

01178



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EFICIENCIAS EN LA GENERACIÓN DIRECTA DE
VAPOR Y ELECTRICIDAD EN UNA PLANTA
TERMO-SOLAR**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

(ENERGÉTICA)

PRESENTA:

ÁLVARO EDUARDO LENTZ HERRERA

DIRECTOR DE TESIS: RAFAEL ALMANZA SALGADO

274378



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.

Dedicado a las personas que más quiero, mis padres, Gladys y Federico y a mi hermano Federico, por su gran amor. y apoyo en todo momento.

A Lorena por ser parte importante en mi vida, por su amor y amistad

A mis amigos: Alejandro, Héctor y Andrés, cuyo apoyo y amistad incondicional siempre agradeceré

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Rafael Almanza por su atención y paciencia, al ingeniero Filiberto Gutiérrez por sus valiosos consejos y ayuda en el desarrollo de este trabajo.

A mis amigos del Instituto de Ingeniería: Iván Martínez, Ceferino Figueroa, Genaro Correa, Gerardo Silva, Leticia Ozawa, y Vicente Flores les agradezco su amistad, su valiosa ayuda y el apoyo en el desarrollo de este trabajo, .

Agradezco a la UNAM, al Instituto de Ingeniería, al Programa Universitario de Energía, . a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico y a la Comisión Federal de Electricidad que de alguna manera estuvieron involucradas en la realización de este trabajo de tesis.

También doy las gracias a los miembros del jurado que tuvieron a bien revisar este trabajo escrito, cuyas sugerencias y aportaciones fueron muy valiosas para mejorar su contenido y estilo.

ÍNDICE

	Introducción	i
I	Antecedentes	1
II	Marco Teórico	7
III	Descripción del Equipo (Planta Solar)	29
IV	Desarrollo del Experimento	38
V	Análisis de resultados,	50
VI	Conclusiones y Comentarios	56
	Referencias	59



INTRODUCCIÓN

Hablar de la utilización de la energía solar puede sonar futurista o fantástico, pero si observamos que la mayoría de las energías que utilizamos tienen su origen en la energía solar, es de tomarse en cuenta que es una realidad con la que se vive todos los días.

La madera, el carbón y los productos derivados del petróleo, todos ellos tienen su origen en la energía solar, incluso, las caídas de agua deben su existir a la energía solar; en el ciclo del agua, la evaporación depende indudablemente de los efectos de la radiación solar.

La contaminación ambiental es uno de los problemas que actualmente sufre el mundo, producto de un desmedido crecimiento de la población, la cual requiere de bienes y servicios, y muy en especial de recursos energéticos para sus hogares, la industria, el transporte y todo aquello relacionado con su manera de vivir.

En una predicción hecha al comienzo de la década de los noventa por el departamento de Energía de los Estados Unidos se esperaba un incremento mundial de 600 GWe antes del fin de siglo. (IEA, 1994)

La Agencia Internacional de Energía informó en su "World Energy Outlook" (International Energy Agency, IEA, 1994) que se había registrado un incremento anual del 2.1 % en la demanda global de energía por encima de la media, y que dicha demanda se satisface predominantemente, con combustibles fósiles (aproximadamente el 90%).

La ausencia de nuevas fuentes de energía se debe a políticas gubernamentales que no modifican los patrones de consumo así como a los intereses de las grandes industrias relacionadas con la producción de energía.

Para el año 2010 los países del mundo consumirán un 48 % más de lo que se consumía en 1991, 11,580 millones de toneladas equivalentes (MTOE) de petróleo en comparación con 7,854 MTOE en 1991; las emisiones de CO₂ serán un 28 % mayores que los niveles registrados en 1990. (IEA, 1994)

Se tiene conciencia de que los problemas ambientales asociados con la generación de energía y su uso han aumentado dramáticamente en las últimas décadas, por lo que las tecnologías renovables ofrecerán soluciones con un menor impacto ambiental; por ejemplo, en las plantas híbridas gas natural / solar, la reducción en el impacto ambiental es grande.

Para tener una idea sobre la variación futura de la producción de petróleo, es oportuno hacer referencia a una técnica publicada por M. King Hubbert, (Scientific American, 1998) él observó que en una región, la extracción de una fuente finita alcanzaba el máximo hasta que la mitad de los recursos habían sido sustraídos; para corroborar esto, tomó las estadísticas de producción de crudo de los EE.UU del año de 1948 y estableció que crecería por trece años llegando a la cresta en 1969, lo cual se verificó, con un año de diferencia, en 1970; en otras regiones del mundo, se observó el mismo comportamiento de las curvas de Hubbert.

Estos estudios revelan que gran parte de los productores podrían alcanzar dicha cresta al fin del milenio a menos que bruscamente reduzcan su producción, por lo que podría presentarse una recesión en la producción convencional de petróleo en la primera década del siglo 21; los consumidores, a nivel mundial, podrían de esta manera ver incrementados los precios del crudo.

Nuestra sociedad no está preparada para caminar sin petróleo, pero debe darse cuenta que está cerca el fin del petróleo abundante y barato del cual todas nuestras industrias dependen.

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

Existen varios métodos por los cuales la energía solar puede ser utilizada para la generación de energía eléctrica como son el sistema fotovoltaico y el sistema termosolar; dentro de éste último hay tres tecnologías con las cuales se ha logrado, exitosamente, la generación de energía eléctrica y son:

- ◆ Sistema de torre central
- ◆ Plato parabólico
- ◆ Concentradores de canal parabólico

Para la generación termosolar de electricidad se requiere obtener altas temperaturas mediante la concentración de la irradiancia solar, y utilizar un fluido para transferir el calor, como aceite, agua, vapor, gas o aire.

Los últimos pasos en la generación termosolar de energía eléctrica son similares a los utilizados en la generación convencional con combustibles fósiles o fuentes nucleares; los sistemas de conversión de energía dependen del uso del vapor para hacer girar las turbinas o motores de pistones de vapor que impulsan a los generadores eléctricos.

La diferencia entre los sistemas convencionales y el proceso termosolar es la fuente de energía; usando combustibles fósiles, el vapor es producido por la combustión; con la energía nuclear es producido por la fisión nuclear; en el caso de la generación termosolar el vapor es producido por la concentración de la irradiancia directa del Sol.

El potencial de generación termosolar en una región depende de varios factores como son:

- La irradiación directa; se requieren sitios donde la irradiación directa sea igual o mayor a los 1900 kWh/m² anualmente.
- Superficies de terreno disponibles: tierras de bajo costo, pues se requiere de grandes extensiones de terreno, además si es posible cerca de algún camino o infraestructura que minimice el costo de construcción.
- Una estructura de consumo eléctrico; el diseño de una planta está íntimamente relacionado con los perfiles de demanda eléctricos; un perfil de demanda ideal es cuando el pico de demanda está compensado por el pico de insolación de varias horas, no obstante, algún almacenamiento térmico es deseable, o la generación híbrida por medio de ciclo termosolar combinado con gas natural.
- Contexto económico financiero; es un hecho que la actual estructura de precios de la energía eléctrica no refleja los costos externos de generación, por lo que los costos de generación termosolar no son directamente competitivos; sin embargo, si se toma en cuenta el concepto de externalidades, los precios son más competitivos; así mismo el financiamiento puede ser ayudado con mecanismos que otorguen beneficios fiscales.

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, etc.

El uso de plantas solares para la generación de electricidad en regiones geográficas con alta insolación constituye una opción promisoriosa y cuenta con numerosas ventajas desde el punto de vista ambiental, además la diversificación en el abastecimiento de energía es una estrategia altamente recomendable al momento de desarrollar una política energética específica.

El mayor obstáculo al que se enfrenta la electricidad solar es el elevado costo de inversión de las plantas y que su generación depende de las variaciones climáticas, determinadas por el número de días soleados, por lo que las instalaciones están impedidas de suministrar energía en la punta o la base de la curva de carga; sin embargo, existen unas variantes que pueden ayudar a solucionar este problema, una de ellas es la integración de un respaldo de generación con Ciclo Combinado (turbina de gas + turbina de vapor), empleando gas natural como combustible; esto permite compensar las fluctuaciones de energía radiante a lo largo del día y hace posible la operación en horas nocturnas.

La segunda solución es integrar sistemas de almacenamiento de energía que permitan incrementar el número de horas diarias de operación, así como compensar algunas pequeñas fluctuaciones en el suministro de irradiancia solar.

La búsqueda de oportunidades y la necesidad hacen a México un 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.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se tiene experiencia en la generación de vapor desde 1976 utilizando concentradores solares tipo canal parabólico; en 1981 se terminó la construcción de una planta termosolar que operó con aceite.

El presente 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.

En los últimos 10 años la generación directa de vapor (GDV) con concentradores solares de canal parabólico ha tenido un interesante programa de investigación llevado a cabo por diferentes grupos en el mundo; las ventajas de la GDV permiten la eliminación de los aceites y los intercambiadores de calor, además existe un mayor límite para la temperatura de transferencia de calor (mayor de 400°C), no como en los aceites (menor de 400°C), incrementándose la eficiencia del sistema.

A partir del año de 1994 se iniciaron los trabajos de acondicionamiento de la Planta Solar para la GDV comenzando con un módulo en el cual se utilizó tubo de acero y espejo de plata. En este intento se presentó la flexión o pandeo del tubo absorbedor que rompió el envoltorio de vidrio (Almanza , Lentz 1996).

Este trabajo es la continuación de la tesis de licenciatura del autor; ahora se abordan aspectos referentes a la GDV en cuatro módulos con concentradores de canal parabólico. Se estudia la eficiencia global del sistema en cuanto a la conversión de energía solar-electricidad. Además se determina la eficiencia de los principales componentes de la planta, como son, el generador de vapor solar, el motor de pistones de vapor y el alternador eléctrico.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Plataforma Solar de Almería

En los últimos 20 años la generación de electricidad por medios termosolares ha sido desarrollada a diferentes escalas (de algunos kilowatts a varios megawatts). Tres tipos de plantas con procesos térmicos han sido los más populares: canal parabólico, paraboloides y torre central.

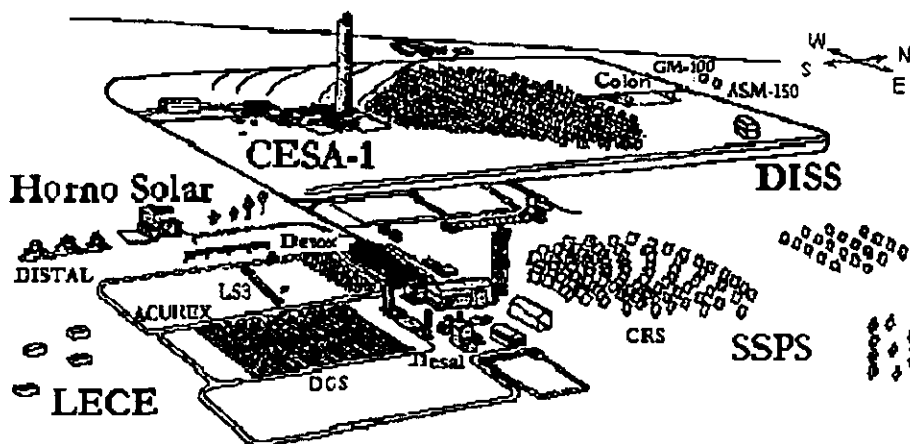


Figura 1.1, Instalaciones de la Plataforma Solar de Almería

En el mundo se han hecho grandes desarrollos. Entre los principales podemos mencionar los realizados en la Plataforma Solar de Almería (PSA) localizada en España; ésta es la más grande instalación de su tipo en Europa y la más versátil, con más de 19 años de experiencia en la prueba y desarrollo de plantas solares de potencia (figura 1.1). (IEA, 1994)

En sus instalaciones se cuenta con:

- Un sistema de torre central con 300 helióstatos y 7 MW de calor de entrada y cuatro plataformas de prueba.
- Una torre central de 90 helióstatos y 4 MW de calor de entrada.
- Instalaciones de alta concentración con tres platos parabólicos, cada uno de 44m².
- Una planta de prueba de canal parabólico, con diferentes colectores, para investigación en el área de control, química solar y generación directa de vapor.

1.2 Laboratorios Sandia

Otros esfuerzos son los hechos en Estados Unidos por los Laboratorios Nacionales Sandia (SNL) localizados en Albuquerque Nuevo México; es la mayor instalación para prueba de componentes y sistemas termosolares, construida en la década de los setenta para probar sistemas de receptor central y se ha ido expandiendo. Actualmente cuenta con los siguientes sistemas.

- Sistema de torre central, con un campo de 200 helióstatos y una torre de 60 metros con cuatro estaciones de prueba.
- Plato parabólico, sistemas de 25 kWe con motor Stirling.
- Sistema de canal parabólico, una plataforma móvil que maneja fluidos de alta temperatura y que es operada en colaboración con la Compañía Kramer Junction en las plantas Solar Electric Generation System (SEGS). (IEA, 1994)

1.3 Kramer Junction

En la Unión Americana también, la empresa Kramer Junction Companies (KJC) instaló en el desierto de Mojave en el sureste del estado de California, el primer sistema

termosolar comercial en el mundo; los concentradores de canal parabólico tienen aquí su mayor instalación con 354 MWe. (IEA, 1994)

KJC opera un sistema de 14 megawatts, seis sistemas de 30 megawatts y dos de 80 megawatts de generación conocidos por sus siglas en inglés "Solar Electric Generation System (SEGS) dando un total de 354 megawatt instalados; estos sistemas fueron instalados de 1984 a 1990 por la Compañía International Luz Limited y representan a 3 generaciones de colectores denominados LS, (Luz System) y han trabajado exitosamente por más de una década; estas plantas utilizan un aceite sintético (óxido de bifenil-difenil) para transportar el calor generado en los concentradores de canal parabólico, a una temperatura de 390°C, y enviarlo a uno o dos intercambiadores de calor para obtener vapor saturado o sobrecalentado. Otro sistema convierte la energía térmica en electricidad y rechaza el calor de desecho; en estas instalaciones se ha producido más del 90% de la energía comercial mediante sistemas termosolares.

1.4 Consorcio Edison

En 1991 se formó un consorcio encabezado por Southern California Edison (SCE) para convertir "Solar One", una planta de 10 Mwe situada en Barstow California, en "Solar Two". Esta última consta de una torre central, un depósito con sales fundidas y un intercambiador de calor. Este sistema puede suministrar energía en horas en donde la irradiancia es baja. (IEA, 1994)

1.5 THESEUS

En 1998 se inició la construcción de THESEUS, de las siglas THERmal Solar EUropean Power Station, una planta de 50 MWe con 297,570 m² de canal parabólico ubicada en la isla de Creta en Grecia. Operará bajo un ciclo Rankine convencional con turbina de vapor y cuenta con un generador de vapor a base de combustible como respaldo; puede

operar sólo con el campo solar o con ambos. Es la primera instalación de su tipo en Europa. Dicho sistema lo construye la compañía Pilkington de Alemania. (Pilkington, 1998)

1.6 UNAM, Instituto de Ingeniería

En 1976 el Instituto de Ingeniería de la UNAM comenzó un programa para estudiar el concentrador de canal parabólico, el cual consistió en un canal de 6 metros de largo por 2 metros de apertura; en esa época el vapor fue generado directamente en el absorbedor y enviado a un motor de pistones de vapor de 125 W. (marca Stuart Sirius); la eficiencia solar-mecánica fue de alrededor del 2%, con una irradiancia de 700W/m^2 ; operaba aproximadamente 4 horas por día. (Almanza, 1994)

Después de esto, se construyó la Planta Solar del Instituto de Ingeniería con 580 m^2 de concentradores, ubicada en la parte posterior del Jardín Botánico Exterior en Ciudad Universitaria; dicha planta contaba con 16 módulos de concentradores de canal parabólico orientados de Este a Oeste, además contaba con un depósito de almacenamiento de aceite, un evaporador y equipo auxiliar; el aceite (Therm G. L 450 Esso) circulaba a través de los tubos absorbedores de los concentradores solares, y mediante un intercambiador de calor se producía vapor de manera indirecta; después se enviaba el vapor a un motor de pistón que estaba acoplado a un generador eléctrico, formando un ciclo Rankine (Almanza, 1994).

En 1995 se comenzó con la GDV en la planta solar del Instituto de Ingeniería; fue en este período cuando se presentó la flexión del tubo absorbedor y se iniciaron los estudios de dicha flexión (Almanza, 1997).

Los antecedentes de la GDV previos a 1997, se comentan a continuación.

En 1982 Pederson y May, iniciaron estudios teóricos relativos a la estabilidad de flujos en GDV; Müller en 1991, Mandal en 1994 y Lippke en 1996 hicieron estudios teóricos relativos a la producción de vapor en absorbedores lineales, siendo el principal problema la distribución no uniforme del calor en la circunferencia del tubo absorbedor, que presenta un flujo en dos fases; esto provoca a su vez esfuerzos térmicos en el tubo que lo hacen flexionarse. Finalmente este fenómeno ha sido estudiado experimentalmente en campo por Almanza desde 1995 (Lentz, 1995). Dicha flexión puede ser de 0.065 m. o mayor cuando la radiación directa sobre el concentrador es aproximadamente de 980 W/m² con un flujo del orden de 1 lit/min; esta flexión provocó la ruptura de los tubos de vidrio que cubren el absorbedor; el tubo que se utilizó fue de acero, con diámetro nominal de 0.254 m, con un largo de 14.5 m, y se encuentra sujeto por cinco soportes que están colocados cada 2.9 m.

El agua fría era introducida en el absorbedor de acero ya caliente que contenía aire en su interior; en cada una de las secciones comprendida entre los soportes se presentó la flexión en la parte media, comenzando en la sección en donde se suministró el agua, avanzando a las siguientes hasta alcanzar la salida, como si fuese una onda.

El caso más crítico para un tubo horizontal que presenta flujo en dos fases ocurre cuando dicho flujo es estratificado. Bajo estas condiciones los esfuerzos térmicos serán más grandes; la estratificación ocurrirá cuando la velocidad del fluido sea muy baja. Este fue el caso de los tubos del absorbedor de acero estudiados.

Para corregir este fenómeno se cambiaron los tubos absorbedores de acero por tubos de cobre, que tiene una conductividad térmica 7 veces mayor que el acero, por lo que la flexión se redujo a unos cuantos milímetros debido a la mejor conducción de calor, evitándose prácticamente los gradientes térmicos. Este sistema trabajó en un principio con un solo módulo, con tubo de acero; posteriormente operó con un tubo de cobre y debido a los buenos resultados en la reducción de la flexión, se habilitó otro módulo, quedando en serie un módulo con tubo de cobre y un módulo con tubo de acero para estudiar su comportamiento y aumentar la capacidad.

Se vió que dos módulos eran insuficientes para generar vapor, por lo que fue necesario aumentar la capacidad y se añadieron otros dos más, para sumar un total de cuatro, que es la configuración actual de la planta termosolar.

La figura 1.2 muestra una fotografía la planta solar del año de 1982.



Figura. 1.2, Planta Solar

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 La radiación solar

La radiación solar se compone de ondas electromagnéticas provenientes del Sol, el cual puede considerarse como un cuerpo negro, emitiendo a una temperatura de 5 762 K y como tal, es la temperatura teórica que debería alcanzarse en la superficie de la Tierra; sin embargo, la temperatura máxima lograda mediante el uso de concentradores es de alrededor de 3800 K.

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, conocida más como irradiancia, que incide sobre una placa plana en el exterior de la atmósfera; el valor más aceptado es de 1.367 KW/m^2 ($4.9 \times 10^3 \text{ KJ/m}^2\text{h}$) y se le conoce como constante solar.

Dentro de la atmósfera la irradiancia solar es reflejada, dispersada y absorbida por los componentes usuales de ésta, tales como O_2 , CO_2 , O_3 , N_2 , H_2O y partículas suspendidas de polvo. La irradiancia solar que sufre estos efectos es la que tiene una longitud de onda entre 0.29 y 2.5 μm , casi toda la radiación fuera de este intervalo es dispersada y absorbida de inmediato; la irradiancia de onda corta (ultravioleta) se absorbe principalmente por O_3 mientras que la irradiancia de onda larga se absorbe por vapor de agua. La irradiancia reflejada y la dispersa se convierte en irradiancia difusa, mientras que la que continúa su camino a través de la atmósfera es la irradiancia directa.

2.2 Concentradores solares

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, se llaman concentradores; ellos reciben el flujo solar a través de su área de apertura. La concentración de la radiación solar se logra mediante dispositivos ópticos que reflejan la irradiancia solar, sobre un absorbedor cuya área es mucho menor que la de apertura.

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

Los concentradores son dispositivos en los que se obtiene alta densidad de energía (irradiancia concentrada) sobre un absorbedor, el cual en su superficie alcanza temperaturas mayores de 200°C, pudiéndose llegar hasta 3800°C. Para lograr altas concentraciones que permitan obtener elevadas temperaturas (arriba de 1000°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 un mecanismo seguidor.

2.3 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 y 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 mejora su respuesta, 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.

2.4 Principales desventajas de los concentradores:

1.- Trabajan sólo con la componente directa de la irradiancia 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°C; la eficiencia de Carnot de una máquina térmica que opere entre 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°C, mismas que pueden lograrse con captadores de enfoque (concentradores), la eficiencia de Carnot se incrementa al doble.

2.5 Tecnologías termosolares

La generación termosolar de electricidad implica la obtención de altas temperaturas mediante la concentración de la irradiancia solar. En estos sistemas se requiere de un fluido intermediario o de transferencia como pueden ser aceite, agua o gas, para transformar la energía térmica en mecánica y posteriormente en eléctrica.

La generación de energía eléctrica por medios termosolares es similar a la generación convencional por combustibles fósiles o fuentes nucleares; los sistemas de conversión de energía dependen del uso del vapor de agua o de un gas para hacer girar la turbina o un motor Stirling, acoplado a un generador eléctrico.

La diferencia entre los métodos convencionales y la generación termosolar es, sin duda, la fuente de energía con la cual se genera el calor; en el caso de la generación termosolar, el vapor es producido por la concentración de la irradiancia directa del Sol.

Los tres principales sistemas termosolares con los cuales se ha logrado la generación de energía eléctrica son:

- ◆ Sistema de torre central
- ◆ Plato parabólico
- ◆ Concentradores de canal parabólico

2.5.1 Sistema de torre central

Consiste en un conjunto de helióstatos (sistema de espejos con movimiento programado) que reflejan la irradiancia solar directa hacia una torre central. Hay un absorbedor colocado en la parte alta de la torre donde se alcanzan altas temperaturas; los helióstatos se encuentran colocados a un lado de la torre y van siguiendo el movimiento del Sol para reflejarlo al absorbedor de la torre.

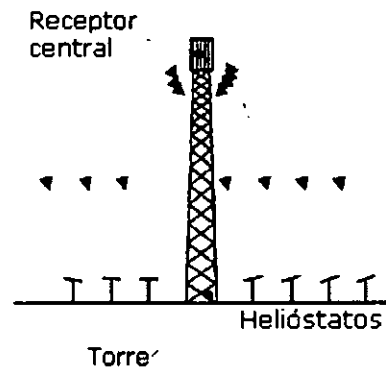


Figura 2.1, Torre central

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 instalar gran cantidad de tuberías (cubriendo grandes distancias; para transporte del fluido de trabajo), reduciendo así las pérdidas de calor; el mayor costo 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/m² de flujo de energía solar y transferir el calor con un mínimo de pérdidas.

Plato parabólico

El plato parabólico o paraboloide de revolución, como también es conocido, es una superficie producida al girar una parábola alrededor de su eje; este tipo de concentradores puede alcanzar concentraciones de 500 a 3600. Debido al tamaño finito del Sol y a imperfecciones en la construcción de los espejos, el foco en sistemas de este tipo no es puntual; las temperaturas que se han logrado alcanzar van desde los 500°C hasta los 2000°C.

Debido a que el área del absorbedor es reducida, las pérdidas térmicas son pequeñas y principalmente radiativas; 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.

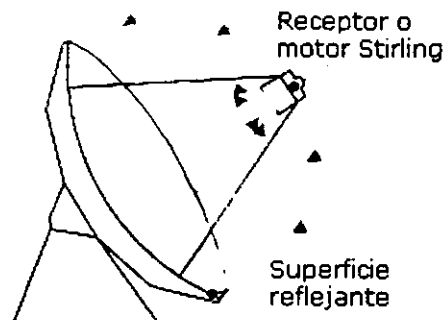


Figura 2.2, Plato parabólico

El absorbedor recibe la energía radiante y la convierte en energía térmica. Esta energía puede ser utilizada directamente como calor o para la generación de electricidad mediante un motor Stirling por ejemplo; la energía calórica puede también ser transportada a un generador de vapor para su aprovechamiento.

2.5.3 Concentradores de canal parabólico

El concentrador de canal parabólico es una parábola extendida formando un canal y como tal tiene las propiedades de una parábola, de reflejar los rayos que llegan en dirección paralela a su eje, al foco en donde se coloca el absorbedor. Una parábola en el plano X-Y es el conjunto de los puntos (x,y) que equidistan de una recta fija directriz y de un punto fijo (foco) que está fuera de dicha recta.

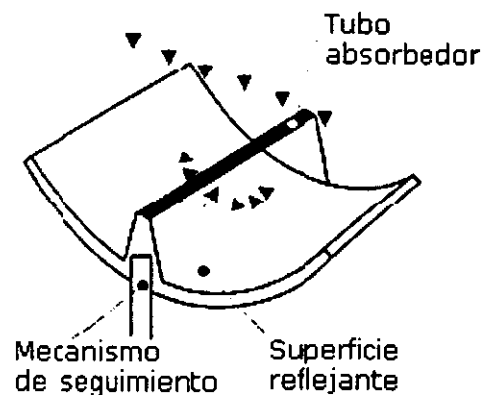


Figura 2.3, Canal parabólico

La ecuación de la parábola es $y^2=4px$ ($p>0$) y la curva correspondiente se ha graficado en la figura 2.4a junto con un rayo de luz que viaja hacia la izquierda y que es paralelo al eje x. Este rayo de luz incide sobre la parábola en el punto Q(a,b) y se refleja hacia el eje x, al que corta en el punto (c,0). El ángulo de reflexión del rayo de luz debe ser igual al ángulo de incidencia, por lo que ambos ángulos (medidos con respecto a la recta tangente L en Q) se llaman α en la figura 2.4a. El ángulo vertical al ángulo de incidencia también es igual a α ; por tanto, como el rayo incidente es paralelo al eje x, el ángulo que forma el rayo reflejado con el eje x en (c,0) es 2α

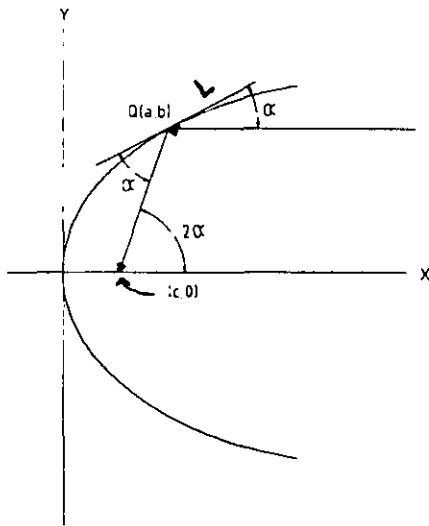


Figura 2.4a

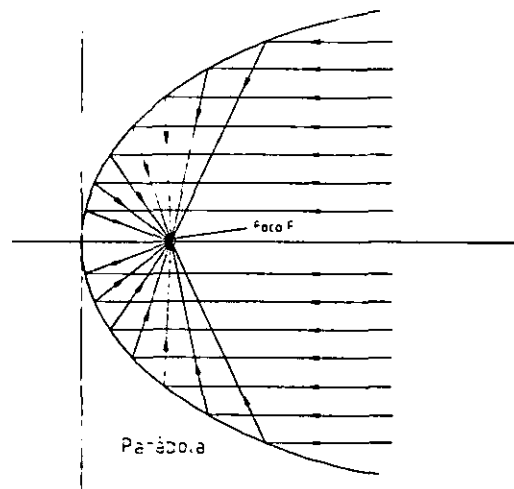


Figura 2.4b

Figura 2.4a. Propiedad de reflexión de la parábola.

Figura 2.4b. Los rayos incidentes paralelos al eje se reflejan y se concentran en el foco.

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

$$\tan 2\alpha = \frac{b}{a-c} = \frac{2 \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha} \quad [2.1]$$

La segunda igualdad es consecuencia de una identidad trigonométrica, pero el ángulo α está relacionado con la pendiente de la recta tangente L en Q. Para determinar esta pendiente, comenzamos reescribiendo la ecuación de la parábola y se tiene:

$$y = -4px = 2 \sqrt{px} = 2(px)^{1/2} \quad [2.2]$$

Luego se calcula la derivada

$$\frac{dy}{dx} = \left(\frac{p}{x}\right)^{1/2} \quad [2.3]$$

Por consiguiente, la pendiente de L es $\tan \alpha$ y es igual a dy/dx evaluada en el punto Q de coordenadas (a,b); es decir:

$$\tan \alpha = (p/a)^{1/2}. \quad [2.4]$$

En consecuencia

$$\frac{b}{a-c} = \frac{2 \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha} = \frac{2 \sqrt{p/a}}{1 - \frac{p}{a}} = \frac{2 \sqrt{pa}}{a-p} = \frac{b}{a-p} \quad [2.5]$$

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

Los concentradores de canal parabólico pueden operar con orientación N-S, E-O o polar. Conforme su orientación, el movimiento angular necesario para seguir el Sol será más lento o más rápido; por ejemplo en el caso N-S, el movimiento requerido es de alrededor de 15°/h, en tanto que para el caso E-O, el movimiento alrededor del mediodía solar (4 horas antes y 4 horas después) es mínimo, de 2 a 3°/h (Almanza 1994).

En un concentrador de canal parabólico, se observa que la pérdida por reflexión debida a la reflejancia de los espejos de segunda superficie es del 15% para espejos de aluminio y de alrededor del 8% para los de plata [Correa, 1996]; esta pérdida no se puede eliminar, ya que técnicamente sería difícil fabricar espejos baratos con mejores características ópticas; las pérdidas por el factor de forma son las que se deben a la desviación de una buena geometría durante la construcción de cilindros parabólicos. Este factor puede empeorar a lo largo del tiempo si la geometría cambia debido a que el espejo se deforma.

Un componente muy importante de un concentrador es el absorbedor; como un intento inicial para fijar el diámetro del absorbedor, es apropiado tratar de captar toda la energía reflejada por el espejo parabólico; el diámetro dependerá del tamaño angular del Sol, de la magnitud del error cometido por 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.

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

Otro tipo de pérdidas importantes en estos concentradores incluye 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 haciendo vacío en el espacio intermedio.

Los sistemas de canal parabólico trabajan con un fluido de transferencia de calor intermediario, principalmente con aceite o agua; en el caso del aceite se requiere de un intercambiador de calor que genere el vapor de agua requerido por un ciclo cerrado que trabaje con una turbina de vapor; en el caso del agua no se requiere de este equipo y el vapor puede ser generado directamente para su uso.

2.6 Producción de calor y de potencia mecánica

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

$$c = \lambda \nu \quad [2.6]$$

donde

- c = velocidad de la luz
- λ = longitud de onda
- ν = frecuencia

La longitud de onda de la radiación solar fluctúa entre 0.1 y 100 μ m, y una gran parte corresponde a la denominada radiación térmica.

La propagación de la radiación térmica ocurre en forma de cuantos discretos, en la que cada cuanto tiene una energía que depende de su longitud de onda; se puede obtener un cuadro físico muy burdo de la propagación de la radiación considerando cada cuanto como una partícula que tiene energía, masa y momento, tal como ocurre con las moléculas de un gas; por tanto, en cierto sentido podemos pensar en la radiación como en un “gas de fotones” que pueden fluir de un lugar a otro; cuando la energía radiante incide contra una superficie material, parte de la radiación se refleja, parte se absorbe y parte atraviesa el material.

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

$$\text{reflejancia} + \text{absortancia} = 1$$

Como la energía no se crea ni se destruye, se transforma; cuando un material recibe radiación solar absorbe una parte la energía de los fotones y la transforma en calor.

Existen diferentes maneras de producir calor para generar vapor, las cuales dependen de la fuente de energía. En una planta termoeléctrica (figura 2.5) mediante la quema de un combustible fósil como el petróleo se genera calor para evaporar agua, obteniéndose vapor y posteriormente electricidad: con la energía nuclear el calor es producido por la fisión nuclear; en el caso de la generación termosolar el vapor es producido por el calor que proviene de la irradiancia directa del Sol.

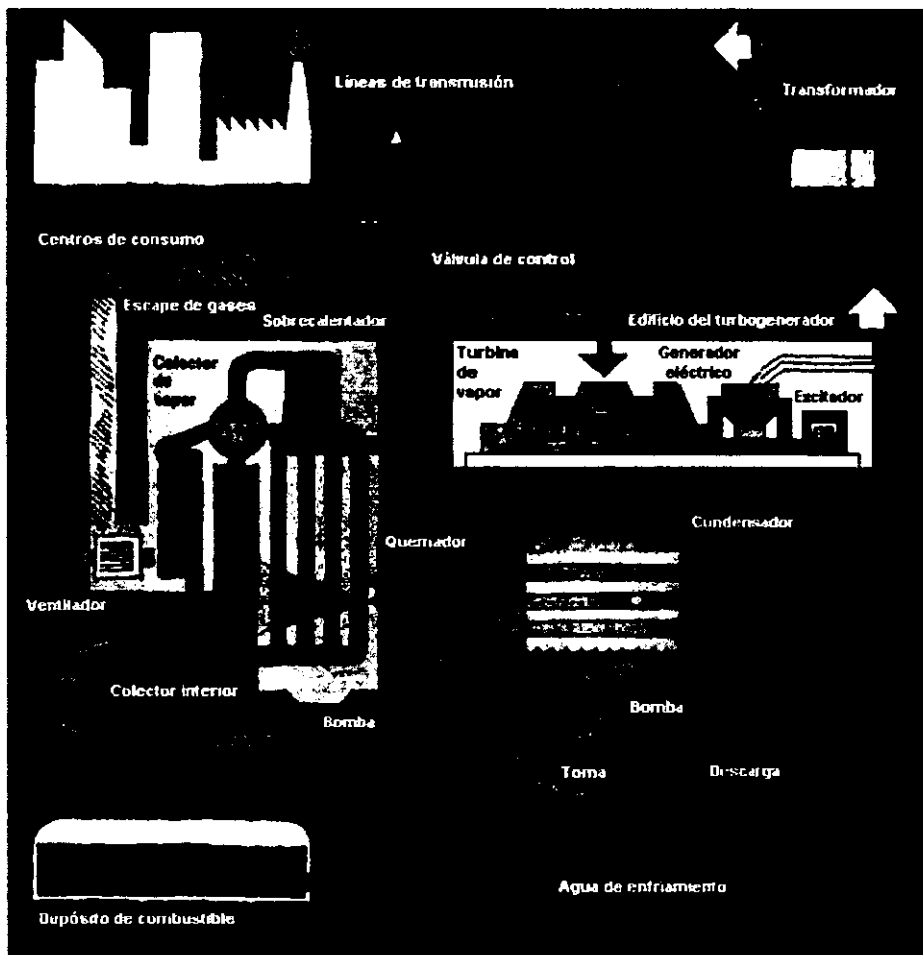


Fig.2.5, Diagrama de una planta termoeléctrica

La transformación de energía térmica en energía mecánica se logra mediante la utilización de una turbina o un motor de pistones de vapor en donde la expansión del fluido de transferencia, en este caso vapor, transfiere su energía a la máquina lográndose un movimiento giratorio; a su vez, la transformación de energía mecánica en energía eléctrica se lleva a cabo mediante la utilización de un generador eléctrico.

2.7 Superficies selectivas y reflejantes

La utilización de superficies selectivas y reflejantes es importante ya que aumentan la eficiencia de los dispositivos de captación, como son los colectores de enfoque, en los que el absorbedor puede disminuir sus pérdidas por radiación y por tanto aumentar las temperaturas de los fluidos con los que se trabaja, obteniendo mayor eficiencia.

2.7.1 Superficies selectivas

Si un cuerpo absorbe y emite energía radiante, características de su temperatura, la temperatura del cuerpo en equilibrio final será proporcional a la relación α/ϵ , donde α es la *absortancia* y ϵ es la *emitancia*. Para alcanzar una elevada temperatura se necesita una superficie con alta absorción en la banda de emisión solar y baja emitancia en el intervalo de emisión del cuerpo (o sea una relación α/ϵ alta); esta superficie se llama *selectiva*.

Existen varios procesos para producir materiales con estas propiedades, dependiendo de la temperatura a la que se trabaje; un mecanismo consiste en depositar una película delgada de alta absortancia para radiación solar, por medio de reacciones químicas, y usar un sustrato que tenga una emisión pobre de radiación de onda larga (infrarroja); este sustrato de baja emitancia en el infrarrojo se puede obtener con una superficie metálica pulida.

Las superficies selectivas más comunes son películas de óxidos metálicos sobre substratos metálicos, por ejemplo las de CuO, Cu₂O, Fe₃O₄, el cromo negro ($\alpha = 0.92$ y $\varepsilon = 0.08$), etc.

2.7.2 Superficies reflejantes

Las superficies reflejantes para fines solares son espejos que reflejan la radiación solar incidente hacia un absorbedor.

Existen dos configuraciones típicas de espejos dependiendo de la superficie del sustrato en que se deposite el material reflejante; si el metal reflejante se deposita en la parte posterior de un material transparente estable e impermeable, entonces se dice que es un espejo de segunda superficie; los espejos de primera superficie son aquellos en que el material reflejante se deposita sobre la cara frontal del sustrato.

Para los espejos de primera superficie, con aplicación en energía solar, la reflejancia especular es la propiedad óptica más importante, sin dejar a un lado su duración en el campo de trabajo. Para estimar dicha duración es necesario evaluar el grado de corrosión o degradación para determinar como se afecta la reflejancia.

Cuando un rayo de energía luminosa incide sobre un espejo, parte de él es reflejado y parte absorbido; la eficiencia para aplicaciones solares se define como la relación entre la intensidad de la radiación solar reflejada (I) y la intensidad de la radiación solar incidente (I_0). A esta relación se le conoce comúnmente como ρ_s , y es igual a I/I_0 .

2.8 Ciclo Rankine

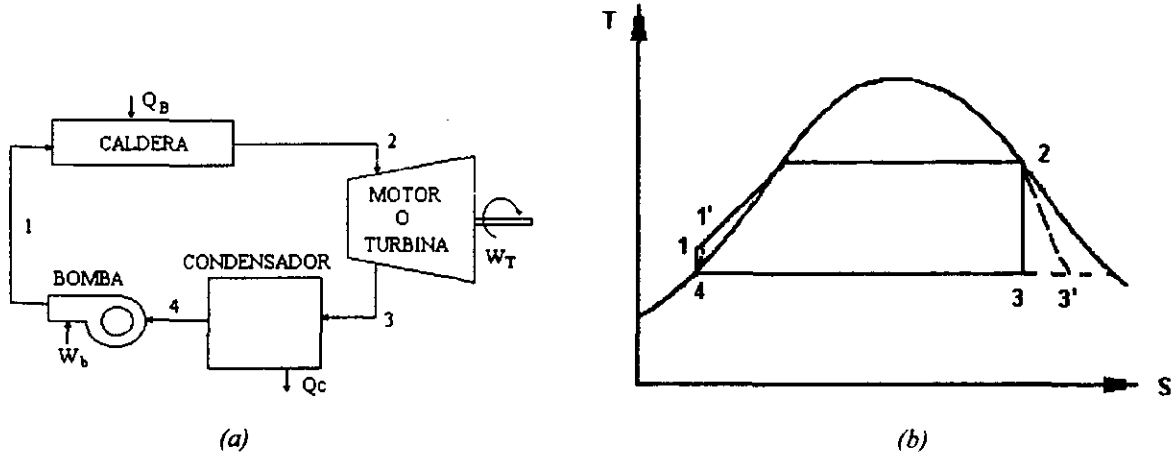


Figura 2.6, Ciclo Rankine, a) componentes b) diagrama T-S

Gran parte de la electricidad generada comercialmente se obtiene mediante el uso de plantas generadoras de vapor que operan según el ciclo Rankine.

El ciclo termodinámico básico se representa en un diagrama temperatura-entropía, en la Fig. 2.6.

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

Para pasar del estado 4 al 1, una bomba comprime isentrópicamente el líquido que sale del condensador hasta que alcanza la presión necesaria para que entre a la caldera; para pasar del estado 1 al 2, la caldera suministra energía a presión constante hasta que el agua se evapora completamente a vapor saturado o sobrecalentado; en el proceso 2-3, el vapor se expande isentrópicamente en una turbina hasta el estado 3; luego el vapor húmedo sale de la turbina y se condensa a presión constante, proceso 3-4, hasta que se obtiene líquido en el punto 4.

El calor suministrado en el proceso 1-2 puede provenir de combustibles convencionales, de una fuente solar o de un reactor nuclear; en nuestro caso, la caldera es el concentrador solar, el cual va a generar vapor; en el proceso de expansión 2-3 se utiliza un motor de pistones en lugar de la turbina.

La eficiencia del ciclo Rankine ideal se utiliza como patrón y representa el máximo teórico que puede conseguirse con una determinada combinación de caldera-motor de vapor; se obtiene al dividir el trabajo neto producido por un motor ideal (expansión isoentrópica) entre la energía que suministra la caldera (concentrador solar).

$$\text{Eficiencia del ciclo Rankine ideal} = \frac{\text{Trabajo neto producido en una expansión isoentrópica.}}{\text{Calor suministrado por la caldera}}$$

$$\eta_{\text{ciclo Rankine ideal}} = \frac{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad [2.7]$$

$$\text{Eficiencia del ciclo Rankine real} = \frac{\text{Trabajo neto producido en el interior de la máquina en una expansión real.}}{\text{Calor suministrado por la caldera}}$$

$$\eta_{\text{ciclo Rankine real}} = \frac{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad [2.8]$$

$$\eta_{\text{ciclo Rankine real}} = \frac{(\eta_{\text{interna motor}})(W_{\text{motor ideal}}) - (W_{\text{bomba ideal}} / \eta_{\text{interna bomba}})}{\dot{m} (h_2 - h_1')} \quad [2.9]$$

En el caso de que el trabajo de la bomba sea despreciable ($h_1 = h_1 = h_4$, Fig. 2.6 – b):

$$\eta_{\text{ciclo Rankine real}} = \frac{(\text{Potencia al freno}) / \eta_{\text{mec motor}}}{\dot{m} (h_2 - h_4)} \quad [2.10]$$

Donde: $\eta_{\text{mec motor}}$ = Eficiencia mecánica del motor de vapor

El consumo específico de vapor (m_s) es la cantidad de vapor, en Kg, que necesita el motor para producir un kW-hora; este valor puede referirse a la potencia al freno de la siguiente manera:

$$m_s = \dot{m} / P \quad [2.11]$$

Donde: \dot{m} = flujo de vapor medido en kg/hr
 P = Potencia al freno en kW
 m_s = Consumo específico de vapor kg/kW-h

Por tanto la ecuación 2.10 se convierte en:

$$\eta_{\text{ciclo Rankine real}} = \frac{3600}{m_s (h_2 - h_4) \eta_{\text{mec motor}}} \quad [2.12]$$

Donde : 3600 = Equivalente térmico de un kW-h.
 h_2 = entalpía en la entrada del vapor del motor. (kJ/kg)
 h_4 = entalpía del agua en la entrada del concentrador. (kJ/kg)

2.9 Eficiencia en la producción de vapor en el concentrador de canal parabólico.

Para determinar la eficiencia con que la energía solar se convierte en energía térmica (vapor) se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta_{\text{concentrador}} = \frac{\dot{m}_v (h_v - h_a)}{G_b A_e} \quad [2.13]$$

Donde:

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

h_v = entalpía del vapor en kJ/kg .

h_e = entalpía del agua de alimentación en kJ/kg .

G_b = irradiancia directa proyectada en el plano de captación, en kW/m² .

A_e = área efectiva de concentradores en m².

2.10 Eficiencias del motor de pistones de vapor.

Eficiencia interna = $\frac{\text{Trabajo (o potencia) producido por el vapor en el interior de la máquina, en una expansión real.}}{\text{Trabajo (o potencia) producido por el vapor en una expansión isoentrópica.}}$

$$\eta_{\text{interna motor}} = \frac{(h_2 - h_3')}{(h_2 - h_3)} \quad [2.14]$$

$$\eta_{\text{interna motor}} = \frac{3600}{m_s (h_2 - h_3) \eta_{\text{mec motor}}} \quad [2.15]$$

Eficiencia mecánica del motor = $\frac{\text{Potencia al freno}}{\text{Potencia desarrollada por el vapor en el interior de la máquina, en una expansión real.}}$

$$\eta_{\text{mec motor}} = \frac{\text{Potencia al freno}}{\dot{m} (h_2 - h_3')} \quad [2.16]$$

Eficiencia global del motor; = $\frac{\text{Potencia al freno}}{\text{Potencia producida por el vapor en una expansión isoentrópica}}$

$$\eta_{\text{global motor}} = \frac{\text{Potencia al freno}}{\dot{m} (h_2 - h_3)} = (\eta_{\text{interna motor}}) (\eta_{\text{mec motor}}) \quad [2.17]$$

2.11 Freno de Prony

La potencia al freno en el caso de motores relativamente pequeños se determina mediante el freno de Prony (Fig 2.7).

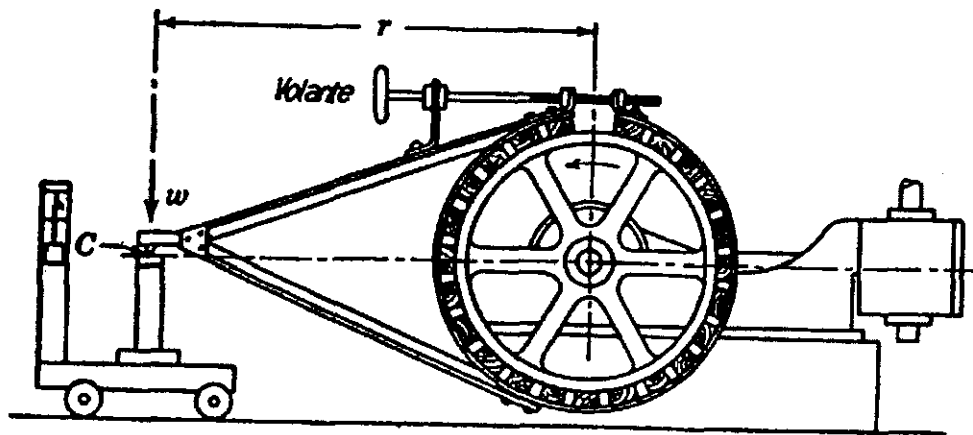


Figura 2.7 Freno de Prony

El freno consiste en un fleje portador de una serie de bloques de madera que rodean al volante del motor, o a una polea montada en el eje de dicho motor y unida al mismo; los bloques se hallan en contacto con la superficie de la polea. El fleje, puede tensarse o aflojarse sobre dicha polea por medio de un tornillo ajustado a mano.

La distancia horizontal (r), medida desde C hasta el centro del eje del motor es la longitud del brazo del freno; el freno de Prony es un aparato de fricción y el trabajo desarrollado en la polea se disipa en forma de calor; por lo tanto, es preciso tomar las debidas precauciones para refrigerarla.

Debido a que el trabajo (W) se define como el producto de una fuerza por la distancia a lo largo de la cual actúa la fuerza, el trabajo absorbido por un freno de Prony en cada vuelta de la polea será:

$$W = 2\pi r f \quad [2.18]$$

Donde:

- f = fuerza neta registrada por la báscula, en kg.
- r = longitud del brazo del freno, en metros
- $2\pi r$ = distancia en metros que recorrería el punto C en cada revolución si no hubiese deslizamiento en el freno.

Si se conoce el número de revoluciones de la polea, por unidad de tiempo, puede calcularse la velocidad a la que se produce el trabajo, o sea la potencia:

$$\text{Potencia} \left(\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{min}} \right) = 2\pi r f N \quad [2.19]$$

$$\text{Potencia(kW)} = \frac{2\pi r f N}{6118.7} = \frac{r f N}{973.8} \quad [2.20]$$

Donde:

N = revoluciones por minuto en la polea.

2.12 Eficiencia en el generador de corriente alterna o alternador.

Las pérdidas de energía en un generador de corriente alterna (CA) se clasifican de la siguiente manera:

1. Pérdidas en el cobre del rotor y del estator (I^2R)
2. Pérdidas en el núcleo
3. Pérdidas mecánicas
4. Pérdidas adicionales

En la figura 2.8 se presenta el diagrama de flujo de potencia de un generador de CA.

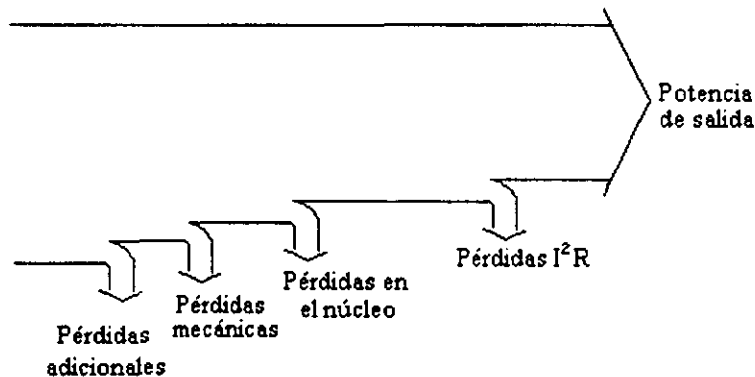


Figura 2.8, Diagrama de flujo de potencia de un generador de CA

Las pérdidas en el cobre de una máquina de CA son las pérdidas por calentamiento debidas a la resistencia de los conductores del rotor y del estator.

Las pérdidas mecánicas se deben a la fricción en los rodamientos y con el aire, y las pérdidas en el núcleo se deben a la histéresis y a las corrientes parásitas. Con frecuencia estas pérdidas se toman en grupo y se les llama pérdidas de vacío o pérdidas rotacionales de la máquina.

Las pérdidas adicionales son todas aquellas pérdidas que no se pueden clasificar en ninguna de las categorías descritas anteriormente. Por convención se asume que son iguales al uno por ciento de la potencia de salida de la máquina.

La eficiencia de un generador de corriente alterna es la relación entre la potencia eléctrica útil de salida y la potencia mecánica total de entrada.

$$\eta_{\text{alternador}} = \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \quad [2.21]$$

2.13 Eficiencia global de la planta (eficiencia de conversión de la energía solar en electricidad)

Finalmente, la eficiencia total del sistema (concentrador-motor de vapor-alternador), es el cociente que resulta de dividir la energía eléctrica generada entre la energía suministrada por el Sol.

$$\eta_{\text{global de la planta}} = \text{Potencia eléctrica} / G_b A_c \quad [2.22]$$

Otra forma de calcular la eficiencia solar-electricidad es como sigue:

$$\eta_{\text{global de la planta}} = (\eta_{\text{concentrador}})(\eta_{\text{ciclo Rankine real}})(\eta_{\text{mec motor}})(\eta_{\text{alternador}}) \quad [2.23]$$

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO (PLANTA SOLAR)

3.1 Configuración anterior.

La Planta Solar del Instituto de Ingeniería con 580 m² de concentradores, se encuentra ubicada en la parte posterior del Jardín Botánico Exterior, en Ciudad Universitaria.

Las instalaciones fueron construidas a principios de los años ochenta y permanecieron la mayor parte del tiempo sin operación. Fue en el año de 1995 cuando se iniciaron los trabajos de acondicionamiento para la generación directa de vapor y electricidad.

Los 580 m² estaban integrados por 16 módulos, cada uno de los cuales tenía 12 canales parabólicos individuales; en los tubos absorbedores circulaba aceite mineral, el cual transfería su calor al agua de una caldera para generar vapor en un ciclo Rankine.

3.4 Concentradores de canal parabólico, configuración actual.

Para la realización del experimento que se detalla más adelante, se utilizaron cuatro módulos de la parte noreste de la antigua Planta Solar que se aislaron del sistema de aceite; cada módulo está constituido por una estructura metálica que soporta 12 concentradores hechos de fibra de vidrio y un tubo absorbedor de acero o de cobre.

Las características de los módulos concentradores del canal parabólico que se utilizaron, son las siguientes:

Area de apertura total (Aa):	138 m ²
Area efectiva de captación (Ae):	98.5 m ²
Angulo de borde:	90°
Longitud del absorbedor:	14.78 m
Distancia focal:	0.625 m
Razón de concentración:	22.11:1
Superficie reflectora:	ECP-305, FEK 244
Orientación:	Horizontal este-oeste
Película selectiva	cromo negro $\alpha = 0.93$, $\varepsilon = 0.13$

Cada uno de los canales está recubierto con espejo del tipo película reflejante de segunda superficie de la marca 3M; el primero y segundo módulos tienen espejos de aluminio FEK-244, el tercer módulo tiene espejo de plata PMMA (polymethylmetacrylate) ECP-305 y el cuarto tiene espejo FEK-244 de aluminio; la reflejancia especular en el espectro solar (0.3-3.0 μm) es de 0.74 para el FEK-244 y de 0.92 en el caso del ECP-305.

El primero y el segundo módulos presentan una superficie dañada aproximada del 25 % (por estar expuestos a la intemperie), por lo que tienen un área de captación en su conjunto de 49.5 m²; el tercer módulo presenta una superficie dañada del 33 %, por lo que tiene un área de captación de 22 m²; el cuarto módulo presenta una superficie dañada del 20 %, por lo que tiene un área de captación de 27 m². En total, los cuatro módulos que se encuentran en operación tienen un área efectiva de captación de 98.5 m².

Los cuatro módulos concentradores de canal parabólico están conectados en serie (figura 3.1). Los tres primeros tubos absorbedores son de cobre para evitar la flexión debida al

calentamiento no uniforme de la doble fase (agua y vapor), y el cuarto es de acero ya que en éste sólo se tiene vapor y no sufre esfuerzos térmicos que lo flexionen.

Las características de los tubos absorbedores son las siguientes:

- 3 tubos absorbedores de cobre tipo K (SAE No. 73) de 31.75 mm (1¼ pulgadas) de diámetro.
- 1 tubo absorbedor de acero de 2.54 cm (1 pulgada) de diámetro nominal (SAE 1020)

Los absorbedores están recubiertos por tubo de vidrio "Pirex" de 6.25cm de diámetro externo con espesor de pared de 2.1 mm.

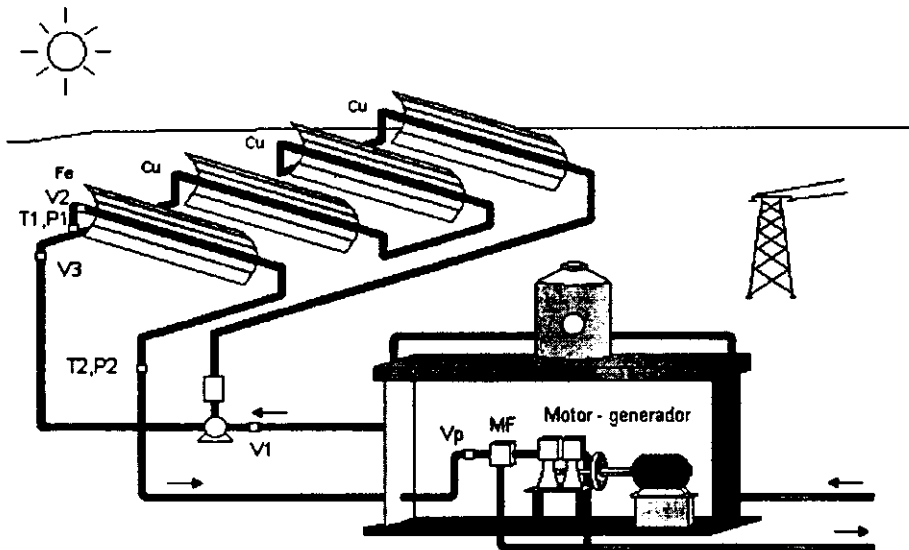


Figura 3.1, Diagrama de la configuración de la Termoeléctrica Solar.

T = medidor de temperatura, P = medidor de presión

Vp = válvula proporcional, MF = medidor de flujo

3.3 Sistema de agua de alimentación.

El sistema de agua se encuentra integrado por una cisterna de almacenamiento de agua dura, un suavizador de agua, una cisterna de agua suavizada y por dos bombas, una que lleva el agua del depósito de agua dura al de agua suavizada, pasando por el suavizador, y otra para llevarla de la cisterna de agua suavizada a un depósito en el que se almacena antes de enviarse a los concentradores solares.

Cabe aclarar que las dos cisternas se encuentran a 50 metros del cuarto de máquinas, fuera del terreno de la planta, pues se comparten con las instalaciones de la mesa vibradora que se localiza a un lado de la planta termosolar.

El depósito de almacenamiento de agua tratada está situado en el cuarto de máquinas, de este lugar se extiende una tubería de acero de 47 m de longitud que conecta con el primer módulo, dicha tubería va desnuda y tiene un diámetro nominal de una pulgada ó 2.54 cm. Entre el depósito y el campo de concentradores se encuentra una bomba de desplazamiento positivo, de paletas, que proporciona alta presión (7 bar) con poco flujo (1 a 2 lit/min), apropiada para el sistema. La bomba de paletas está acoplada directamente a un motor de 3 hp., que se encuentra conectado a un controlador de velocidad marca Siemens; esto permite controlar la velocidad de giro y, a su vez, la presión y el gasto, dependiendo de las condiciones del campo de concentradores.

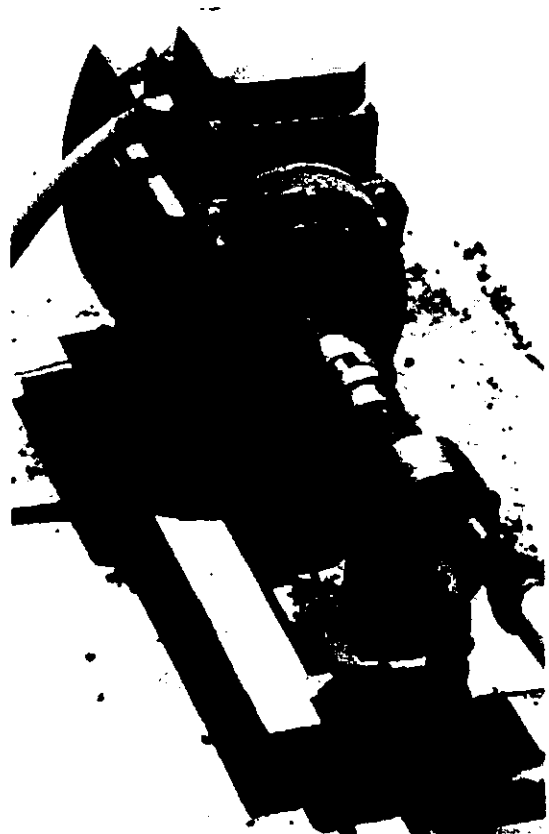


Figura 3.2. Bomba de paletas.

Como ya se ha mencionado, los tres primeros módulos tienen tubos absorbentes de cobre y el cuarto de acero, debido a que en este último sólo hay vapor y no se presentan los problemas propios de la doble fase. Después del cuarto módulo se tienen 35 m de tubería de acero de 2.54 cm de diámetro, recubierta con lana mineral y lámina de aluminio, como aislante térmico y protector respectivamente; esta tubería llega hasta el motor de vapor. En el escape del motor de pistones se tiene un tramo de tubería para realizar mediciones de la mezcla agua-vapor que se desecha.

3.4.1 El motor de vapor.

El Instituto de Ingeniería cuenta con un motor de vapor, Fig. 3.3, que fue adquirido a principios de los años 80's y que no fue utilizado sino hasta hace tres años, cuando se iniciaron los trabajos para la generación de electricidad en la planta solar, empleando el vapor generado directamente en los concentradores.

La máquina es un motor de vapor de dos pistones de doble efecto, de 3hp, de la marca Stuart Swan; esta máquina cuenta además con un cuerpo de bombas que se utilizan para su lubricación.

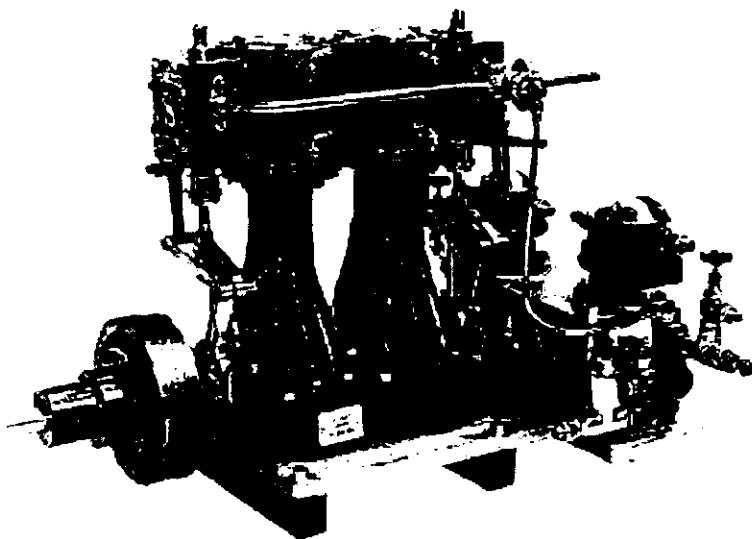


Figura 3.3 Motor de pistones de vapor

Para proteger al motor de pistones, en su entrada se colocó un separador de vapor con su respectiva trampa de condensados conectada en serie. Esto tiene el propósito de retirar tanto el agua como la humedad del vapor; la entrada de líquido puede provocar que se dañe el motor de pistones; la trampa de condensados (trampa de vapor) es de cubeta invertida, su presión máxima de operación es de 8.61 bar y tiene una entrada de 19.05 mm de diámetro.

La configuración anterior permite un buen desempeño del motor de pistones de vapor y hace posible su operación aún en días en que la radiación solar es baja o existe un poco de nubosidad.

3.5 Generador eléctrico de corriente alterna o alternador.

El alternador eléctrico para la conversión de energía mecánica a eléctrica es de imán permanente, trifásico, de los utilizados en generadores eólicos, con una capacidad de generación de 1kW, de la marca Whisper 1000.



Figura 3.4, Sistema motor-generator en operación.

Una de las razones principales por las que se seleccionó este alternador es que tiene alta eficiencia (aprox. 90%) a esa potencia, además de que trabaja a la velocidad en la que el motor de vapor presenta su mejor desempeño.

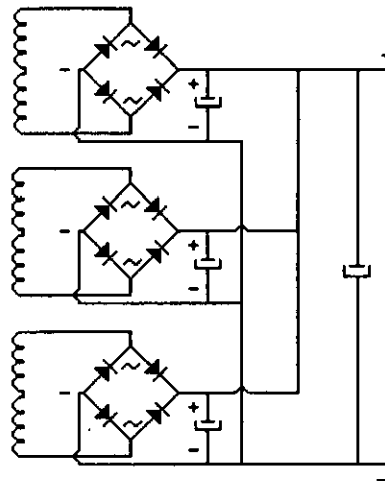


Figura 3.5, Diagrama de conexiones eléctricas del generador trifásico Whisper 1000.

El alternador tiene 6 bobinas que se pueden interconectar en distintas formas, según el voltaje requerido; en esta ocasión se formaron 3 pares y cada uno de ellos se interconectó en serie, luego se rectificó la corriente de las 3 bobinas resultantes (fig. 3.5); finalmente, las salidas de estas bobinas, que tienen una misma polaridad, se conectaron en paralelo para obtener una salida común positiva y otra negativa. Se hizo una prueba para observar cómo se comporta el voltaje con respecto a la velocidad; los resultados se pueden ver en la tabla 3.1 que se muestra a continuación.

r.p.m	Voltaje con carga
500	39
600	44
700	56
800	63
900	74

Tabla 3.1, Relación de velocidad-voltaje a la salida del alternador Whisper 1000.

3.6 Equipo de medición utilizado.

A continuación se detalla el equipo utilizado en las pruebas:



Figura 3.6, Medidor de flujo de vapor Omega.

- 1 Medidor de flujo de agua en línea, con rango de medición de 1 a 6 lt/min (ó 0.2 a 1.6 gal/min), resolución de 0.25 lt/min (ó 0.1 gal/min) y entrada de 19.05 mm. de diámetro.
- 1 Medidor de flujo de vapor marca Omega, tipo Vortex con rango de 0 a 10 kg/hr (Fig. 3.6).
- 3 Termómetros bimetalicos con rango de 0 a 200 °C y resolución de 2 °C, (Fig 3.7.)
- 1 Termómetro bimetalico con rango de 0 a 300 °C y resolución de 2 °C.
- 3 Manómetros de Bourdon con rango de 0 a 14 kg/cm² (0 a 200 lb/pulg²) y resolución de 0.2 kg/cm² (5 lb/pulg²), (Fig 3.7)

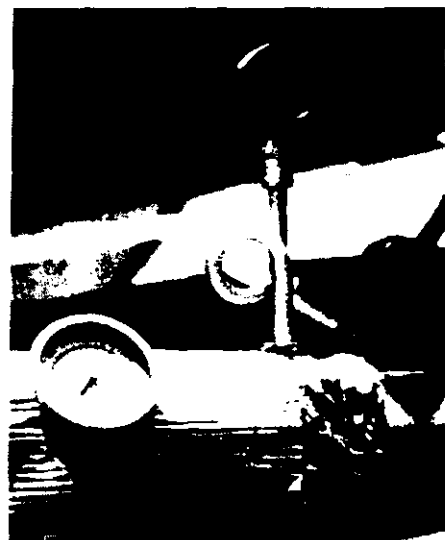


Figura 3.7, Manómetro y termómetro

- 1 Multímetro digital marca Amprobe AM- 1280
- 1 Tacómetro mecánico de lectura directa marca "Deumo" con rango de medición de 15 a 3600 r.p.m.
- 1 probeta de 6 litros, con escala cada 50 mililitros a partir de los 4 litros (Fig.3.8).

En esta probeta se realizó la condensación del vapor. En ella se vertían 5 litros de agua a temperatura ambiente y luego se hacía burbujear el vapor dentro del líquido. La medición del flujo másico se hizo a intervalos de 30 a 60 segundos para evaluar la producción de vapor, así como la eficiencia del motor.



*Figura 3.8,
Probeta condensadora.*

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

4.1 Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo consiste en poner en operación la planta termosolar del Instituto de Ingeniería y medir sus eficiencias; la planta trabajará con el vapor generado directamente en los concentradores solares de canal parabólico y se utilizará un motor de pistones de vapor que tiene acoplado un alternador eléctrico para generar electricidad en un ciclo Rankine abierto.

Es conveniente describir cada una de las etapas del experimento:

- La obtención de la eficiencia del concentrador solar como productor de vapor.
- La obtención de la eficiencia interna del motor de pistones de vapor
- La obtención de la eficiencia del generador eléctrico
- La obtención de la eficiencia del ciclo Rankine y
- La obtención de la eficiencia global de la planta, que es la eficiencia de conversión de energía solar-electricidad.

4.2 Eficiencia del concentrador solar como productor de vapor.

Se comenzará con el campo de concentradores de canal parabólico, que es en donde se genera vapor directamente. Ellos concentran la radiación solar y transfieren calor al agua que fluye en el interior de los tubos absorbedores. Describiremos su comportamiento en operación y las condiciones en las cuales trabajaron.

Es necesario describir las variables que intervienen:

- La irradiancia solar directa en W/m^2 .
- La temperatura del fluido (agua) a la entrada y a la salida, medida en $^{\circ}C$.
- La presión del fluido en kg/cm^2 .
- El flujo de agua, o sea la cantidad de masa que circula a través de los tubos absorbedores del concentrador solar, medida en litros por hora o kilogramos por hora.

Deseamos conocer de manera real cuánta energía se recibe en forma de irradiancia y cuánta se transforma en calor.

El experimento es muy sencillo, lo que necesitamos hacer es determinar cuánta energía se suministra al sistema y cuánta se obtiene del mismo mediante el vapor.

Para conocer cuánta energía recibe el concentrador, en primera instancia se debe medir la radiación directa que incide sobre el área de captación real, que es el área del espejo instalado menos las partes dañadas o con sombra.

Posteriormente, a presión constante se debe determinar el gasto, la temperatura y la presión con que entra el agua; es necesario conocer estas mismas variables en el vapor de salida para poder obtener la energía que suministra el concentrador; con las condiciones

de entrada y de salida y con la ayuda de unas tablas de vapor se puede conocer la entalpía.

Para obtener la eficiencia del generador de vapor (campo de concentradores) debemos dividir la potencia que absorbió el vapor entre la potencia que recibe el campo de concentradores, resultando la ecuación (2.13) ya descrita en el capítulo II.

Para obtener mediciones confiables del flujo de vapor, éste se condensó en una probeta que contenía 5 litros de agua fría; el vapor era introducido a la probeta, por debajo del nivel del líquido, con intervalos que iban desde 30 a 60 segundos; los resultados se compararon con las lecturas de un medidor comercial de agua, situado en la entrada del campo de concentradores.

Es conveniente considerar las pruebas individualmente debido a que las condiciones del medio ambiente varían diariamente, por lo que mencionaremos varios casos en la tabla 4.1; a continuación se presenta un caso representativo.

Los resultados que se muestran a continuación se obtuvieron alrededor del medio día solar, con poco viento y cielo despejado.

h_a agua entrada [kJ/kg]	h_v vapor de salida [kJ/kg]	Flujo másico [kg/s]	irradiancia directa [kW/m ²]	Eficiencia * η [%]
105.3	2739.3	0.0117	0.820	38.151

(*) usando la ecuación 2.13

El conjunto de mediciones realizadas entre las 11:00 y 15:00 horas se presenta a continuación.

T entrada °C	T salida °C	h_a (kJ/kg)	h_v (kJ/kg)	ml/min	kWatt/m ²	Eficiencia %
26	135	105.05	2729.7	750	0.926	35.97%
26	130	105.01	2722.1	750	0.934	35.56%
28	134	105.05	2729.7	800	0.94	37.80%
28	132	117.57	2723.7	750	0.917	36.07%
30	125	125.90	2713	650	0.904	31.48%
28	128	117.50	2718.7	850	0.913	40.98%
28	140	118.00	2736.2	850	0.933	40.36%
28	130	117.50	2721.4	750	0.923	35.80%
25	140	105.03	2739.3	700	0.82	38.05%
25	150	105.21	2748.6	800	0.84	42.60%
28	134	105.05	2729.7	800	0.918	38.70%
28	132	117.57	2723.7	800	0.927	38.06%
26	130	105.01	2722.1	750	0.932	35.63%
26	135	105.05	2729.7	800	0.936	37.96%
28	128	117.50	2718.7	850	0.923	40.53%
						38%

Tabla 4.1 Eficiencia del concentrador solar con generación directa de vapor.

En cuanto a las experiencias en la generación directa de vapor, mencionaremos que el problema de la flexión (pandeo) de los tubos absorbedores fue resuelto exitosamente sustituyendo los absorbedores de acero por absorbedores de cobre, recubiertos de igual manera con cromo negro; no se presentó en ningún módulo rotura del tubo envolvente de vidrio.

Tomando un grupo de mediciones representativas de diferentes días se obtuvo, en promedio, una eficiencia en la generación directa de vapor en los concentradores solares de 38%.

4.3 Eficiencia interna del motor de pistones de vapor.

Para encontrar la eficiencia interna del motor de pistones de vapor, de manera experimental, es necesario conocer la potencia al freno, el consumo específico de vapor, la eficiencia mecánica del motor y las entalpías del vapor en la entrada y la salida.

Mediante un freno de Prony, que se construyó para la ocasión, como el descrito en el capítulo II, obtenemos la potencia que entrega el motor de pistones de vapor en su flecha; se midieron la presión y la temperatura del vapor a la entrada y a la salida; además se midieron el flujo másico del vapor y el flujo de líquido en purgas; simultáneamente se midieron las revoluciones por minuto (r.p.m.) de la flecha y la fuerza aplicada durante el frenado.

Las velocidad de rotación de la flecha se midió con un tacómetro mecánico y la fuerza aplicada en el extremo del brazo de frenado se midió con una báscula granataria.

Como no se evaluó en forma experimental la eficiencia mecánica del motor de vapor, se toma un valor de 85%, de acuerdo con la literatura técnica (Severs, 1954). En esta referencia se comenta que las máquinas deficientemente construidas tienen una eficiencia mecánica del 85%, y que las de excelente construcción pueden dar 90%.

4.3.1 Ejemplo.

Los datos que se obtuvieron al operar el freno son los siguientes: velocidad de giro del motor, 900 r.p.m.; fuerza aplicada, 2.8 kg-f; brazo del freno, 0.34m. La potencia al freno se calcula con la ecuación (2.20) y es de 0.88kW.

Con un flujo másico de vapor de 60 kg/h y una potencia al freno de 0.88 kW, el consumo específico de vapor suministrado a la máquina resultó de 68.18 kg/kWh.

El motor operó en un ciclo abierto, bajo las condiciones siguientes: sin condensador, descargando el vapor al ambiente (presión atmosférica absoluta de 0.75 bar); vapor de entrada a 160° C y 6.2 bar, $h_2 = 2759.4$ kJ/kg; el vapor a una presión de salida de 0.75 bar, con una humedad de 0.889, $h_3 = 2409.6$ kJ/kg (expansión isoentrópica) y un consumo específico de 68.18 kg/kWh. Mediante la ecuación (2.15), y suponiendo una eficiencia mecánica de 85%, la eficiencia interna resultante es de 19.42%.

A continuación se muestra la tabla 4.2 con un grupo representativo de mediciones, se puede ver la eficiencia interna del motor que complementa el ejemplo anterior.

Presión de entrada bar	Temp. de entrada °C	h_2 entrada kJ/kg	h_3 salida kJ/kg	mv kg/h	rpm	Potencia al freno (kW)	ms kg/kW-h	Eficiencia interna del motor
5.4	160	2752.5	2399.56	60	950	0.85579	70.111	0.1657
5.4	160	2752.5	2399.56	60	950	0.85579	70.111	0.1657
5.9	155	2756.3	2389.89	60	800	0.81005	74.070	0.1578
4.2	150	2740.4	2428.58	60	750	0.78037	76.887	0.1708
6.1	160	2759.4	2409.6	60	900	0.84217	71.245	0.1699
2.8	138	2722.1	2485.04	45	850	0.64699	69.553	0.2378
2.4	135	2716	2503.71	39	750	0.62325	62.575	0.2939
3.5	140	2733.9	2445.6	48	1000	0.72625	66.093	0.2216
4	132	2723.2	2465.57	42	850	0.64699	64.916	0.2532
2	126	2706.2	2487.16	30	500	0.34567	86.788	0.2144
3.2	140	2737.6	2460.47	42	800	0.581	72.289	0.2114
1.4	120	2690.3	2571.78	24	650	0.27915	85.975	0.3506
2.1	122	2709.1	2501.95	39	1000	0.4993	78.109	0.2618
2	125	2706.2	2517.76	36	1050	0.50593	71.156	0.2993
1.8	120	2708.1	2527.13	36	930	0.41564	86.613	0.2702
2.2	130	2752.2	2510.03	33	900	0.41794	78.959	0.2493
2	120	2706.2	2509.5	36	800	0.38547	93.392	0.2305

Tabla 4.2, Resultados de las pruebas de eficiencia del motor de vapor con el freno de Prony, según la ecuación (2.15). Se supuso una eficiencia mecánica de 85%. La presión de salida fue la atmosférica (0.75 bar).

Eficiencia del generador eléctrico (alternador).

Para determinar la eficiencia del alternador es necesario conocer sus condiciones de operación tanto de entrada como de salida; esto es más sencillo de realizar a la salida que a la entrada, pues medir cuánta potencia está entregando el primotor, o sea el motor auxiliar que acciona al alternador, es un poco más complicado; esto debe realizarse midiendo el par a la salida del primotor.

Para conocer la potencia del primotor es necesario caracterizarlo para saber su comportamiento y por tanto su eficiencia; en nuestro caso se utilizó un motor de corriente directa alimentado por un banco de baterías.

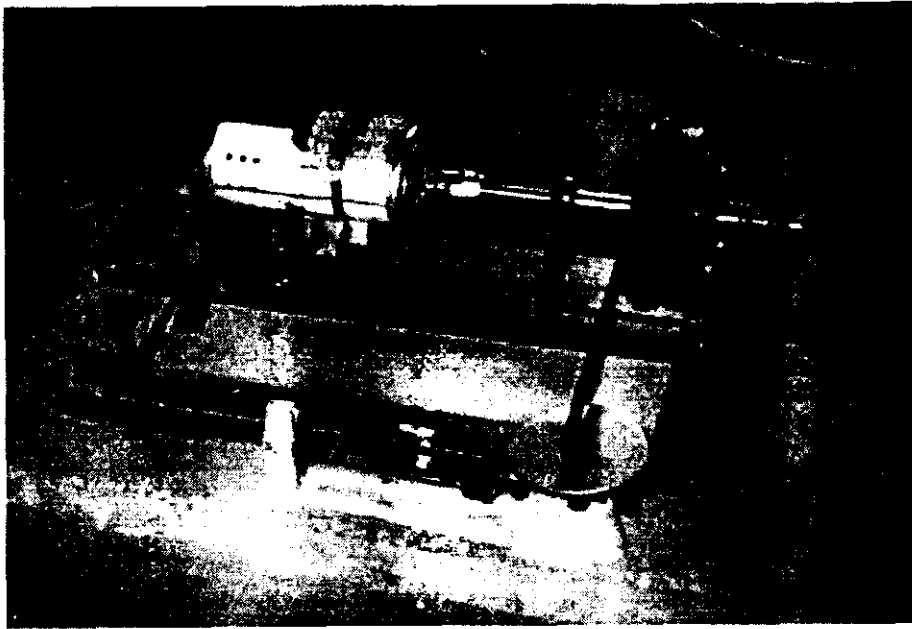


Figura 4.4 *Primotor con freno de Prony*

De manera similar como se hizo en el motor de vapor, utilizando el freno de Prony se obtuvo la potencia al freno entregada en la flecha del primotor, además se midieron el voltaje y la corriente para obtener la potencia eléctrica de entrada (figura 4.4).

A continuación se presenta la tabla 4.3. con los resultados experimentales mostrando la eficiencia del primotor a diferentes velocidades.

r. p. m.	We	Ws	Epm
500	65.15	35.91	0.5511896
600	82.13	47.13	0.5738463
700	98.25	57.02	0.5803562
800	123.85	71.64	0.5784417
900	149.65	88.61	0.5921149
1000	164.71	103.44	0.6280129

Tabla 4.3. *Resultados de la prueba del primotor*

rpm = revoluciones por minuto We := potencia de entrada, watts

Ws = potencia de salida al freno, watts Epm = eficiencia del primotor.

Finalmente se hizo otra prueba acoplando directamente el motor eléctrico (primotor) y el alternador; se midió tanto el voltaje como la corriente de entrada y de salida; figura 4.5. Conociendo la eficiencia del primotor y la potencia eléctrica de entrada y salida del sistema primotor-alternador podemos obtener la eficiencia correspondiente del alternador, de la siguiente manera.

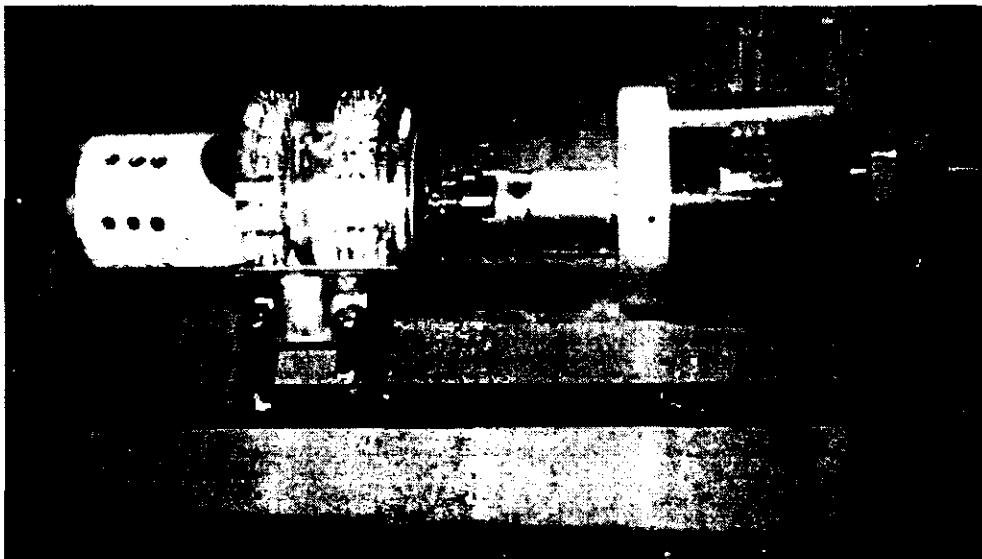


Figura 4.5. Primotor-alternador

$$W_s = W_e \cdot E_{pm} \cdot E_a \quad (4.1)$$

Donde:

W_e : potencia eléctrica de entrada primotor. E_a : eficiencia del alternador

E_{pm} : eficiencia del primotor. W_s : potencia eléctrica de salida alternador .

Despejando obtenemos la eficiencia (E_a) del alternador.

$$E_a = \frac{W_s}{(E_{pm} W_e)} \quad (4.2)$$

A continuación se muestra la tabla 4.4 con resultados que detallan la memoria de cálculo.

rpm	PRIMOTOR			ALTERNADOR			Ea
	Im	Vm	We	Ia	Va	Ws	
600	7.52	7.95	59.78	0.64	45	28.8	0.83948
700	8.06	9.83	79.23	0.71	56	39.76	0.8647
800	10.96	10.27	112.56	0.9	63	56.7	0.87085
900	12.14	11.36	137.91	0.97	74	71.78	0.87902
1000	14.2	12.85	182.47	1.21	82	99.22	0.86584

Tabla 4.4.

rpm = revoluciones por minuto Im = corriente de entrada (motor), amp.

Vm = voltaje de entrada (motor). We = potencia de entrada

Ia = corriente de salida (alternador), amp. Va = voltaje salida (alternador)

Ws potencia de salida, watts Ea = eficiencia del alternador

La eficiencia del alternador en este caso fue de aproximadamente del 87% para 800 rpm que es la velocidad de trabajo del motor de pistones de vapor.

Al realizar la medición de la eficiencia del alternador se observó que el primotor se calentaba debido a que la velocidad de operación nominal del alternador era mucho menor que la del primotor, 800 rpm por 3600 respectivamente; al aplicar carga se calentaba más el primotor y conforme el calentamiento aumentaba su eficiencia bajaba. Esto hace sugerir el trabajar con un primotor que tenga una velocidad de operación cercana a la del alternador para poder obtener información más confiable.

Eficiencia del Ciclo Rankine.

La eficiencia del Ciclo Rankine real se calcula con la ecuación 2.12:

$$\eta_{\text{ciclo Rankine real}} = \frac{3600}{m_s (h_2 - h_4)} \eta_{\text{mec motor}}$$

Con los datos siguientes :

$$m_s = 68.18 \text{ kg / kW-h.}$$

$$h_2 = 2759.4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 105.03 \text{ kJ/kg (agua a } 25^\circ\text{C)}$$

$$\eta_{\text{mec motor}} = 85 \%$$

La eficiencia de ciclo Rankine real abierto resultó de 2.34 %

Presión de entrada bar	Temp. de entrada °C	h_2 vapor kJ/kg	h_4 agua kJ/kg	mv kg/h	rpm	Potencia al freno (kW)	ms kg/kW-h	Eficiencia ciclo Rankine real abierto
5.4	160	2752.5	105.03	60	950	0.85579	70.111	2.27%
5.4	160	2752.5	105.03	60	950	0.85579	70.111	2.27%
5.9	155	2756.3	105.03	60	800	0.81005	74.070	2.16%
4.2	150	2740.4	105.03	60	750	0.78037	76.887	2.08%
6.1	160	2759.4	105.03	60	900	0.84217	71.245	2.24%
2.8	138	2722.1	105.03	45	850	0.64699	69.553	2.31%
2.4	135	2716	105.03	39	750	0.62325	62.575	2.57%
3.5	140	2733.9	105.03	48	1000	0.72625	66.093	2.43%
4	132	2723.2	105.03	42	850	0.64699	64.916	2.49%
2	126	2706.2	105.03	30	500	0.34567	86.788	1.87%
3.2	140	2737.6	105.03	42	800	0.581	72.289	2.22%
1.4	120	2690.3	105.03	24	650	0.27915	85.975	1.89%
2.1	122	2709.1	105.03	39	1000	0.4993	78.109	2.08%
2	125	2706.2	105.03	36	1050	0.50593	71.156	2.28%
1.8	120	2708.1	105.03	36	930	0.41564	86.613	1.88%
2.2	130	2752.2	105.03	33	900	0.41794	78.959	2.05%
2	120	2706.2	105.03	36	800	0.38547	93.392	1.74%

Tabla 4.5, Resultados de las pruebas de eficiencia del ciclo Rankine real abierto, según la ecuación (2.12). Se supuso una eficiencia mecánica del motor de vapor de 85%, y una temperatura del agua en la entrada de los concentradores de 25°C.

4.6 Eficiencia global solar-electricidad.

Finalmente obtendremos la eficiencia global del sistema. Esta se calculará de dos maneras, la primera es midiendo directamente la potencia solar recibida en los concentradores de canal parabólico y la potencia que entrega el alternador eléctrico. La segunda manera es obteniendo el resultado del producto de cada una de las eficiencias individuales de las principales partes que integran el sistema como son el generador de vapor solar, el motor de pistones de vapor y el alternador eléctrico.



Figura 4.6 Motor de vapor con alternador durante la generación de electricidad.

En el primer caso, según la ecuación 2.22, la eficiencia experimental se presenta en la tabla 4.6, donde se detalla la información correspondiente a varios días de mediciones.

rpm	ALTERNADOR			MOTOR DE VAPOR		Gb kWatt/m ²	Eficiencia global s-e
	Is (amp)	Vs (volts)	Ws	ml/min	m (kg/s)		
758	7.35	52.7	387.345	750	0.0125	0.926	1.18%
630	6.53	42.8	279.484	750	0.0125	0.934	0.85%
690	7.28	51.7	376.376	800	0.0133	0.94	1.08%
732	6.34	51.8	328.412	700	0.0117	0.917	1.01%
621	5.8	44.9	260.42	500	0.0083	0.904	0.93%
776	6.98	50.8	354.584	850	0.0142	0.913	0.96%
862	7.66	56.6	433.556	850	0.0142	0.933	1.17%
552	6.1	38	231.8	750	0.0125	0.923	0.71%
517	4.45	44.2	196.69	700	0.0117	0.82	0.64%
810	7.67	57	437.19	800	0.0133	0.84	1.24%
							0.98%

$$\text{Eficiencia global s-e} = [\text{Potencia eléctrica} / (G_b A_e)]$$

Tabla 4.6 Resultados de las pruebas hechas para conocer la eficiencia global de la termoeléctrica solar.

Para el segundo caso, según la ecuación 2.23, si multiplicamos las eficiencias del generador de vapor solar, del Ciclo Rankine real sin condensador, la mecánica del motor y la del generador de corriente alterna, $(0.38)(0.0234)(0.85)(0.87)$, obtendremos una eficiencia global de 0.7%.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Concentradores de canal parabólico.

La generación de vapor en los concentradores de canal parabólico se logró con éxito. No se presentó flexión durante la doble fase en los tubos absorbedores de cobre al generar vapor directamente.

La eficiencia en la generación directa de vapor en los concentradores de canal parabólico fue del orden de 40 %. Esta eficiencia se vio afectada principalmente por los siguientes factores:

1. El factor de forma del concentrador, ya que la curvatura original sufrió deformaciones, provocando que el foco se alejara del tubo absorbedor, aproximadamente 3 cm, y que parte de la irradiancia reflejada se perdiera.
2. Deterioro en el material reflejante del espejo de segunda superficie, por efecto túnel, que reduce los niveles de irradiancia reflejada (Lentz 1996).
3. El problema de la utilización de tubos absorbedores de cobre es que se reblandecen con el tiempo, perdiendo su dureza original, esto hace que el tubo sea menos rígido y que, en consecuencia, se deforme y pierda su posición original. Esto ocurre principalmente en los extremos de los módulos donde se realiza la unión con mangueras flexibles, mismas que aplican una fuerza lateral que ocasiona la deformación del tubo; también hay flexión a lo largo del tubo, entre soportes, ocasionada por los efectos de la gravedad.

La eficiencia en la generación de vapor sólo considera el vapor generado, dejando a un lado el flujo de agua caliente que sale de la trampa de condensados (trampa de vapor).

5.2 Eficiencia interna del motor de vapor

Según los resultados experimentales, la eficiencia interna del motor crece a medida que baja la presión del vapor en la entrada y que disminuye su velocidad de rotación.

Para comparar la eficiencia interna del motor que se ha encontrado, se toman los datos de una gráfica proporcionada por el fabricante del motor (fig. 4.3); si se trabaja a una presión manométrica de 80 libras/pulgada² (5.5 bar, man) y 800 r.p.m., en la gráfica se encuentra un consumo de vapor de 150 libras/ hora (68.1 kg/h), y a esa misma presión se tienen 2.5 BHP (caballos de fuerza al freno), equivalente a 1.86 KW; en consecuencia, el consumo específico de vapor es de 36.66 kg/kW-h.

Considerando que el motor recibe vapor saturado a 6.5 bar, abs. ($h_2 = 2760$ kJ/kg), y que lo descarga a un bar ($h_3 = 2440$ kJ/kg) y suponiendo una eficiencia mecánica del motor de 85%, mediante la ecuación (2.15) resulta una eficiencia interna de 36% para el motor de pistones de vapor.

Con respecto a la eficiencia interna del motor de vapor, resultante de las pruebas bajo condiciones similares, ésta fue de 19.4 %. Si se compara ésta con la eficiencia obtenida con los datos del fabricante, 36 %, esta última es casi del doble, lo que sugiere se revise dicho motor; es posible que sus válvulas no operen correctamente.

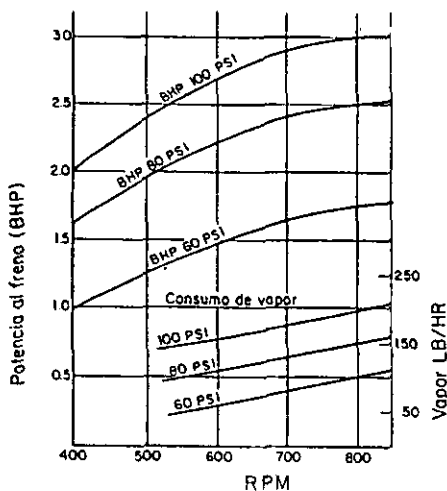


Figura 4.3 Curvas de comportamiento del motor de vapor Stuart Swan, cuando opera a nivel del mar y descarga el vapor a la atmósfera (elaboradas por el fabricante).

El motor de pistones de vapor requiere para su operación de una lubricación abundante con aceite mineral, el cual llega a mezclarse con el vapor formando una emulsión que puede observarse en el escape del motor; es por tal motivo que el ciclo está abierto, ya que de no ser así se presentarían incrustaciones en toda la tubería y en los equipos que intervienen en el proceso que transforma los rayos solares en potencia mecánica.

5.3 Ciclo Rankine abierto y con condensador

A continuación se hace el cálculo de la eficiencia de ciclo Rankine ideal abierto, bajo las mismas condiciones que se tuvieron en las pruebas. Se supone que el vapor de escape se condensa en la atmósfera y que se obtiene agua a 25°C.

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se obtiene mediante la determinación de W_{Bomba} , W_{motor} y q_{ent} , Véase la figura 2.6:

$$p_2 = 6.5 \text{ bar}, p_3 = 0.75 \text{ bar}, m = 0.0125 \text{ kg/s}$$

$$h_2 = 2759.4 \text{ kJ/kg} \quad s_2 = 6.7663 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$s_2 = s_3 = 6.7663 = 1.213 + (7.4557 - 1.2130)x_3$$

$$x_3 = 0.889 \quad h_3 = 2409.6 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 104.82 \text{ Líquido a } 0.75 \text{ bar y subenfriado a } 25^\circ\text{C}$$

$$W_{\text{Bomba}} = v_4 (p_1 - p_4) = (0.001003) (650 - 75) = 0.58 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = h_4 + W_{\text{Bomba}} = 104.82 + 0.58 = 105.4 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{motor}} = (h_2 - h_3) = (2759.4 - 2409.6) \quad W_{\text{motor}} = 349.8 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{neto}} = W_{\text{motor}} - W_{\text{Bomba}} = 349.8 - 0.58 = 349.22 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{ent}} = h_2 - h_1 = (2759.4 - 105.3) \quad q_{\text{ent}} = 2654.1 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{ciclo Rankine ideal abierto}} = W_{\text{neto}}/q_{\text{ent}} = 349.22 / 2654.1$$

$$\eta_{\text{ciclo Rankine ideal abierto}} = 13.21 \%$$

Como se tiene vapor a baja presión y muy cercano a la línea de saturación, el trabajo que se puede realizar en el expansor es muy pequeño, por lo que la eficiencia del ciclo Rankine en estas condiciones suele ser baja. Aunado a lo anterior, como el ciclo es abierto se está tirando a la atmósfera el vapor que sale del motor. Parte de ese calor podría utilizarse para calentar el agua que se alimenta a los concentradores.

Si se compara la eficiencia del ciclo Rankine ideal abierto con la eficiencia del ciclo Rankine real (también abierto), de 13.21% y 2.34% respectivamente, podemos decir que hay posibilidades de obtener una mejor eficiencia .

En seguida se cuantifica el efecto que puede tener un condensador en la eficiencia de los ciclos Rankine ideal y real.

La eficiencia térmica del ciclo Rankine ideal con condensador se obtiene mediante la determinación de W_{Bomba} , W_{motor} y q_{ent} , (véase la figura 2.6).

$p_2 = 6.5 \text{ bar}$, $p_3 = p_4 = 0.074 \text{ bar}$. temperatura de condensación de 40°C .

$$h_2 = 2759.4 \text{ kJ/kg} \quad s_2 = 6.7663 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$s_2 = s_3 = 6.7663 = 0.5725 + (8.2570 - 0.5725) x_3$$

$$x_3 = 0.8060 \quad h_3 = 2107.4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = 167.6 \text{ kJ/kg} \quad \text{Líquido saturado a } 40^\circ\text{C}.$$

$$W_{\text{Bomba}} = v_4 (p_1 - p_4) = (0.001008) (650 - 7.4) = 0.60 \text{ kJ/kg}$$

$$h_1 = h_4 + W_{\text{Bomba}} = 167.6 + 0.60 = 168.2 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{motor}} = (h_2 - h_3) = (2759.4 - 2107.4) \quad W_{\text{motor}} = 652 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{neto}} = W_{\text{motor}} - W_{\text{Bomba}} = 652 - 0.60 = 651.4 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{\text{ent}} = h_2 - h_1 = (2759.4 - 168.2) \quad q_{\text{ent}} = 2591.2 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta_{\text{ciclo Rankine ideal con condensador}} = W_{\text{neto}}/q_{\text{ent}} = 651.4 / 2591.2$$

$$\eta_{\text{ciclo Rankine ideal con condensador}} = 25.14 \%$$

La eficiencia del ciclo Rankine real con condensador calculada con la ecuación 2.9, despreciando el trabajo de la bomba y con una eficiencia interna del motor de 19.4% , un trabajo ideal del motor de 652 kJ/kg, resulta ser de 4.88%. Esta es la eficiencia que podría obtenerse al añadir un condensador y cerrar el ciclo.

La potencia del motor eléctrico de la bomba es de 3hp. Aunque se requiere una potencia mucho menor, se utilizó este motor porque no se contaba con otro que tuviera un variador de velocidad para controlar el gasto.

El trabajo isoentrópico de la bomba en el ciclo abierto es de:

$$W_{\text{Bomba}} = (0.0125)(0.58)X 1000 = 7.2 \text{ watts}.$$

5.4 Eficiencia global de la planta.

La diferencia entre la eficiencia solar-electricidad medida directamente (0.9%, tabla 4.6) y la eficiencia solar-electricidad resultante del producto de cada una de las eficiencias de los elementos que intervienen (0.7%), puede deberse a los errores acumulados en las mediciones. Si bien no es exactamente el mismo resultado, la diferencia es pequeña. Además las condiciones de operación que se muestran en la tabla 4.6, no son idénticas a las que se presentaron al evaluar las eficiencias individuales de los componentes del sistema.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

La generación del vapor directamente en los concentradores solares permitió confirmar que la flexión de los tubos absorbedores es ocasionada por gradientes térmicos que provocan esfuerzos en las paredes de dichos tubos. Si el material es acero, el problema de la flexión es mayor, mientras que en el tubo de cobre se reduce, no rompiendo la envolvente de vidrio; para evitar dicha flexión se han propuesto nuevos diseños de tubos bimetalicos que trabajen con doble fase para generar vapor directamente.

Una de las razones de la baja eficiencia del ciclo Rankine es que el motor recibe vapor saturado o muy cercano a la curva de saturación, por lo que el trabajo en el expansor es pequeño. Se podría mejorar sobrecalentando más el vapor y aprovechando el calor latente de condensación del vapor que sale del motor, del cual se podría utilizar aproximadamente el 20% para precalentar el agua que reciben los concentradores; el resto del calor que se necesita eliminar puede ser aprovechado en otro proceso que requiera calor, como puede ser la destilación de agua.

La utilización de una turbina puede ser la solución para cerrar el ciclo ya que ese expansor requiere una lubricación mínima, además, el aceite de lubricación no se mezcla con el vapor, como ocurre en el motor de pistones.

Al utilizar una turbina, se puede instalar también un condensador y por consiguiente cerrar el ciclo, y mejorar su rendimiento.

La eficiencia del alternador eléctrico que se acopló directamente al motor de pistones de vapor resultó de 87%, a una velocidad de 800 r.p.m.

La eficiencia de la planta termosolar es del orden del 1%, lo que quiere decir que de cien unidades de energía radiante recibida se obtiene una unidad de energía eléctrica, que puede ser utilizada para diferentes necesidades. Esta eficiencia es muy baja si se compara con la eficiencia de las celdas fotovoltaicas comerciales (10%).

La comisión Federal de Electricidad (CFE) se muestra interesada en aumentar la calidad del vapor que sale de pozos geotérmicos mediante la utilización de concentradores de canal parabólico. Ante dicha inquietud se ve la posibilidad de realizar estudios del comportamiento del agua salobre en dos fases, en los tubos absorbedores con generación directa de vapor.

RECOMENDACIONES

Es conveniente revisar el motor de pistones de vapor ya que, según los datos del fabricante, debería estar proporcionando el doble de la potencia que actualmente entrega en su flecha.

Es recomendable cambiar el motor de pistones de vapor por otra máquina con mayor eficiencia interna; dicho dispositivo podrá mejorar la eficiencia de todo el ciclo y por consiguiente hacer más eficiente la generación solar-electricidad.

Es conveniente cerrar el ciclo para aprovechar el calor del vapor que sale del expansor, y recuperar el condensado de la trampa de vapor y de las purgas, ya que el calor se utilizaría para calentar el agua de entrada a los concentradores, evitando desperdicios.

En una etapa posterior, si se desea la generación eléctrica durante las 24 horas del día, será necesario añadir al sistema una caldera de gas, en paralelo al campo de concentradores, para sustituirlos durante la noche. Dicha caldera podrá funcionar en serie durante el día para el mejor control de los transitorios solares y con esto se tendrá vapor de buena calidad durante todo el tiempo en que se produzca electricidad.

Es necesario buscar mejores espejos que tengan una alta reflejancia (mayor a 86%) y que ésta perdure por lo menos diez años, además de soportar los esfuerzos que pudiesen provocar su ruptura.

Para mejorar la eficiencia óptica en el campo de concentradores es necesario cambiar de lugar el tubo absorbedor para situarlo en el nuevo foco, debido a la deformación que, con el paso del tiempo, ha tenido la parábola, y con esto captar la irradiancia que se ahora pierde.

REFERENCIAS

1. Almanza R., Muñoz F. 1994, Ingeniería de la Energía Solar. El Colegio Nacional, México.
2. Almanza R., Lentz A. y Jiménez G., 1997, Receiver behavior in direct steam generation with parabolic troughs, Solar Energy, Vol. 67 No. 4 pp. 275-278.
3. Almanza R., Lentz A., 1998, Electricity production Selected Proceedings of ISES 1997. Vol. 64 No. 1-3 pp.115-120.
4. Almanza R., Lentz A., Santiago L., Valdés A., 1998, Some experiences on electricity production at low powers with DSG using parabolic troughs, 9th International Symposium o Solar Thermal Concentrating Technologies, Font-Romeu-Odello, Francia (en prensa)
5. Boer K., 1997, Advances in Solar Energy, an Anual Review of Research and Development, American Solar Society Inc, EEUU, Vol. 11, pp. 390-392.
6. Burghardt M., 1984, Ingeniería Termodinámica, Editorial Harla, Segunda edición, México.
7. Campbell C y Laherrère J., 1998, The End of Cheap Oil, Scientific American, pp. 60-65.
8. Chapman S., 1987, Máquinas eléctricas, Mc Graw Hill, México
9. Correa G., 1997, Espejos Solares para plantas fototérmicas. Tesis, Facultad de Ingeniería UNAM.
10. Duffie J. y Beckman, 1991, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons.
11. Duffie J. y Beckman W., 1991. Solar Engineering of Thermal Proceses, (2nd edition), Wiley, New York, EEUU.
12. Herrman U. Y Lippke F., 1998, The influence of transtients on the desing of DSG solar fields, 9th International Symposium Solar Thermal Concentrating Technologies, Odello Francia.
13. International Energy Agency, 1994, Solar Thermal Power and Solar Chemical Energy Systems, SolarPACES, Birmingham UK.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

-
14. Jimenez G., Lentz A., Alamnza R., Valdés A. y Soria A., 1999, Thermal Gradient Variations on a Steel Receiver of a Parabolic Trough Concentrator When a Two Phase Flow Starts for DSG, Solar Energy. (en prensa)
 15. Lentz A, 1996, Generación de vapor y electricidad en una planta termosolar. Tesis, ENEP Aragón, UNAM.
 16. Rabl A., Bendt. y Gaul H., 1982, Optimization of Parabolic Trough Solar Collector, Solar Energy, Great Britain, Vol. 29 No.5.
 17. Severns W. H., Degler H. E. and Miles J. C., 1954, Steam, air and gas power. 5^o Edition , John Willey & Sons, New York.
 18. Trieb F., Langnib O. Y Klaib H., 1997, Solar Electricity Generation-A Comparative View of Technologies, Costs and Environmental Impact. Solar Energy, Vol. 59, No. 1-3, pp 89-90.
 19. Winter D., Sizmann R. Y Vant-Hull L., 1991, Solar Power Plants, Fundamentals, Technology, Systems Economics, Springer-Verlag, EEUU.