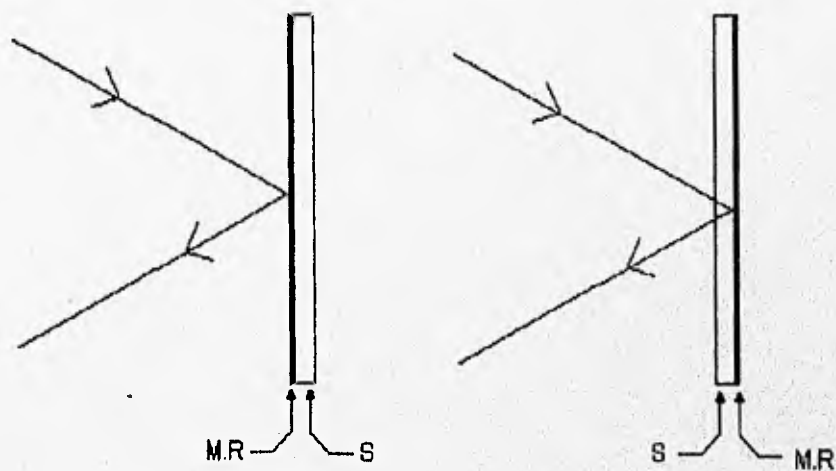
De manera que es posible darles forma de una parábola, la cual es la geometría mas usada en aplicaciones de energía solar

Existen espejos de segunda superficie a base de acrílico adherible con películas de plata o aluminio como material reflejante ; En estos, los espejos hechos con aluminio son más resistentes a condiciones de intemperie que los hechos de plata ; los espejos de plata contienen un inhibidor de rayos ultravioleta.

Los espejos hechos de plata tiene una mejor reflejancia que los espejos con aluminio.

En espejos frontales o de primera superficie la radiación solar (el rayo incidente) llega directamente al material reflejante, sin tener que pasar por el sustrato que lo sostiene ; este tipo de espejos presentan la ventaja de no utilizar espejos muy transparentes, lo que los hace más, baratos. (fig. 15)

El material reflejante puede ser depositado en el vidrio mediante procesos químicos, erosión iónica o mediante un cañón de electrones ; sin embargo, estos espejos pueden sufrir abrasión o ataques químicos por encontrarse a condiciones de intemperie, por lo que se recubren con una película de  $\text{SiO}_2$  (cuarzo) para protegerlos del ambiente, la cual disminuye de manera mínima la eficiencia óptica de los espejos utilizados en los concentradores. Estos espejos se encuentran actualmente en estudio en el Instituto de Ingeniería.



Espejo de primera superficie

Espejo de segunda superficie

figura 15

A continuación se muestran dos fotografías la primera de un espejo del tipo ECP, de la marca 3M, de película autoaderible con sustratos de plata que presenta el efecto "túnel"(figura 16), en el cual la película de acrílico se separa de la capa de plata provocando el deterioro del espejo.

En la segunda se muestra el agrietamiento en el acrílico de los espejos hechos con plata. (fig. 17).

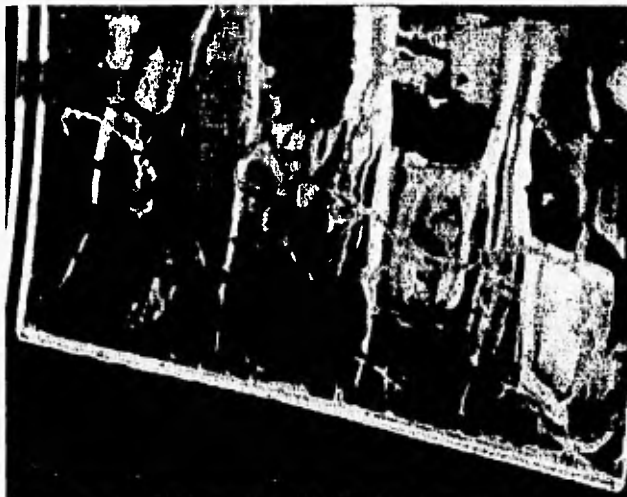


Figura 16  
Espejo de aluminio con efecto túnel



Figura 17  
Espejo de plata con agrietamiento

### Tubo absorbedor

Para poder disminuir las pérdidas y por tanto aumentar las temperaturas de los fluidos con que se trabaja en los concentradores, es importante el uso de superficies selectiva; las superficies selectivas más comunes son películas de óxidos metálicos sobre sustratos metálicos, por ejemplo el cromo negro sobre tubos de cobre con níquel o de acero con níquel.

Este tipo de absorbedores son los que presentan la mayor absorción con la menor emitancia, soportan más altas temperaturas con pequeñas variaciones de las propiedades ópticas y resistencia a la corrosión de 5 años mínimo, por lo que se recomienda su uso.

El tubo absorbedor está encerrado por tubos de vidrio pyrex a fin de minimizar las pérdidas por convección, la eficiencia puede mejorarse al ser evacuado el espacio anular entre el tubo absorbedor y la cubierta protectora de vidrio pyrex, esto se debe a que se reducen notablemente las pérdidas por convección y conducción del aire.

Otro de los factores es la tubería, la cual debe cubrirse de material aislante para reducir las pérdidas por radiación de calor al ambiente, la tubería se cubrió con medias cañas de lana mineral y a su vez recubiertas con lámina de aluminio.

### Problemas de generación

La generación directa de vapor presenta varios problemas de los cuales se muestran los más significativos.

Al generarse el vapor en el tubo se presenta un reflujo del vapor hacia la bomba de alimentación, por lo que es conveniente colocar una válvula check después de la bomba para evitar que el vapor le llegue.

Este reflujo provoca que la entrada del agua no sea a temperatura ambiente, por lo que esta observación debe de ser tomada en cuenta al evaluar la eficiencia del sistema, determinando cual es realmente el calor que es suministrado y obtener la diferencia de temperaturas real .

Un detalle que surgió en las uniones de los tubos absorbedores fueron las fugas, se utilizaron muchos materiales para sellar las uniones, pero después de un tiempo se presentaba la fuga, y esto era debido a que el tubo está sometido constantemente a una dilatación y a una contracción, lo que provoca que no sellen bien las uniones, por tal motivo se optó por soldar los tubos, con esto se eliminaron las fugas.

El agua en un sistema de éstos debe de tratarse para eliminar las sales que contenga el agua, evitando se incrusten en la tubería o dañe al motor o a la caldera.

Los valores de dureza que deben manejarse en el agua tratada son de cero grados por galón (menos de 17 ppm). Estos valores se alcanzan por medio de un tratamiento que consiste en enviar el agua dura a una resina suavizadora. Se conoce a ésta como resina suavizadora catiónica, la cual intercambia iones de agua dura (principalmente  $\text{Ca}^{++}$  y  $\text{Mg}^{++}$ ) bajándolos a un nivel aceptable para usarlos en el motor de pistones o caldera. De esta manera se elimina o minimiza la incrustación de las partes metálicas.

Otro problema es la caída de presión del agua a través de la válvula que regula el flujo de entrada a los concentradores. El flujo que se maneja es muy pequeño por lo que se debe de estrangular para poder suministrar la cantidad necesaria, el problema estriba en que se necesita bombear 1 litro por minuto a una presión de 2 atmósferas aproximadamente.

Esto puede solucionarse si se aumenta el flujo, pero esto trae consigo aumentar la energía, es decir, la superficie de captación para poder evaporar.

Otro problema que se presentó es el pandeo de los tubos absorbedores, que fue el problema que más tiempo nos llevó resolver, pues en la literatura no se encontró información por lo que se tuvo que estudiar el fenómeno.

Este pandeo se presentaba principalmente cuando existían cambios bruscos de temperatura entre el tubo absorbedor y el agua que se suministraba a través del tubo. Esto trae consigo la deformación del tubo y la ruptura de los tubos de vidrio que cubren al absorbedor.

Para tratar de entender el fenómeno se realizaron diferentes mediciones en el tubo, la cuales fueron a lo largo y perimetrales.

En un principio se contó con un tubo absorbedor de acero de una pulgada que presentaba un gradiente de temperatura de 40 a 60°C entre la cara superior e inferior del tubo al momento del pandeo, siendo la inferior la que recibe la radiación solar concentrada.

Dicho gradiente de temperatura se presentaba con una radiación solar de 980 W/m<sup>2</sup>, a la altura de la ciudad de México.

Se sustituyeron dichos tubos por tubos de cobre, la razón fue porque la conductividad térmica del cobre es 7 veces mayor que la del acero.

Se probó con el cobre y se observó que el gradiente era menor de 10°C.

El pandeo en el tubo de cobre era mucho menor que el presentado en tubos de acero, por lo que se reemplazaron los tubos de acero por cobre para evitar la fractura de los tubos de vidrio y con esto poder lograr una generación de vapor bajo mejores condiciones, eliminando de esta manera los esfuerzos



## CAPITULO IV

### SISTEMA MOTOR GENERADOR

#### RESUMEN

Dentro de un ciclo de generación de energía una de las partes importante es la conversión de la energía térmica en energía mecánica, para tal efecto suele utilizarse una máquina térmica, ya sea una turbina o un motor de vapor según sea el caso.

Las turbinas resultan ser muy eficientes para presiones altas, mientras que para presiones bajas no son tan eficientes por lo que en nuestro caso el motor de vapor resulta una buena opción. Se obtuvieron las curvas características para un motor de pistones de doble efecto que se utilizó para la generación de electricidad.

Los generadores sincrónicos o alternadores son máquinas utilizadas para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna.

En la parte referente a la generación, se utilizó un generador de corriente alterna o alternador automotriz por cuestiones económicas y prácticas.

#### MOTOR DE VAPOR

##### ANTECEDENTES

La energía de un fluido, en general, y en particular, la del vapor de agua, se puede utilizar de los cinco modos que a continuación se expresan, correspondientes a otras tantas categorías de motores:

1.-Máquinas que utilizan presión de vapor sobre un émbolo (máquinas alternativas).

2.-Máquinas en que el vapor actúa sobre un fluido y origina su movimiento (pulsómetros).

3.-Máquinas en las que se utilizan la velocidad de salida (efecto vénturi) para producir depresiones capaces de poner en movimiento a una masa líquida.

4.-Máquinas en las que se utiliza la fuerza elástica del vapor actuando sobre sólidos muy divididos (aparatos del chorro de arena).

5.-Máquinas en que se recoge directamente la fuerza del vapor (turbinas).

Dentro de las máquinas de mayor importancia como debemos ver están las de los grupos 1 (máquinas de vapor de movimiento alternativo) y 5 (turbinas de vapor).

Según el modo de actuar del vapor, y del movimiento obtenido por la máquina existen los dos grupos siguientes:

a)Máquinas de cilindro y émbolo o máquinas de movimiento alternativo.

b)Máquinas de movimiento rotativo o turbinas.

En las primeras, la presión del vapor hace avanzar un émbolo, cuyo movimiento rectilíneo alternativo se convierte en circular continuo mediante un mecanismo del tipo biela-manivela o análogo. Durante mucho tiempo han sido las únicas industrialmente empleadas.

Por el contrario, en el segundo, en las turbinas se transforma la energía cinética del vapor en velocidad, que es recogida por una o varias ruedas provistas de alabes, mediante un proceso análogo, en principio, al de las turbinas hidráulicas y otras máquinas reactivas.

A continuación se estudiará lo referente a las máquinas de cilindro y émbolo por lo que cabe clasificarla así:

I. Por el *sistema cinemático* encargado de transmitir o transformar la energía producida por la máquina.

1 Máquinas con cilindro fijo y émbolo animado de movimiento alternativo.

i) Máquinas con guía de cruceta. El movimiento rectilíneo alternativo del émbolo, se transforma en circular continuo del árbol mediante un sistema de biela-manivela. Es esta la categoría más importante y extendida de máquinas de vapor en general.

ii) Máquinas con guía de cuadro. Este mecanismo, poco empleado por los importantes rozamientos a que da lugar, tiene la ventaja de su pequeña longitud constructiva y de evitar los efectos debidos a la oblicuidad de la biela; de todos modos su aplicación es muy escasa.

iii) Máquinas con balancín. Su representación típica es la máquina de Watt, que no tiene hoy más que un interés histórico.

iv) Máquinas de movimiento rectilíneo, a este grupo, en el que se utiliza directamente, y sin transformar, el movimiento rectilíneo del émbolo, pertenecen las bombas de alimentación de las calderas y los martillos-pistones de vapor.

2 Máquinas con cilindros fijos y émbolos rotativos

Estas máquinas que funcionan a la inversa de un ventilador Root, reciben el nombre de máquinas rotativas y carecen de aplicación importante.

3 Máquinas de cilindro oscilante. El cilindro puede oscilar sobre unos soportes huecos, por cuyo interior se realiza la entrada y salida de vapor. Este tipo se ha empleado en algunos barcos de ruedas.

4 Máquinas con cilindros rotativos. En estas máquinas la manivela es fija y a su alrededor giran los émbolos y las bielas. Este sistema tiene cierta importancia en motores de combustión interna para aviación.

II Por el número de caras activas del émbolo se clasifican en:

1 Máquinas de simple efecto. Si el vapor actúa solamente por una cara de émbolo, estando permanentemente la otra a la presión atmosférica.

2 Máquinas de doble efecto: cuando el vapor obra alternativamente sobre una y otra cara del émbolo.

III Por el modo de actuar el vapor sobre la cara activa del émbolo:

1 Máquinas de plena presión: Cuando el vapor actúa durante toda la carrera del émbolo con una presión igual o muy poco diferente a la de la caldera. Este modo de actuar del vapor se utiliza muy poco por su rendimiento tan bajo.

2. Máquinas de expansión: Cuando la entrada del vapor sólo se realiza durante una parte de la carrera del émbolo. Durante el resto, el vapor se expande, utilizando su fuerza elástica con un rendimiento superior al grupo anterior.

### CARACTERIZACION

En el Instituto de Ingeniería cuenta con un motor de vapor, cuyos componentes y características se desconocían, se logró saber que es un motor de dos pistones de doble efecto de 3 HP, marca Stuart Turner. Que se muestra la figura 18.

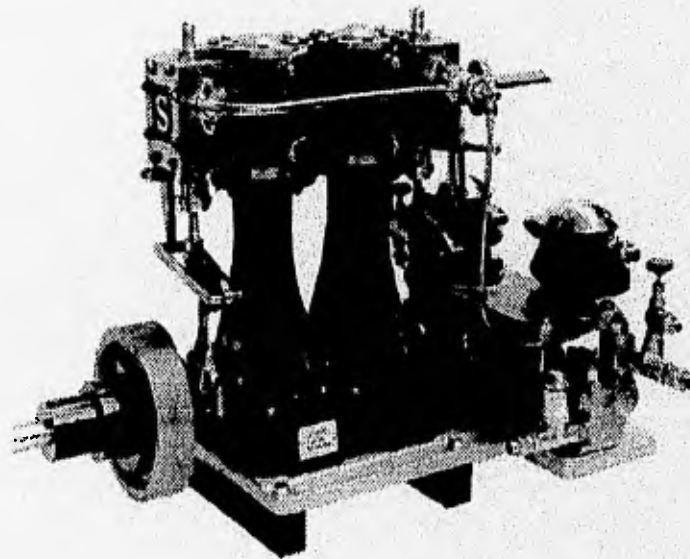


Figura 18  
Fotografía del motor de vapor

Debido a que ya se contaba con el motor de vapor se decidió utilizarlo por motivos prácticos y económicos.

Posteriormente se procedió a la obtención de sus curvas características para un rango de presión comprendido entre 20 y 50 lb/plg<sup>2</sup> utilizando un dinamómetro y una caldera eléctrica con trampa de vapor.

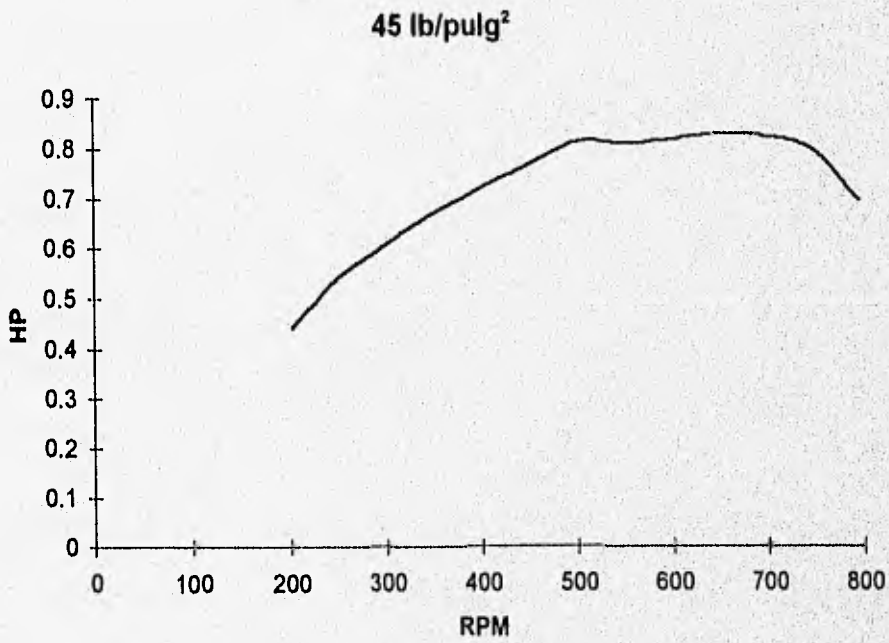
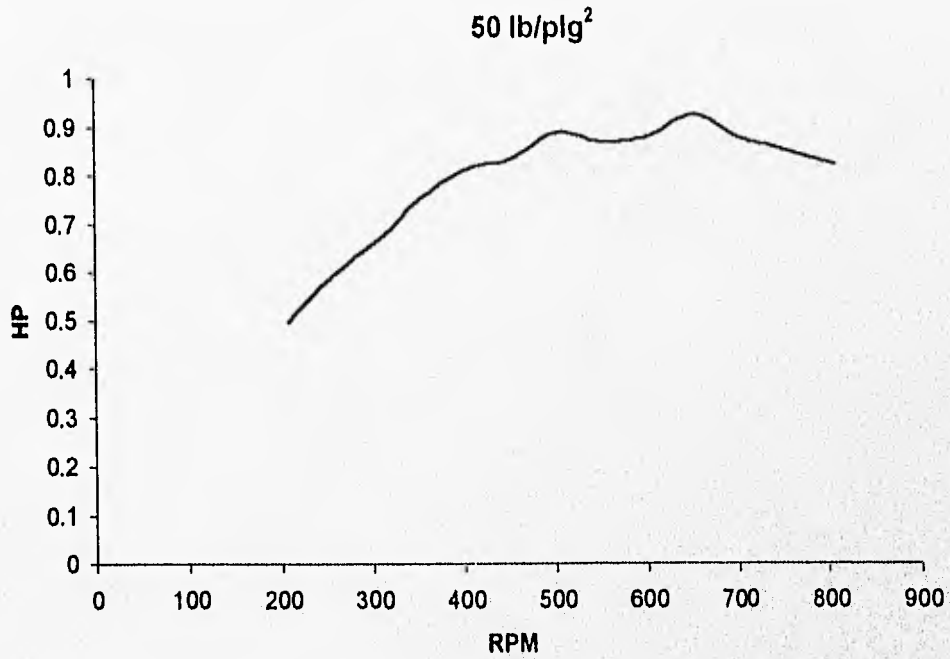
La caldera que se utilizó es una caldera eléctrica marca Susman ,modelo m139 de 9KW ; El dinamómetro es de marca Dynamatic EATON modelo AD- 8060.

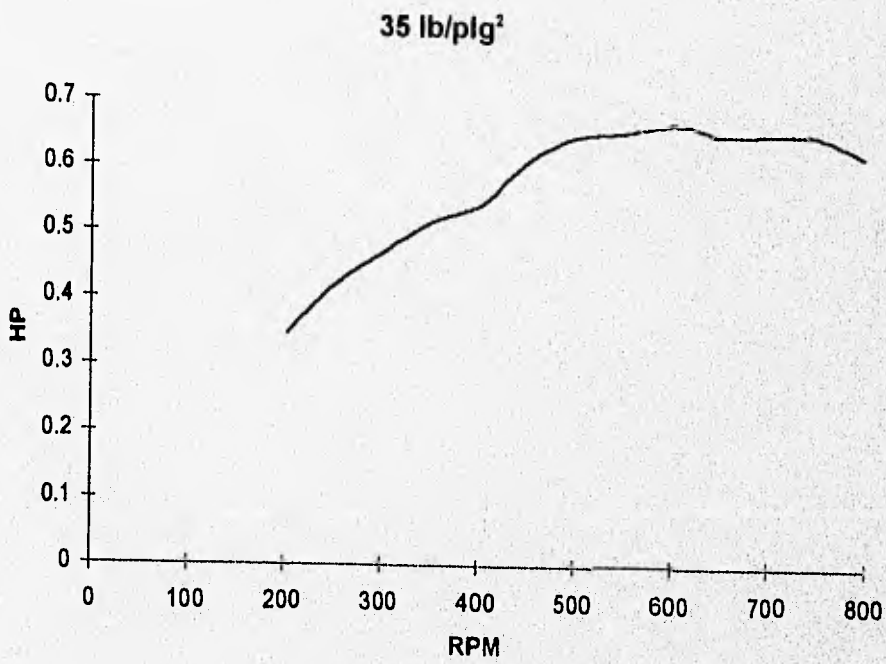
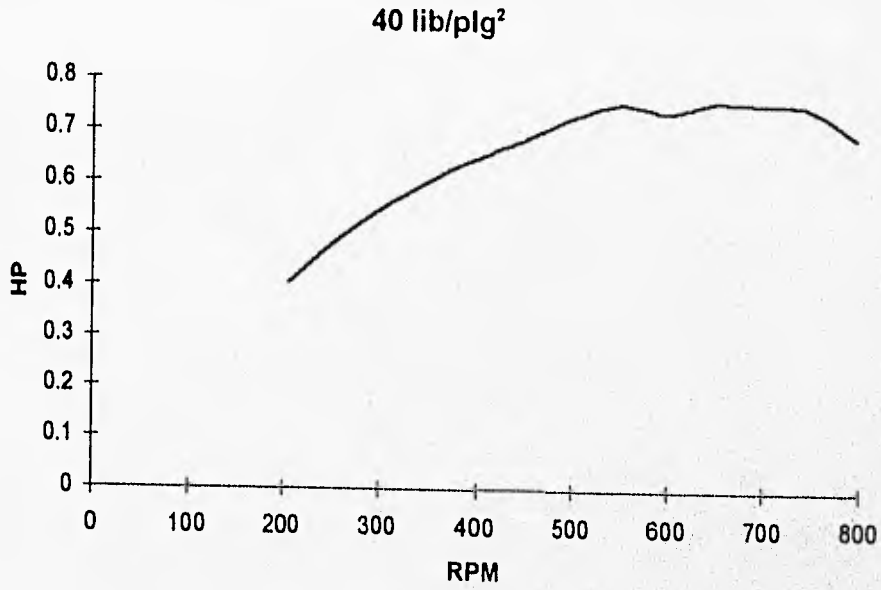
Las lecturas que se tomaron, se realizaron tratando de mantener una velocidad constante variando el par y la presión, ya que era muy difícil mantener una presión constante, debido a que la caldera con la que se contaba no tenía la suficiente potencia como para mantenerla constante, y así poder variar el par obteniendo diferentes velocidades.

Se le tuvo que añadir a la caldera una trampa de vapor porque entregaba vapor saturado y esto era un peligro para el motor, porque si este se acumulaba en forma condensada en los pistones podría traer consigo una biela doblada.

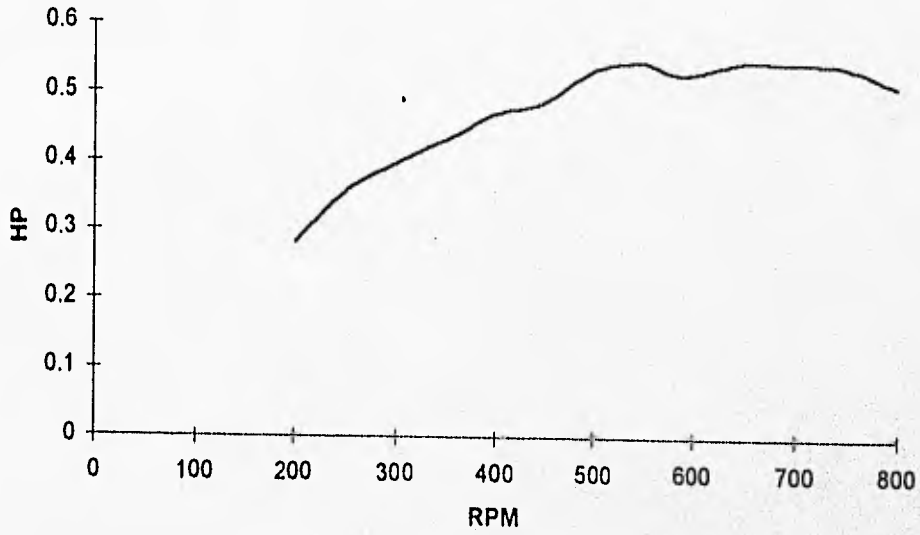
La metodología que se siguió fue tomar de 3 a 4 lecturas a 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750 y 800 rpm. y presiones entre 15 y 50 lb/plg<sup>2</sup> ;se obtuvieron las curvas tomando en cuenta los valores antes mencionados.

Estas se muestran como gráficas para el motor de vapor con las correspondientes presiones.

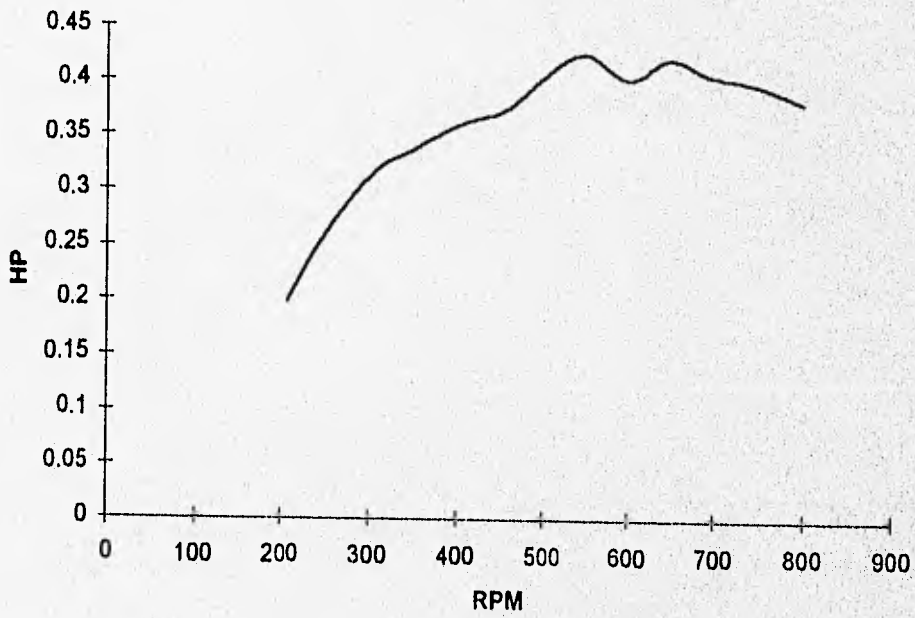




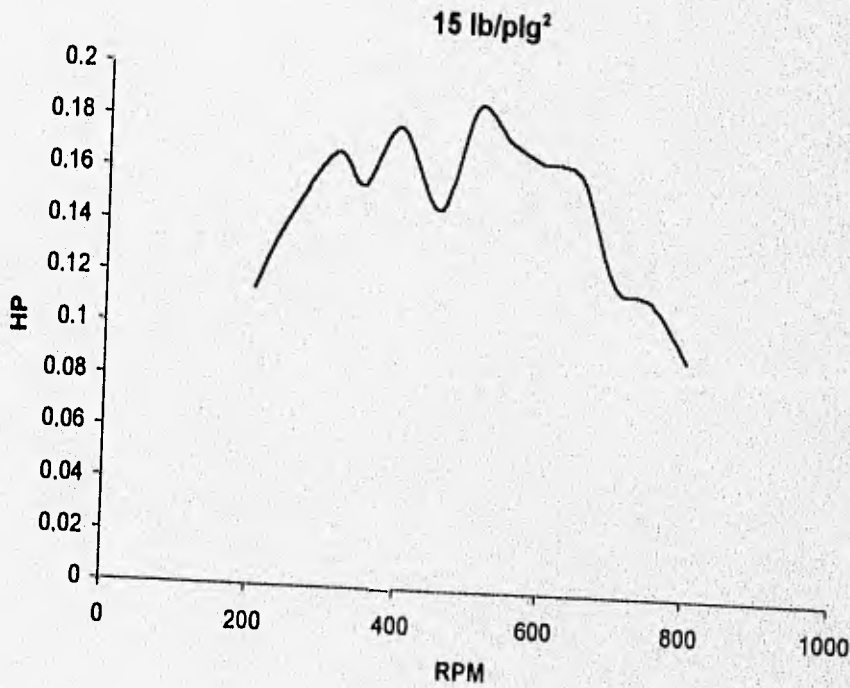
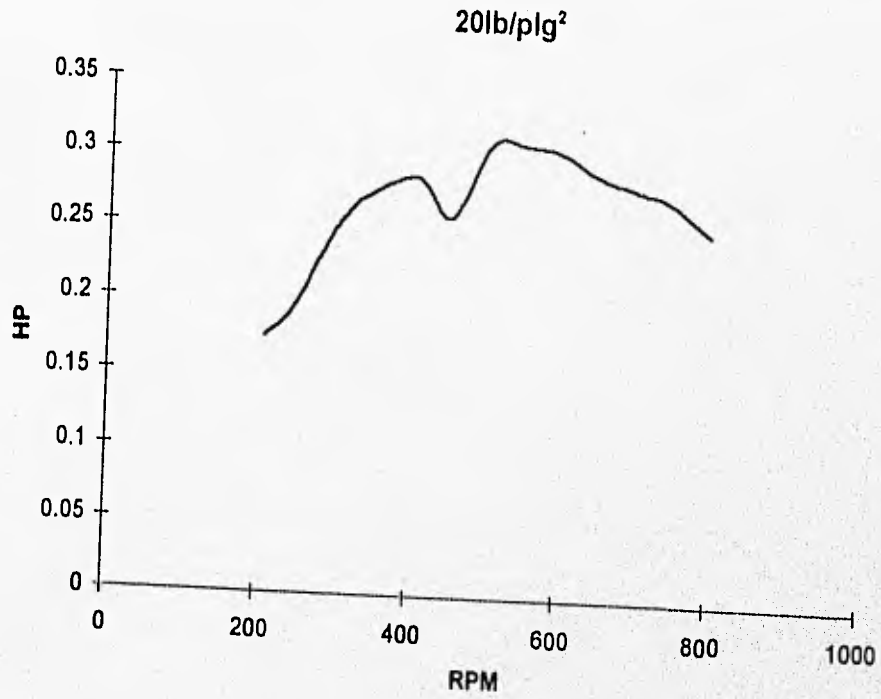
30 lb/plg<sup>2</sup>



25 lb/plg<sup>2</sup>







El vapor generado puede ser aprovechado de muy distintas maneras una de estas puede ser para procesos que requieran energía térmica, la destoxificación de aguas residuales o la generación de energía mecánica para diferentes usos entre muchas otras.

Con los datos de flujo de 0.0166kg/s, temperatura de entrada del agua de 20°C, salida del vapor a 130°C, una radiación solar de 980W/m<sup>2</sup> y un área efectiva de 35M<sup>2</sup>.

Para la producción de vapor la eficiencia esta dada por :

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_v (h_v - h_a)}{G_d A_a}$$

$\dot{m}_v$  = flujo de vapor en kg/s

$h_v$  = entalpía de vapor en kJ/kg

$h_a$  = entalpía del agua en kJ/kg

$G_d$  = radiación solar en kW/m<sup>2</sup>

$A_a$  = área efectiva del concentrador en m<sup>2</sup>

$$\eta_v = 42 \%$$

## GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD

Todo generador debe ser accionado por una fuente de potencia mecánica, generalmente conocida como primotor o máquina motriz del generador. La máquina motriz de un generador puede ser una turbina de vapor, un motor de pistones de vapor o aún un motor diesel.

Un generador sincónico es una máquina sincrónica utilizada como generador, que convierte potencia mecánica en potencia eléctrica; cualquiera que sea la fuente, debe tener la propiedad de mantener casi constante la velocidad a cualquier carga, puesto que de otra forma la frecuencia del sistema de potencia sería errática.

En el generador sincónico o alternador debe de alimentar el devanado del rotor con corriente continua, la cual produce un campo magnético giratorio dentro del generador el cual, a su vez, induce un sistema trifásico de voltajes en los arrollamientos del estator.

Los diagramas fasoriales del generador sincónico se muestran en la figura 19 y correspondiente circuito equivalente en la figura 20

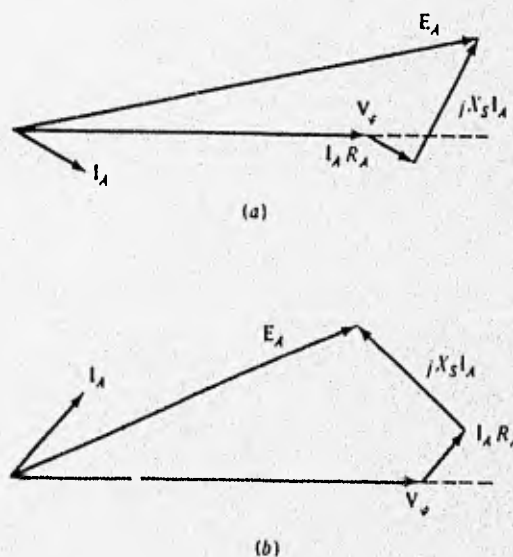


Figura 19  
Diagramas fasoriales del generador sincónico con factores de potencia (a) en atraso y en adelanto (b)

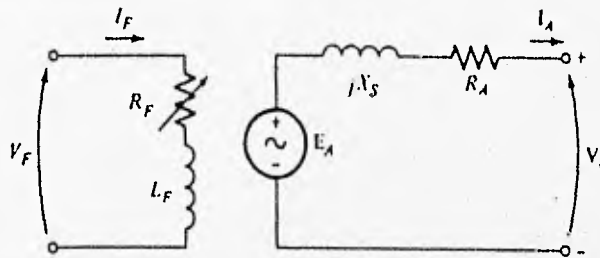


Figura 20  
Circuito equivalente de un motor síncrono por fase.

El circuito equivalente del generador síncrono tiene tres magnitudes que deben ser conocidas para que se pueda describir completamente el comportamiento del generador:

1. La relación entre la corriente de campo y el flujo ( y por lo tanto entre la corriente de campo y  $E_A$ ).
2. La reactancia síncrona.
3. La reactancia de armadura.

Para determinar estos parámetros del generador síncrono, en primera instancia se requiere realizar el ensayo de vacío del generador; para esto se hace girar el generador a velocidad nominal, se desconecta la carga y se reduce a cero la corriente de excitación; luego se va aumentando el voltaje en terminales. En estas condiciones  $I_A = 0$ , de tal manera que  $E_A$  es casi igual a  $V_\phi$ . De esta forma se puede trazar una gráfica de  $E_A$  o  $V_T$  versus  $I_F$ , la cual se conoce como *característica de vacío del generador*.

La segunda etapa consiste en efectuar la prueba de corto circuito; para realizar el ensayo, nuevamente se reduce a cero la corriente de campo y se pone en corto circuito las terminales del generador a través de un juego de amperímetros; luego se mide la corriente de armadura  $I_A$  o corriente de línea  $I_L$ , a medida que se incrementa la corriente de campo; la gráfica derivada del ensayo se conoce como *característica de corto circuito*, y se presentan el la figura 21

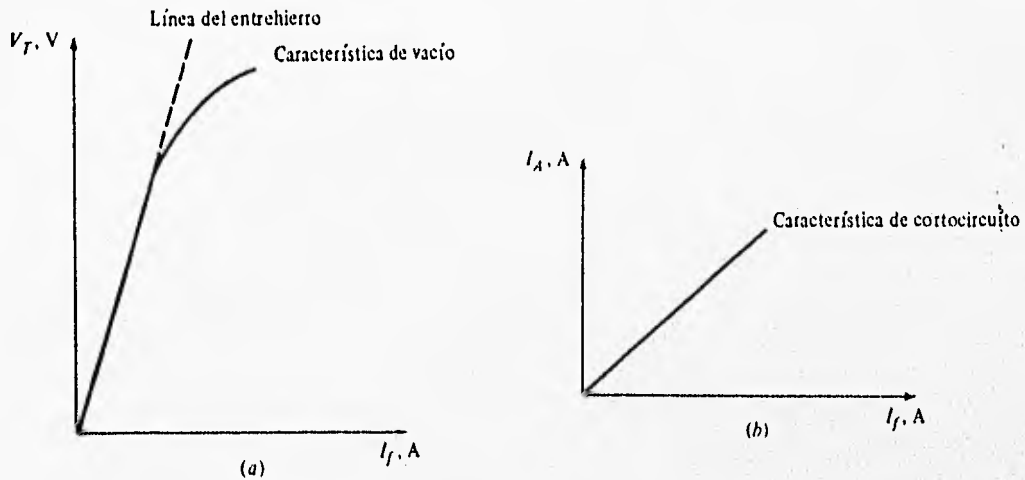


Figura 21

(a) Características de vacío y (b) cortocircuito del generador sincrónico.

En la parte de la generación de energía eléctrica se acopló al motor de pistones un generador siendo este un alternador de automóvil de 50 amp.; una de las razones por las que se utilizó un alternador de automóvil fue el costo del generador además la facilidad de adquisición, así como su fácil manejo.

Para el motor de pistones como se vio anteriormente la velocidad máxima de operación es de 800 rpm., los alternadores de auto trabajan a velocidades mayores por lo que fue necesario aumentar la relación de velocidad angular. Se aumentó mediante dos volantes unidos por una banda, el que está en el motor es de un diámetro de 7 cm. y el de el alternador es de 20 por lo que la relación se aumentó aproximadamente en 3.

El sistema se mantiene estable trabajando 3 horas antes del medio día solar y tres horas después, con un flujo de agua de 1 litro por minuto, una radiación promedio de  $800 \text{ W/m}^2$ .

Se genera mediante los concentradores solares aproximadamente 28 kg/h. de vapor, el motor a una presión de 2 bar y una velocidad de 700 rpm. entrega una potencia de .60 Hp, el generador en estas condiciones entrega una corriente de 3 amp. en promedio según carga y un voltaje de 12 a 14 volts. aproximadamente.

A continuación se muestra una fotografía del sistema motor-generator, el cuál fue instalado para aprovechar el vapor generado por los concentradores.

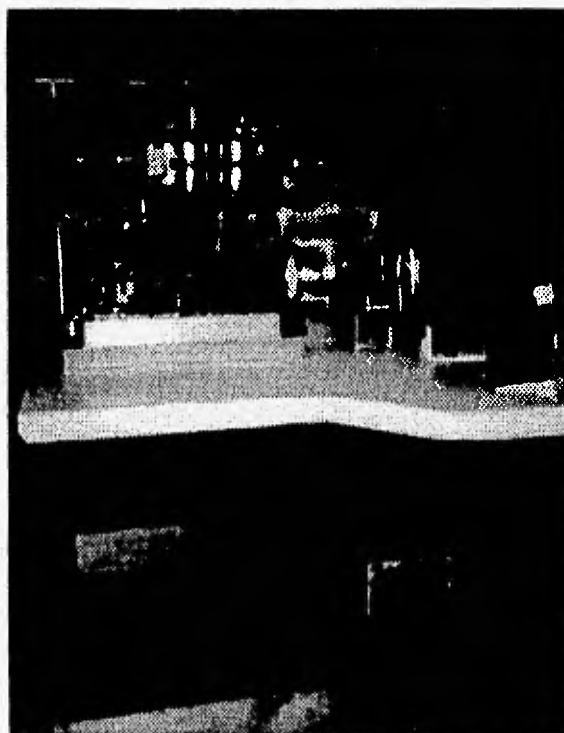


Figura 22  
Sistema Motor Generador

Esta es la primera parte del trabajo de investigación en que se presenta, la forma en la que se generó electricidad, se continuará estudiando la forma más eficiente de generar electricidad, por lo que los resultados obtenidos son preliminares y deben ser tomados con reserva.

## CAPITULO V

### PLANTA TERMOSOLAR

#### RESUMEN

El Instituto de Ingeniería cuenta con una planta de generación de energía eléctrica, mediante concentradores de canal parabólico, generando vapor de manera indirecta utilizando aceite mineral.

Estas instalaciones datan de lo años 80 y duraron mucho tiempo sin operación, por lo que se tuvo que habilitar una parte de ella para poder realizar un modelo a escala de lo que es una planta de generación.

La figura 21 muestra una fotografía del año de 1982 de la planta solar.

Se aislaron dos módulos de concentradores para realizar la generación de manera directa e hicieron las reparaciones y modificaciones necesarias para su operación.

#### ANTECEDENTES

La planta solar se encuentra ubicada en la parte posterior del Jardín Botánico Exterior en Ciudad Universitaria. Dicha planta cuenta con 16 módulos de concentradores con 12 concentradores cada uno de canal parabólico, cuenta además con una torre de almacenamiento de aceite, un evaporador y equipo auxiliar. Los concentradores se encuentran orientados de Este a Oeste. (ver figura 21)

El aceite circulaba a través de los tubos absorbedores de los concentradores solares donde se calentaba, posteriormente pasaba a un evaporador donde se generaba vapor para ser suministrado a un pistón el cual movía un generador, posteriormente a un condensador formando un ciclo Rankine.

La planta Solar permaneció cerrada y sin utilizarse durante varios años, parte del equipo expuesto a la intemperie, los espejos de los concentradores se encontraban muy dañados por la humedad, presentaban el efecto túnel [6] y algunos de los tubos de vidrio que cubren los absorbedores estaban rotos.

### ACONDICIONAMIENTO

Como se desea generar vapor directamente se aislaron dos módulos de la planta para utilizarlos haciendo pasar el agua en los concentradores.

Se instaló una nueva red de tuberías, pues las anteriores manejaban aceite y presentaban oxidación.

Para los propósitos del experimento, se instalaron una bomba, un tinaco de agua y un suavizador. (ver figura 20)

Se retiraron todos los concentradores para su reparación, una vez desmontados, se removía la lámina de aluminio y se despegaba el espejo, posteriormente con la lamina limpia se remachaba a la base de fibra de vidrio y se pegaba el espejo, finalmente se recubrían los bordes del espejo adherible (3M ECP-244) con pintura para protegerlos.

Una vez terminada la reparación los colectores se montan a una base de fierro, la cual permite seguir el movimiento del Sol. Los colectores en dicha base tienen que ajustarse con el sistema seguidor de Sol que le sirve de guía y calibrarse para que el tubo absorbedor quede situado exactamente en el foco de la parábola y con esto se logra disminuir las pérdidas de radiación solar.

Cada módulo de concentradores tiene las dimensiones siguientes : 2.5 metros de apertura y 14m. de largo, con el foco situado a 0.625 m., a su vez cada módulo cuenta con 12 colectores. A continuación se muestra uno en la figura número 22.

Los concentradores cuentan con un sistema seguidor de Sol de la marca Delavan Sun-Tracker al cual se le dio mantenimiento para su operación



El tubo absorbedor está recubierto con película selectiva de cromo negro ( $\alpha=0.95$ ,  $\epsilon=0.13$ ) que se encontraba en buen estado, por lo que solamente requirieron limpieza.

Los tubos de vidrio que cubren al tubo absorbedor, que estaban en mal estado, se cambiaron para obtener una mayor eficiencia, estos tubos son pyrex con un diámetro externo de 6.5 cm.

La planta solar cuenta con un equipo suavizador de agua marca "Clayton" modelo 64-M, con el objeto de eliminar al mínimo las sales de calcio que contenga el agua a enviar a la caldera o a los concentradores solares, y que el vapor generado por éstos no dañe al motor de vapor.

Los valores de dureza que deben manejarse en el agua tratada es de cero grados por galón (menos de 17ppm), estos valores se alcanzan por medio de un tratamiento que consiste en enviar el agua dura a una resina suavizadora, de esta manera se elimina o minimiza la incrustación de las partes metálicas.

El sistema de tuberías es acero galvanizado de 2.54 cm (1") en su mayoría y de 1.27 cm ( $\frac{1}{2}$ "). a la entrada del motor de vapor, la tubería se recubrió con medias cañas de lana mineral como aislante térmico, se instaló un separador y una trampa de vapor para eliminar el condensado de la tubería a la entrada del motor de vapor, dicha trampa es del tipo cubeta invertida.

## EXPERIMENTO

Contando con todas las partes que componen el sistema en buen estado se procedió a integrar cada una de ellas para realizar las pruebas de generación de vapor inicialmente y posteriormente la eléctrica.

El primer paso era generar vapor directamente en los concentradores solares, se requería de conocer el flujo con el cual se generaba vapor con la superficie de captación con la que se contaba ( $70 \text{ m}^2$ ), para tal efecto se utilizó un medidor de flujo, con el que se suministraba la mínima lectura posible que es de 1 lt/min, a una presión de 2 bar, después de estrangular el flujo con la válvula reguladora.

Se logró obtener con éxito la generación de vapor bajo estas condiciones teniendo una radiación solar directa promedio de  $800 \text{ W/m}^2$ .

Uno de los problemas que se presentó al generar vapor fue la deformación del tubo absorbedor, el cual presenta una flexión al introducir agua fría cuando el tubo se encuentra caliente, ocasionando la ruptura del vidrio que lo cubre.

Esto se debe a que se establecen gradientes de  $60^\circ\text{C}$  a  $80^\circ\text{C}$  en el perímetro del tubo, ocasionando esfuerzos térmicos.

Por tal motivo, se cambiaron los tubos de acero por tubos de cobre para eliminar dicho problema.

Una vez superado el problema se integró el sistema motor generador, para aprovechar el vapor en la generación de electricidad.

La planta de energía solar trabaja con un ciclo Rankine abierto, esto se debe a que el motor de vapor trabaja lubricándose con aceite, el cual se mezcla con el vapor lo que dificulta su uso de nuevo, la mezcla de aceite y agua-vapor se desecha por el momento, cabe aclarar que el aceite no se tira, se almacena y se deja que se separe por sí solo para poder ser utilizado de nuevo.

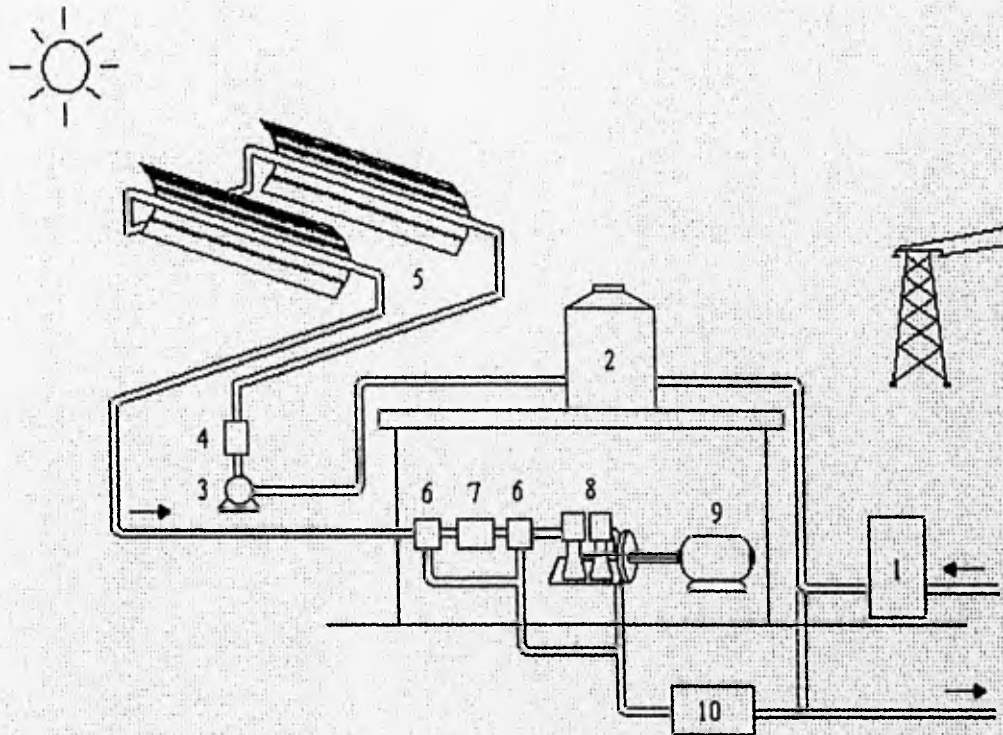
La planta trabaja actualinente de manera continua, si las condiciones del clima lo permiten, tres horas antes del medio día solar y tres posteriores.

Se podría trabajar 4 horas antes y cuatro después, pero en la primera hora y en la última, la generación de vapor es de muy poca y trae consigo muchos problemas de regulación como son mantener la presión constante y la cantidad de agua a la entrada que puede ser evaporada, por lo que la utilización de estas horas no es muy recomendable.

Se genera mediante los concentradores solares aproximadamente 28 kg. de vapor, el motor a una presión de 2 bar, con una velocidad de 700 rpm. el motor da una potencia de .60 Hp, el generador en estas condiciones entrega una corriente de 3 amp. y un voltaje de 12 a 14 volts. aproximadamente.

Se conectó al alternador una batería de automóvil para alimentar el devanado del rotor y para almacenar la energía generada.

Las razones por las que se utilizó un alternador de automóvil para la generación de energía eléctrica fueron: el costo, la facilidad de adquisición y su fácil manejo.



- 1 Suavizador de agua
- 2 Tinaco
- 3 Bomba
- 4 Válvula reguladora
- 5 Campo de colectores

- 6 Trampa de vapor y separador
- 7 Medidor de flujo de vapor
- 8 Motor de vapor
- 9 Generador
- 10 Condensador

Figura 23  
Diagrama de la Planta Solar

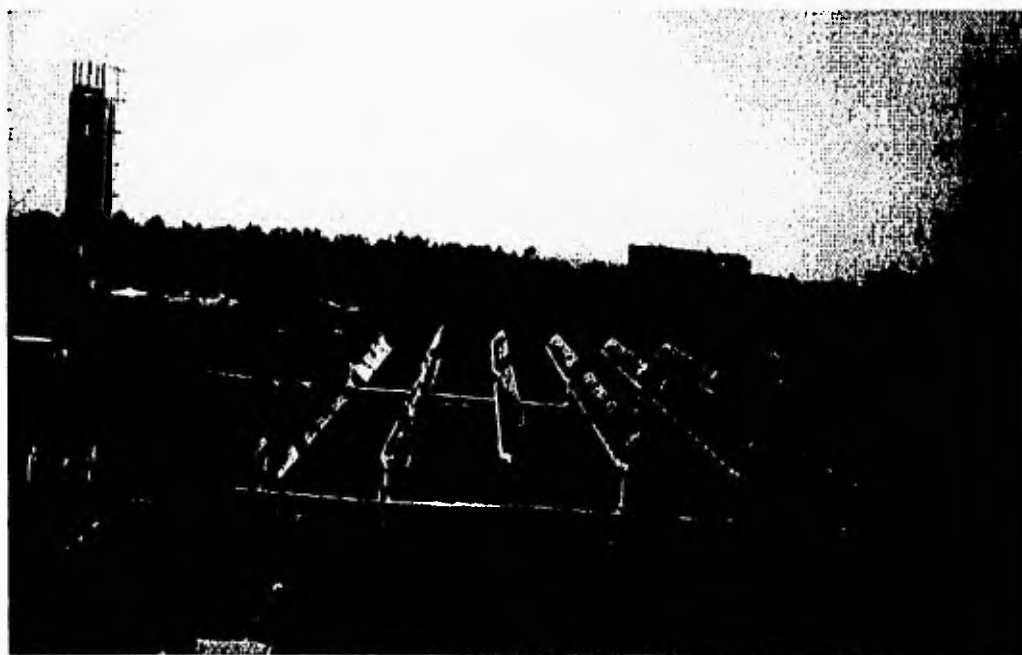


Figura 24  
Planta Solar en 1982

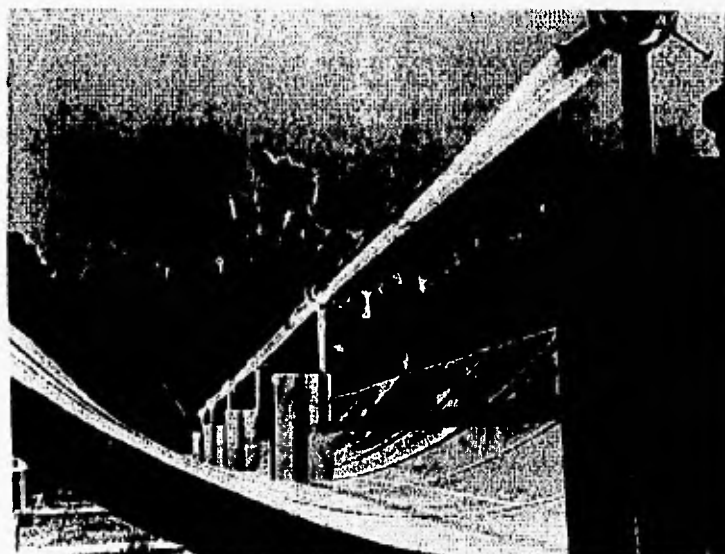


Figura 25  
Concentradores solares

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Fue posible el acondicionamiento de dos módulos de la planta solar, utilizando gran parte de las instalaciones de dichos módulos; se cambiaron partes como tuberías, medidores, espejos, etc. que presentaban daños.

Se obtuvo un valioso conocimiento sobre todas las partes que integran la planta solar, como el cambiar el material reflejante de los concentradores, la forma en que debe ser montado el tubo absorbedor y su cubierta de vidrio, entre muchas otras, así como aspectos técnicos en el manejo del equipo.

La relación entre la radiación solar y la cantidad de agua suministrada a los concentradores, que depende del área de captación, es un factor importante para la generación de vapor, pues de ella depende la calidad del mismo.

La generación de vapor directamente en un concentrador de canal parabólico presentó los siguientes problemas :

1. Al momento de evaporarse el agua se presenta un reflujo por la línea de alimentación, que se soluciona colocando una válvula check entre la bomba de alimentación y el campo de colectores.
2. Después de cierto tiempo, las uniones de los tubos absorbedores presentan fugas, por lo que se recomienda soldarlos para evitarlas.
3. Los materiales como el acero con baja conductividad térmica son susceptibles de esfuerzos térmicos cuando son utilizados en los tubos absorbedores presentándose flexiones, para evitar esto se recomienda utilizar materiales con mayor conductividad térmica como el cobre.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

---

Se logró con éxito la generación de 28 Kg/h de vapor bajo las siguientes condiciones :

☉ **concentradores solares**  
2.5 metros apertura  
14 metros de longitud  
material reflejante ECP-305  
de 3M con reflejancia  
especular de .95  
tubo pyrex de  $\phi = 6.5$  cm

**Temperaturas**  
agua de entrada  $\approx 20^{\circ}\text{C}$

flujo a la entrada 1 lt/min

☉ **Tubo de acero**  
 $\phi = 1$ " nominal  
con cromo negro  
conductividad  
térmica  $52 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

gradiente perimetral  
 $40-60^{\circ}\text{C}$   
flexión de 65 mm

☉ **Bomba**  
2.7 bar (manométrica)

**Radiación solar**  
 $\approx 980 \text{ W/m}^2$  (promedio al medio  
día solar en verano).

vapor de salida  $130^{\circ}\text{C}$

vapor saturado 28 kg/h

☉ **Tubo de cobre**  
 $\phi = 1\frac{1}{4}$ " nominal  
con cromo negro  
conductividad  
térmica  $389 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

gradiente perimetral  
menor de  $10^{\circ}\text{C}$   
flexión menor de 5 mm

Como una forma de aprovechar el vapor generado en los concentradores solares se logró la generación de electricidad mediante un alternador automotriz, generando a un voltaje de 12 a 14 volts con una corriente de 3 amperes aproximadamente según la carga.

Las principales conclusiones son :

La utilización de la energía solar se hace cada vez más accesible conforme pasan los días, es común encontrar con frecuencia cada vez más aplicaciones de ella en nuestra vida cotidiana.

México tiene regiones como la Noroeste, donde la radiación solar promedio durante el año hace posible la instalación de plantas de generación de energía eléctrica de ciclo combinado.

Para tal propósito existen regiones bastante definidas, con más de 450 ly/día en el año: una que abarca Durango, Zacatecas, Aguascalientes, la mayor parte de Guanajuato y el noroeste de Jalisco; otra que comprende parte de Puebla y otra, bastante amplia, que comprende Oaxaca.

Se aprecia que más de la mitad del país recibe 400 ly/día en el año, lo que significa que en México el uso de la energía solar representa una fuente importante de energía para el futuro.

Otro punto muy importante, sino es que el más importante, es que sí es posible la generación de vapor directamente en concentradores de canal parabólico; esto trae consigo otras consideraciones valiosas para tal efecto :

- Las uniones de los tubos absorbedores deben de ir soldadas para evitar las fugas, debido a la expansión y contracción a la que son sometidos los tubos.
- El cambiar los tubos de acero por tubos de cobre en el absorbedor, es fundamental para evitar la flexión y por consiguiente la ruptura de los tubos pyrex que lo cubren.

La generación del vapor directamente trae consigo la eliminación de los aceites minerales o sintéticos y los intercambiadores de calor, por lo que se reducen los costos por generación de vapor, lo que hace más factible la instalación de estos sistemas, principalmente para la generación de electricidad.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

---

Esta es la primera etapa del trabajo por lo que se requiere analizar cada una de las partes para obtener las eficiencias y realizar las posibles mejoras.

Se deben de buscar nuevos materiales mas resistentes, como el material reflejante para los espejos, pues los actuales a las condiciones de intemperie a que son sometidos se deterioran muy rápido.

Para obtener una mayor eficiencia en la conversión de energía térmica a mecánica se debe aumentar la presión y la temperatura, para poder utilizar una turbina de vapor en lugar del motor de vapor, pero para llevar acabo tal fin es necesario incrementar el área de captación de concentradores solares.

Se deben de generar incentivos para la utilización de sistemas solares y promover su uso mediante impuestos favorables, ayudando con esto a hacer más atractivo invertir en ellos.

Para poder competir con otro energético como el petróleo y lograr la aceptación de la energía solar aunque ésta sea de mayor costo, es por medio del impacto ambiental producido, que muestren las bondades de una y desventajas de la otra.

No podemos pasar por alto la gran ventaja que tiene la energía solar sobre otras energías, que tiene un impacto menor al medio ambiente por lo tanto, su uso contribuye a su conservación.

Aumentar el apoyo que se da para el estudio de la energía solar es necesario, pues aún queda mucho por investigar.



## GLOSARIO DE TÉRMINOS

**Absorbedor:** Componente de un dispositivo solar que tiene como función captar y retener la mayor cantidad de radiación solar.

**Absortancia:** Razón de la radiación solar absorbida a la radiación incidente.

**Angulo de aceptación:** Amplitud de la zona angular dentro de la cual la radiación es captada por el absorbedor de un concentrador. Por ejemplo, el valor mínimo de aceptación es del orden de  $1/2^\circ$  y se debe al tamaño finito del Sol, mientras que un colector plano tiene un ángulo de aceptación de  $180^\circ$ .

**Ángulo de borde:** Ángulo formado por el eje de un concentrador (tipo parabólico y una línea imaginaria que va desde su borde al punto focal).

**Area de absorbedor:** Area que recibe la radiación solar concentrada.

**Area de apertura.** Area del captador que intercepta la radiación solar

**Colector solar:** Dispositivo que absorbe la radiación solar y transfiere su energía a un fluido.

**Concentrador:** Dispositivo que concentra la componente directa de la radiación solar sobre un absorbedor.

**Eficiencia óptica de un colector:** Razón de la energía captada por el colector solar a la energía solar incidente sobre el colector.

**Eficiencia óptica de un colector:** Razón de radiación que recibe la apertura de un colector ideal en dirección al sol a la que es eventualmente absorbida por el absorbedor de un colector real que puede no estar dirigido directamente hacia el sol. Esta eficiencia depende de la reflejancia del espejo, transmitancia de la envolvente que pueda existir sobre el absorbedor, absortividad del absorbedor,

**factor de forma del sistema concentrador y del ángulo de incidencia de los rayos concentrados hacia el absorbedor.**

**Eje del concentrador:** Línea que pasa por el foco y su vértice.

**Emitancia:** Razón de radiación emitida por la superficie de un cuerpo a la radiación emitida por un radiador perfecto a la misma temperatura.

**Espejos primera superficie:** Son aquellos en los que la radiación solar es reflejada sin pasar a través del sustrato en el que está soportado el material reflejante.

**Espejos segunda superficie:** Son aquellos en los que la radiación solar tiene que pasar a través del sustrato que soporta al material reflejante para posteriormente ser reflejado.

**Factor de forma:** Razón de la energía (radiación) incidente sobre el absorbedor a la radiación directa incidente sobre el área de apertura del concentrador.

**Helióstato:** Dispositivo que sirve para reflejar la componente directa de la radiación incidente sobre un blanco fijo.

**Langley (ly):** Unidad de medida de la radiación recibida en una superficie plana por día. (  $1 \text{ langley} = 1 \text{ cal/cm}^2 = 4.186 \text{ J/cm}^2$  )

**Película selectiva:** Superficie con alta absorción en la banda de emisión solar y baja emitancia en el intervalo de emisión de un cuerpo negro (o sea una relación  $\alpha/\epsilon$  alta).

**Radiación solar:** Energía radiante recibida del sol en su forma directa y difusa. La componente directa es la que recibe directamente del sol sin haber sufrido ninguna desviación en su trayectoria; la difusa se debe a su dispersión al atravesar la atmósfera y reflexión sobre la tierra.

**Razón de concentración:** Se define como el cociente entre el área de apertura colectora y el área del absorbedor.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

---

**Reflejancia:** Razón de la radiación reflejada de un material a la radiación incidente sobre el mismo.

**Reflejancia especular:** Esta consiste cuando una fracción de la energía entrante incide sobre un espejo con un ángulo de incidencia particular, entonces ésta es reflejada dentro de un cierto ángulo sólido que estará centrado alrededor de un rayo saliente con un ángulo igual al de incidencia respecto de la normal.

**Transmitancia:** Razón de la energía radiante transmitida por un material dado a la energía solar incidente.

## ANEXO

El Instituto de Ingeniería cuenta con un motor de vapor que se adquirió en 1981, y no fue utilizado sino hasta hace un año cuando se utilizó para fines de generación eléctrica en la planta solar.

Ya que no se contaba con los manuales de operación, se intentó conseguirlos con el fabricante, pero este no proporcionó la suficiente información, por lo que tuvo que experimentar con él para conocer sus partes y su funcionamiento.

La máquina es un motor de vapor de dos pistones de doble efecto de 3 hp. de la marca Stuart Swan.

A continuación se muestran los siguientes diagramas que describen las partes del motor de vapor.

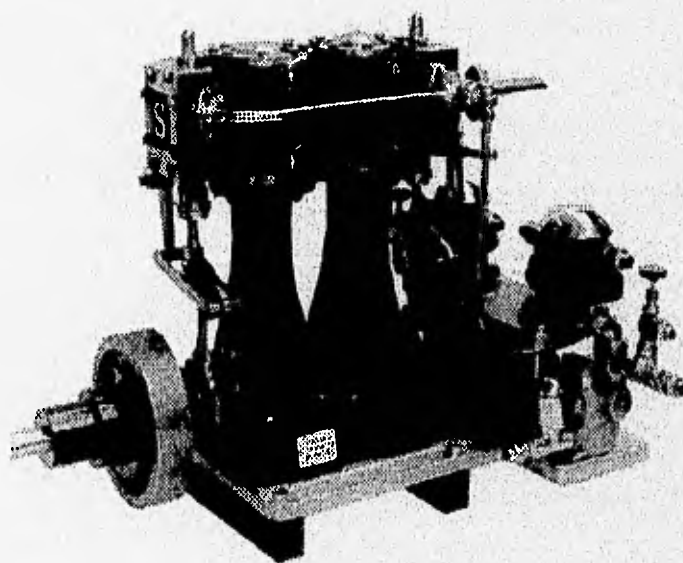


Figura 18  
Motor de vapor



Figura 26  
Vista frontal del motor de vapor

Se recomienda para el uso de estos motores colocar a la entrada un separador de agua y una trampa de vapor, para evitar que el condensado que pudiera formarse en la tuberías dañe las viejas, provocando lo que se conoce como "vuela doblada".

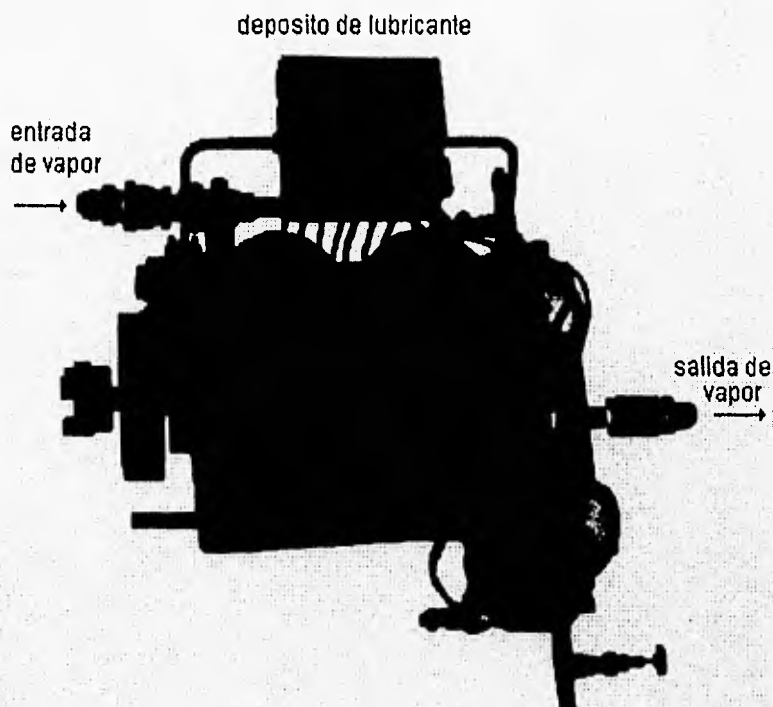


Figura 27  
vista superior del motor de vapor

El motor es lubricado a base de aceite mineral, el aceite que mejor se adaptó a las condiciones del motor fue un aceite grueso del número 40 para motor diesel.

El motor se lubrica de dos maneras, una es mediante una bomba de pistón que introduce una pequeña cantidad de aceite al múltiple de admisión y lubrica la válvula de admisión, escape y las cámaras. La segunda es por gravedad, el motor cuenta con un depósito en la parte superior y mediante una serie de tuberías son lubricadas las partes mecánicas.

A la salida del motor se aprecia que parte del vapor se mezcla con el aceite formando una pasta espesa, parecida a la mayonesa.

El aceite grueso se mezcla menos que el ligero, y rinde más porque al ser la lubricación por gravedad tarda tiempo en fluir sin que esto afecte al motor.

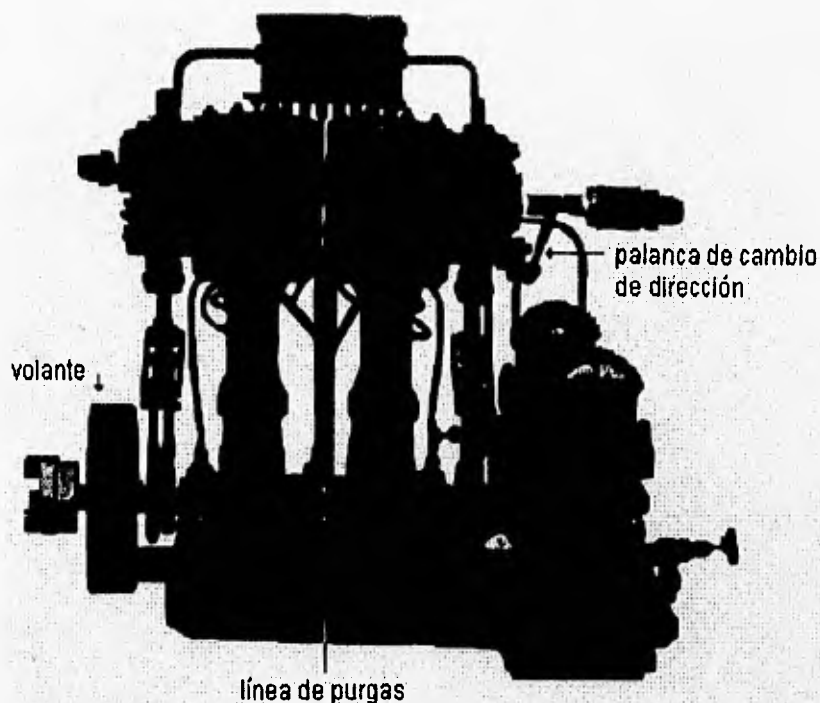


Figura 28  
Vista lateral del motor de vapor

El motor tiene la opción de girar en ambos sentidos mediante una palanca que puede ser movida de derecha a izquierda permitiendo girar en un sentido o en otro.

Cuenta además con 4 líneas de purgas, 2 en la parte superior de la cámara y 2 en la parte inferior, con el objeto de eliminar condensado en el momento del arranque.

Una consideración importante al arrancar el motor es el mantener las purgas abiertas, ya que el motor se encuentra frío y esto provoca que se condense parte del vapor que puede salir sin dañar al motor por medio de dichas purgas. Otra es que en el momento de suministrar el vapor debe ayudarse al motor girándole el volante para iniciar el giro.

## BIBLIOGRAFIA

---

## REFERENCIAS

- [1] ISCCS Parabolic Trough Facilities for Mexico - A pre-feasibility study, Proceedings of the 1995 Annual Conference American Solar Energy Society, Minneapolis, Minesota; David Kearney, Byron Washom, Raymond Dracker
  
- [2] F. Lippke, Direct steam generation in parabolic trough solar power plants : Numerical investigation of the transients and the control of a once-trough system. Journal of Solar Energy Engineering, Febrero 1996, vol 118, pp 9-13.
  
- [3] Raschi, Proposal to install solar thermal power plants as a joint effort by industrial and developing countries, Proceedings ISES Solar World Congress Budapest Vol. 4, 1993, pp 434-440.
  
- [4] Staiss, H. Klaiss, J. Nitsch y C. J. Winter, Solar thermal power plants for the mediterranean region: a concept for an EC CO<sub>2</sub> reduction strategy, Proceedings ISES Solar World Congress Budapest Vol. 4, 1993, pp 441-446.
  
- [5] Almanza R, Muñoz F. (1994) Ingeniería de la Energía Solar, El Colegio Nacional, México D.F., México.

## BIBLIOGRAFÍA

Almanza R., Díaz A., González A. and López S. (1977) 1 KW solar pump system, Concentrating Solar Collectors Conference, Vol 8, Georgia Institute of Thechnology, USA, pp.47-53.

Almanza R. and Mora J.L. (1980) Theoretical behaviour during the day and the year of a solar system using cylindrical parabolic collector, Systèmes Solares Thermodynamiques, pp.213-219, Editions CNRS, France.



## BIBLIOGRAFIA

ESTA TESIS NO DEBE  
VALER DE LA BIBLIOTECA

Almanza R., Muñoz F., Valdés A. Barrera E. and Montes E (1981) Recent developments in solar power generator, In Proceedings of ISES Solar World Forum, Hall D.O. and Morton J. (Eds), pp. 2926-2930, Brighton, UK.

ASHRAE Handbook. (1983) Equipment. USA. pp.34.3.

Carden P.O. and Basal P.K. (1992) Optimization of steam-based energy transport in distributed solar systems, Solar Energy Vol. 49 No. 6 pp.451-461.

Chapman Stephen J. Máquinas Eléctricas, México 1988, Mc. Graw Hill, pp 375-411.

Cohen G. and Kearney D. (1994 ) Improved parabolic trough solar electric systems based on the SEGS experience, Proceedings of the 1994 Annual Conference, American Solar Energy Society, pp. 147-150.

Francia G. (1968) Pilot plants of solar steam generation stations, Solar Energy, Vol. 12, pp.51.

Lippke F. (1996) Direct steam generation in parabolic trough solar power plants: numerical control of a once-trough system. Journal of Solar Energy Engineering 118, pp.9-14

Mandal NK and Mandal T. (1994) Analysis of a steam- generating system using a linear solar concentrator, Energy, Vol. 14, No 9, pp. 999-1003.

Müller M. (1991) Test loop for research on direct steam generation in parabolic trough power plants, Solar Energy Materials; Vol. 24, No 1-4, pp.222-230.

Müller M., Lippke F. and Ratzesberger R. (1993) Direct steam generation in parabolic-trough solar power plants- A resume on issues learned and an outlook on the next steps. In Proceedings of ISES Solar World Congress. Farkes I. (Ed.) pp.203-208, Budapest, Hungary.

Pederson R. J. and May E. K. (1982) Flow instability during direct steam generation in a line-focus solar collector system. Technical Report SERI/ TR-632-1354, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Co.

Pytlinski J.T. (1978) Solar energy installations for pumping irrigation water, Solar Energy, Vol 21, No. 4, pp.255-262.

## BIBLIOGRAFIA

---

Rabl A., Bendt P. and Gaul H. W. (1982) Optimization of parabolic trough solar collectors, *Solar Energy*, Vol. 29, No 5, pp.407-417.

Ray R. (1981) Nonlinear dynamic model of a solar steam generator, *Solar Energy*, Vol. 26, No 4, pp. 297-306.

Rib. D. M. (1995) Environmental aspects of SEGS solar power plants, *Proceedings of the 1995 Annual Conference American Solar Energy Conference*, pp.151-158.

Schissel P., Jurgensen G., Kennedy C. and Goggin R. (1994) Silvered-PMMA reflectors, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 33, pp.183-197.

Trieb F. (1995) *Solar Electricity Generation*, DLR Institut für Technische Thermodynamik, Germany.

Wolf R (1993) Proposal to install solar thermal power plants as a joint effort by industrial and developing countries, *Proceedings ISES Solar World Congress, Budapest*, Vol. 4, pp.434-440.

## AGRADECIMIENTOS

---

## AGRADECIMIENTOS

A la UNAM, al Instituto de Ingeniería, al Programa Universitario de Energía, al Dr. Rafael Almanza, al M en I Filiberto Gutiérrez, a Seferino Figueroa, a Gustavo Jimenez por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo.