



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN

NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS

**DISEÑO DE UNA CENTRAL DE GENERACIÓN DE  
ENERGÍA ELÉCTRICA CON COLECTORES SOLARES**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Presenta:

**Christian Piña Ramírez**

Asesor de Tesis: **Doctor en Ciencias de Instrumentación y Control**

**Gilberto Gonzalez Avalos**

Morelia Michoacán. Octubre del 2013



## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi familia por el apoyo incondicional que me han dado, no sólo en cuestiones académicas, sino en todo lo que hago en la vida. Porque cuando me he encontrado en momentos difíciles, ellos han estado ahí para ser el apoyo que necesito para seguir adelante. A ellos les debo los logros que he obtenido.

A mi hermano, con quien he vivido momentos agradables y otros no tanto, pero a pesar de todo siempre me apoya en todo lo que hago.

A mis amigos y compañeros de la Facultad, con los que compartí experiencias y momentos que hicieron que mi tiempo como estudiante fuera más ameno y agradable.

A mi asesor el Dr. Gilberto Gonzáles Avalos por el tiempo y la paciencia que me dedico durante la realización de este proyecto, sobre todo por transmitirme un poco de su conocimiento para poder culminar mi carrera como Ingeniero Electricista.

¡Gracias a Todos!

# Resumen

El objetivo de este proyecto es hacer un diseño de una central de generación de energía eléctrica con colectores en México, con la finalidad de conocer los principales componentes de una central de generación de este tipo, así como la cantidad de colectores necesaria para producir cierta cantidad de potencia eléctrica.

Se hace el estudio del recurso solar en México, seleccionando la zona más viable para obtener mayor cantidad de energía solar y a partir de este recurso se diseña la central de generación.

Se mencionan las principales partes de la central, entre ellas el sistema de almacenamiento térmico, el cual garantiza el funcionamiento de la central ante la ausencia del sol.

Además se dan los antecedentes de las aplicaciones del uso de la energía solar, y los principales colectores utilizados hoy en día.

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. La energía solar . . . . .	1
1.2. Objetivo . . . . .	2
1.3. Justificación . . . . .	2
1.4. Metodología . . . . .	3
1.5. Estructura de la Tesis . . . . .	3
<b>2. ANTECEDENTES DE GENERACIÓN CON COLECTORES SOLARES</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción . . . . .	5
2.2. La Energía Solar . . . . .	6
2.3. Aprovechamiento de la Energía solar . . . . .	10
2.4. Historia del uso de colectores solares . . . . .	11
2.5. Tipos de colectores desarrollados . . . . .	14
2.5.1. Colectores no concentradores . . . . .	15
2.5.1.1. Colectores planos (FPC) . . . . .	15
2.5.1.2. Colectores parabólicos compuestos (CPC) . . . . .	16

2.5.1.3.	Tubos de vacío (ETC) . . . . .	17
2.5.2.	Colectores concentradores . . . . .	18
2.5.2.1.	Reflector lineal Fresnel . . . . .	20
2.5.2.2.	Helióstato (también conocidos como Sistema de Receptor Central) . . . . .	21
2.5.2.3.	Disco Parabólico . . . . .	23
2.5.2.4.	Colector cilindro-parabólico . . . . .	24
<b>3.</b>	<b>UNA CENTRAL DE GENERACIÓN CON COLECTORES SOLARES</b>	<b>27</b>
3.1.	Introducción . . . . .	27
3.2.	Central Termoeléctrica con vapor seco suministrado por una caldera . . . . .	29
3.3.	Central Termoeléctrica con una combinación de colectores solares-sobrecalentamiento . . . . .	33
3.4.	Central Termoeléctrica con una combinación de colectores solares-sobrecalentamiento CASO II . . . . .	36
3.5.	Flujo de calor suministrado al generador de vapor . . . . .	37
<b>4.</b>	<b>DISEÑO DE UNA CENTRAL TÉRMICA SOLAR</b>	<b>38</b>
4.1.	Introducción . . . . .	38
4.2.	Central térmica solar con Helióstatos y almacenamiento Térmico	39
4.3.	Central térmica solar con PTC y almacenamiento Térmico . .	45
4.4.	Ejemplo de diseño de una central Termosolar en México . . .	48
4.4.1.	Selección de la ubicación . . . . .	49

4.4.2.	Selección del colector . . . . .	53
4.4.3.	Selección del tubo receptor . . . . .	55
4.4.4.	Fluido de trabajo . . . . .	57
4.4.5.	Sistema de seguimiento solar . . . . .	58
4.4.6.	Sistema de Almacenamiento Térmico . . . . .	61
4.4.7.	Dimensionado del campo de colectores . . . . .	64
4.4.8.	Cálculo del caudal de aceite Therminol VP-1 por cada fila de colectores en el punto de diseño . . . . .	65
4.4.9.	Cálculo del incremento de temperatura del aceite en cada colector. . . . .	67
4.4.10.	Número de colectores en cada fila del campo solar . . .	71
4.4.11.	Cálculo del número de filas paralelas necesario . . . .	72
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>75</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>78</b>

# Índice de figuras

2.1. Radiación Solar . . . . .	8
2.2. Medidores de Radiación . . . . .	9
2.3. Colectores solares usados en Maadi Egipto . . . . .	13
2.4. Colector solar plano . . . . .	16
2.5. Colector parabólico compuesto . . . . .	17
2.6. Diagrama esquemático del tubo de vacío . . . . .	18
2.7. Diagrama esquemático de un campo de colectores lineales Fresnel	20
2.8. Campo de colectores lineales Fresnel con dos torres y espejos intercalados . . . . .	21
2.9. Campo de Helióstatos con receptor central . . . . .	22
2.10. Colector Disco Parabólico . . . . .	23
2.11. Diagrama esquemático del colector cilindro-parabólico . . . . .	25
3.1. Diagrama de la Central Termoeléctrica . . . . .	29
3.2. Esquema del generador de vapor . . . . .	33
3.3. Diagrama de los colectores y el generador de vapor . . . . .	34
4.1. Diagrama de una central de generación directa de vapor mediante helióstatos. . . . .	39

4.2. Central de generación con almacenamiento térmico. . . . .	40
4.3. Planta Solar II . . . . .	44
4.4. Diagrama de la central Andasol 1 . . . . .	45
4.5. Planta de Generación Andasol 1 . . . . .	48
4.6. Radiación Solar en el Mundo . . . . .	49
4.7. Radiación solar en México . . . . .	50
4.8. Estados con mayor radiación solar . . . . .	51
4.9. Ubicación idónea para una Central Termosolar . . . . .	52
4.10. Colector SKAT-EL 150 de Flagsol . . . . .	54
4.11. Tubo receptor . . . . .	55
4.12. Sistema de seguimiento solar . . . . .	59
4.13. Mecanismo de motores hidráulicos . . . . .	60
4.14. Sensor de seguimiento solar . . . . .	61
4.15. Diagrama de una central con almacenamiento térmico . . . . .	63

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. La energía solar

Debemos considerar que actualmente la mayor parte de la generación de energía térmica en el mundo está basada en hidrocarburos provenientes del petróleo, carbón y gas natural cuyas reservas probadas permitirán satisfacer la demanda sólo para algunos años. Aunque hubiera suficientes recursos fósiles para cubrir la creciente demanda, el siguiente problema que tenemos que tomar en cuenta es la contaminación, específicamente las altas emisiones de  $\text{CO}_2$  que produce el “*efecto invernadero*” entre otros, que afectan seriamente nuestro ecosistema[7].

Uno de los recursos más abundantes en la superficie de la tierra es la luz solar. Sin embargo, normalmente no pensamos en este recurso como la solución a una futura crisis energética, o como el "combustible" que traerá aire limpio para nuestras ciudades.

Entonces, surge la pregunta de cómo podemos aprovechar la energía solar de manera que pueda ser utilizada en los centros industriales y poblaciones del mundo, donde la mayor parte de la energía es requerida. Esta pregunta ha motivado la búsqueda de métodos para convertir la energía de la luz solar en un combustible que se puede utilizar para diferentes fines, destacando la generación de energía eléctrica [8].

## **1.2. Objetivo**

El objetivo de esta tesis es analizar la eficiencia y la factibilidad para la implementación de una central de generación de energía eléctrica, mediante el uso de colectores solares concentradores y el generador de vapor convencional usado en las centrales termoeléctricas. Dichos colectores son cilindro-parabólico.

El objetivo principal es obtener las características de diseño de una central, como son el número y el tipo de colectores a utilizar para la implementación de este tipo de tecnología en el país México. Además de analizar las ventajas de la utilización de un sistema de almacenamiento térmico en este tipo de centrales térmicas-solares.

## **1.3. Justificación**

La justificación del presente trabajo es aumentar la utilización de la energía solar para la producción de energía eléctrica, disminuyendo los costos económicos de producción, y sobre todo, disminuyendo la contaminación que se produce con los sistemas de generación convencionales.

Si bien las fuentes renovables de energía tienen gran potencial económico, sin olvidar desde luego su bajo impacto ambiental, hasta la fecha no han sido ampliamente explotadas y comercializadas. Esto se debe principalmente al costo de inversión relativamente alto para desarrollar estas tecnologías, además, estos sistemas no han tenido amplia aceptación debido a la intermitencia y requerimientos de almacenamiento de energía por lo que es común que se opte por fuentes convencionales, sin embargo, un punto que se debe tener en mente es el costo de operación ya que estas tecnologías no presentan consumo de combustible para su operación, y en caso de que se tenga consumo, es mínimo.

La energía solar por sí misma es gratuita e ilimitada, por lo tanto, el reto es diseñar sistemas de captación y aprovechamiento que transformen esta energía con sistemas que sean económicos, confiables y fácilmente operables.

## **1.4. Metodología**

En primer lugar se realiza una investigación de diferentes fuentes bibliográficas sobre historia y conceptos de los colectores solares, además se ilustran los diferentes tipos que existen mediante imágenes.

Posteriormente se realizan los cálculos para el diseño de una central de generación de energía eléctrica usando colectores solares, usando colectores acoplados a un generador de vapor convencional. Además, se dan las características de diseño para la implementación de una central de generación de energía eléctrica en México, dichas características de diseño son obtenidas también de diferentes fuentes bibliográficas, como trabajos de tesis de otros países, artículos y páginas de empresas que se dedican a vender productos para centrales Termosolares.

## **1.5. Estructura de la Tesis**

Este trabajo de tesis se compone de 5 capítulos en los cuales se describe el uso de la energía solar térmica, así como el diseño de una central de generación con colectores cilindro-parabólicos.

El primer capítulo de esta tesis es el correspondiente a la introducción, en el cual se mencionan los objetivos, justificación y metodología para realizar este trabajo.

En el segundo capítulo se mencionan los antecedentes de generación de energía eléctrica con colectores solares. Aquí se dan algunas de las definiciones de energía solar. Se mencionan algunas de las primeras y principales aplicaciones de la energía solar en la historia para la generación de energía eléctrica, así como también se mencionan cada uno de los colectores solares usados actualmente.

En seguida, en el capítulo 3 se trata del análisis de la eficiencia de una central de generación termoeléctrica convencional, así como la eficiencia de una central con colectores solares usando una etapa de recalentamiento mediante el generador de vapor convencional.

En el capítulo 4 se toman como ejemplos algunas de las centrales Termosolares en operación actuales, para conocer sus detalles de diseño, posteriormente se realiza el cálculo de diseño para una central de 50 MW en México.

Por último en el capítulo 5 se dan las conclusiones de este trabajo.

# Capítulo 2

## ANTECEDENTES DE GENERACIÓN CON COLECTORES SOLARES

### 2.1. Introducción

La energía procedente del Sol se ha utilizado, directa o indirectamente, desde hace siglos en numerosas actividades como son la agricultura, arquitectura, industria, etc. Desde épocas muy antiguas se usaba la energía del sol para producir fuego y hasta fue usada por el hombre para defender su territorio. También se ha utilizado la energía de los rayos del sol para producir vapor y mover maquinaria, es aquí donde surge la idea de utilizar la energía solar para producir energía eléctrica.

En este capítulo se habla sobre los primeros, y más significativos avances en la historia de la utilización de la energía del sol, los cuales son la base de los colectores solares que se han mejorado y se siguen utilizando en la actualidad para diferentes fines como la calefacción de agua y la generación de energía eléctrica, por mencionar algunas aplicaciones. También se da una explicación de cómo es aprovechada la energía solar por el hombre y la diferencia que existe entre los tipos de aprovechamiento como lo es la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica, que aún que ambas aprovechan la energía del sol como fuente primaria de alimentación, sus procesos para transformar la energía solar son totalmente diferentes y se usan en diferentes y muy variadas aplicaciones.

El objetivo principal de cualquier sistema térmico solar es captar la energía que proviene del sol para transformarla y transportarla de la manera más económica y eficaz posible. Las aplicaciones del aprovechamiento solar pueden ser directas, en forma de calor, o bien indirectas, utilizando este calor para obtener trabajo mecánico en un eje y finalmente electricidad.

Para aprovechar la energía del sol se utilizan diferentes tipos de colectores solares, que aunque todos ellos usan el mismo principio de funcionamiento, sus características son diferentes, tales como la forma geométrica en que están contruidos y las temperaturas a las que trabajan, dependiendo de la aplicación deseada.

## 2.2. La Energía Solar

El sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente que tiene un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  m y se encuentra a una distancia promedio de  $1.5 \times 10^{11}$  m de la tierra. Visto desde la Tierra, el sol gira sobre su eje aproximadamente una vez cada 4 semanas. Sin embargo, el sol no gira como un cuerpo sólido; el ecuador tarda cerca de 27 días y las regiones polares tardan cerca de 30 días por cada rotación.

El sol tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 °K, la temperatura estimada en la región central interior varía de  $8 \times 10^6$  a  $40 \times 10^6$  °K (ya que no se tiene el dato exacto) y la densidad estimada es aproximadamente 100 veces la del agua [2].

La energía total que emite el sol es  $3.8 \times 10^{20}$  MW lo cual es equivalente a  $63 \text{ MW/m}^2$  en la superficie del sol. Esta energía irradia al exterior en todas direcciones. Pero sólo una pequeña fracción del total de la energía que irradia el sol intersecta en el planeta tierra y son  $1.7 \times 10^{14}$  KW.

El sol, de manera directa o indirecta, es el origen de todas las energías renovables, a excepción de la energía mareomotriz y la geotérmica. La energía del sol se desplaza a través del espacio en forma de radiación electromagnética, una parte de esta energía llega al planeta Tierra entrando por la atmósfera. De esta energía que llega a la Tierra una parte es absorbida por la atmósfera y por el suelo, y otra parte es reflejada directamente al espacio desde el suelo. Por esta razón menos de la mitad de la radiación solar llega efectivamente a la superficie terrestre y a los objetos en ella situados. Por lo tanto, la parte que entra a la superficie de la tierra es la que podemos utilizar para fines energéticos en nuestro planeta. La radiación solar llega a nuestro planeta de tres formas distintas:

- Radiación directa: Es la energía que llega directamente del sol, sin haber incidido con nada anteriormente y sin haberse desviado ni reducido su intensidad, esta radiación es la que produce las sombras y es el tipo de radiación predominante en un día soleado.
- Radiación Difusa: Es la radiación que llega después de haber incidido con cualquier elemento de la atmósfera (polvo, nubes, contaminantes, etc.), por lo que ha cambiado de dirección. Es el tipo de radiación predominante en un día nublado.
- Radiación reflejada o albedo: Es la radiación reflejada por la superficie terrestre; Este tipo de radiación es más notable en sitios con nieve, con agua (como cerca del mar o de una presa) o cualquier otra zona donde la reflexión sea importante.

A la suma de la radiación directa y la radiación difusa se le llama **Radiación global**. [1]

En la figura 2.1 se muestran los diferentes tipos de radiación solar y como se desvía la radiación al incidir en los objetos situados en la tierra, además se observa un sistema de captación solar el cual aprovecha toda la energía solar que incide en él, ya sea directa, difusa o reflejada.

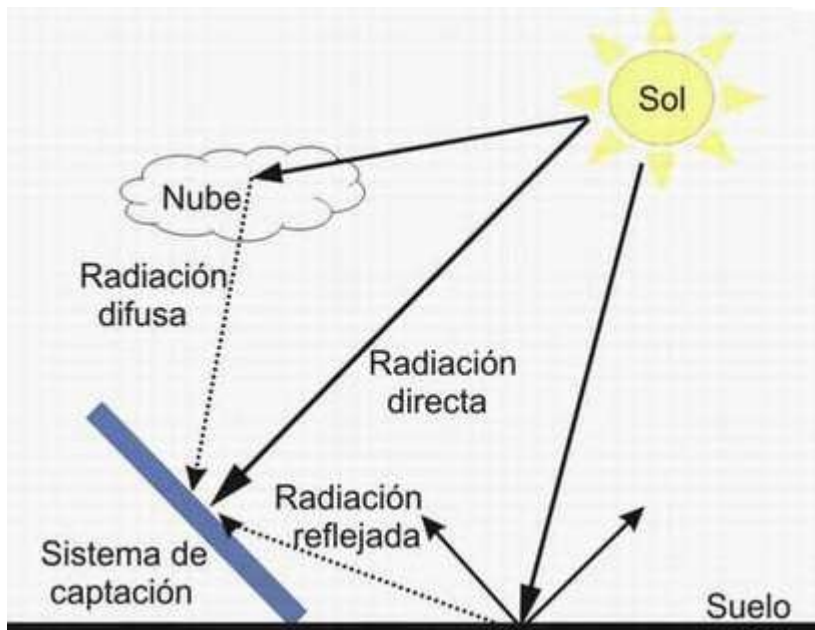


Figura 2.1: Radiación Solar

Para medir la radiación solar que llega a la superficie terrestre se utilizan los siguientes instrumentos:

- Piranómetro: que mide la radiación global o la difusa, según se le ponga un anillo de sombra (difusa) o no (global).
- Pirheliómetro: que mide la radiación directa.
- Pirgeómetro (o albedómetro): que mide la radiación reflejada o albedo.

En la figura 2.2 se muestran los instrumentos antes mencionados que se utilizan para medir la radiación solar.



Figura 2.2: Medidores de Radiación

Es posible estimar algunos valores aproximados de radiación solar. Aunque son un sustituto imperfecto de los valores medidos, en ocasiones son los únicos valores que pueden ser obtenidos. La fórmula (2.1) calcula la radiación directa normal asumiendo un cielo despejado:

$$G_{normal} = 910 \text{ Sen } y + 0.25 (910 \text{ Sen } 2y) \quad (2.1)$$

donde:

$G_{normal}$  es la Radiación directa normal

$y$  es la altitud del sol sobre el plano horizontal

La radiación solar que incide sobre una superficie se expresa comúnmente en dos formas distintas: como **irradiación** o como **exposición radiante**.

La irradiación es una medida de la tasa de energía recibida por unidad de superficie, expresada en Watts sobre metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

La exposición radiante es una integral de tiempo, o suma de irradiación. Así, un minuto de exposición radiante es una medida de la energía recibida por un metro cuadrado durante un minuto, o lo que es lo mismo, 1 minuto de exposición radiante = irradiación ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) x 60 segundos. El resultado se expresa en unidades de Joules sobre metro cuadrado ( $\text{J}/\text{m}^2$ ), Watts-hora por metro cuadrado ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ ) o kiloWatts-hora sobre metro cuadrado ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ).

El **Watt-hora sobre metro cuadrado** ( $\text{Wh}/\text{m}^2$ ) es una unidad que equivale a la energía desarrollada por 1 Watt recibido en un metro cuadrado de superficie durante una hora. Si tenemos que  $1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$ , y  $1\text{ hora} = 3,600$  segundos, entonces:  $1\text{Wh}/\text{m}^2 = (1\text{J}/\text{s} * 3600\text{s}) / 1\text{m}^2 = 3,600 \text{ J}/\text{m}^2$ [3].

### **2.3. Aprovechamiento de la Energía solar**

En la actualidad el sol es aprovechado energéticamente de dos formas que son conceptualmente diferentes:

1. Como fuente de calor, la cual es energía solar térmica de baja y media temperatura.
2. Como fuente de electricidad: que es energía solar fotovoltaica y solar térmica de alta temperatura.

La diferencia entre la energía solar fotovoltaica y la energía solar térmica es la siguiente:

#### **a) Energía solar fotovoltaica**

La energía solar se puede transformar directamente en energía eléctrica mediante celdas fotovoltaicas. Este proceso se basa en la aplicación del efecto fotovoltaico que se produce al incidir la luz sobre algún tipo de material semiconductor, y dependiendo de la cantidad de luz que incida en el material se produce un flujo de electrones y este es aprovechado para obtener la energía eléctrica, esta energía es típicamente corriente directa (CD) y se puede transformar a corriente alterna utilizando inversores.

## **b) Energía solar Térmica**

La radiación se capta y el calor es transferido a un fluido (normalmente agua). Para aprovechar la energía solar térmica se utilizan los colectores solares o captador solar. Dependiendo de la temperatura alcanzada por el fluido a la salida, las instalaciones de energía solar térmicas se dividen en tres grupos:

1. Baja temperatura. Son las más usadas y se usan en aplicaciones que no exigen temperaturas del fluido superiores a 90 °C. Algunas aplicaciones son: la producción de agua caliente sanitaria para viviendas, calefacción de agua para piscinas, apoyo a la calefacción de viviendas, entre otras.
2. Media temperatura. Son destinadas para aplicaciones que exigen temperaturas que van desde los 80 °C y hasta 250 °C. Por ejemplo, el calentamiento de fluidos para procesos industriales y la desalinización de agua de mar.
3. Alta temperatura. Destinada a aquellas aplicaciones que requieran temperaturas del agua superiores a los 250 °C como es el caso de la generación de vapor para la producción de energía eléctrica con generadores de vapor (usados en las centrales termoeléctricas) [1].

### **2.4. Historia del uso de colectores solares**

El uso de la energía solar mediante el principio de los colectores solares se remonta a épocas muy antiguas.

Arquímedes construyó una especie de espejo metálico cóncavo formado por cientos de escudos pulidos, dicho espejo concentraba la energía solar en un punto para quemar las naves romanas en el mar.

Las primeras aplicaciones de la energía solar fueron mediante el uso de colectores concentradores, los cuales son por naturaleza de construcción y la necesidad de un sistema de seguimiento de sol, resultó ser más complicado usarlos.

Durante el siglo XVIII fueron construidos hornos solares capaces de fundir el hierro, el cobre y otros metales. Estos hornos estaban hechos de metal pulido y lentes de vidrio. Su uso se extendió en Europa y el medio oriente destacándose un horno diseñado por el científico francés Antonie Lavoisier que alcanzo una temperatura de 1750 °C.

Durante el siglo XIX August Mouchot construyó y operó algunos motores de vapor usando energía solar, esto entre los años 1864 y 1878. Sin embargo, el gobierno francés consideró que este invento no era factible por ser demasiado costoso. Mouchot también construyó un avance notable en diseño de colectores solares, ya que construyo uno en forma de cono truncado.

En 1901 A.G. Eneas instaló un colector concentrador de 10 m de diámetro el cual proporcionaba energía a un aparato de bombeo de agua en una granja en California. El dispositivo estaba formado de 1788 espejos alineados en la superficie la cual era como una gran “sombriilla” abierta e invertida (como una antena parabólica) los rayos del sol eran concentrados en el foco de la parábola donde se colocaba una caldera, el agua dentro de la caldera se calentaba hasta convertirse en vapor que a su vez alimenta un motor convencional y una bomba centrífuga.

En 1912 Schuman fundó su empresa Sun Power Co en 1911, creando su primera planta solar en Tacony, Estados Unidos, generando un total de 20 KW. Después de esto y en colaboración con Charles Vernon Boys abrió su siguiente planta solar en Maadi Egipto, en 1912, pero este sistema fue puesto en operación hasta 1913, esta planta estaba construida de colectores cilindro-parabólicos que concentraban la energía del sol en un tubo largo y absorbente de calor. Cada colector medía 62 m de largo, y el área total de varios colectores colocados fue 1200 m<sup>2</sup>. La energía conseguida con esta planta iba de 37 a 45 KW continuamente por un periodo de 5 horas. Sin embargo, la planta fue destruida en 1915 debido a la primera guerra mundial y a la competencia de fuentes de energía más baratas que empezaron a utilizarse en aquella época [4].

En la Figura 2.3 se muestra colector cilindro-parabólico usados para producir vapor en la planta de generación construida por Schuman en Maadi Egipto.

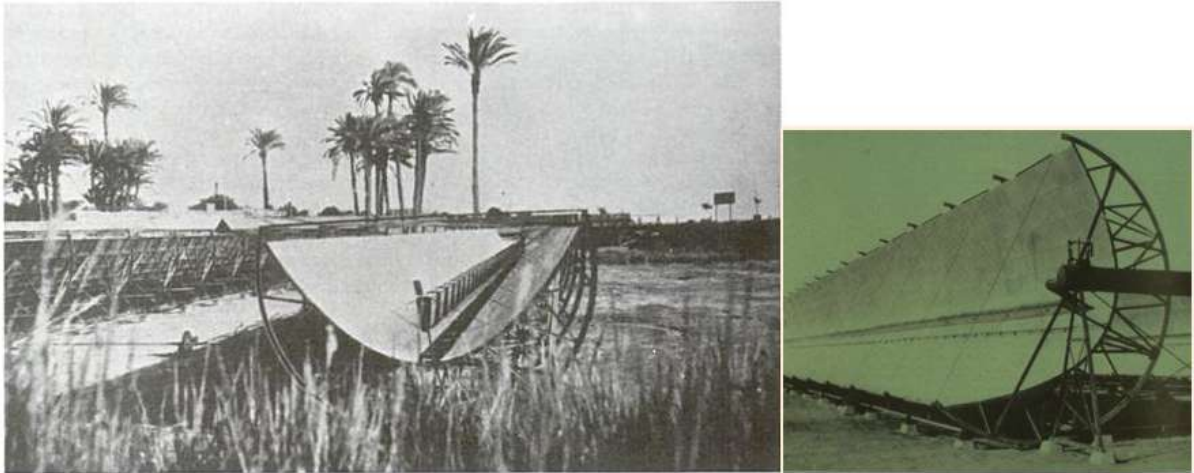


Figura 2.3: Colectores solares usados en Maadi Egipto

En los últimos 30 años ha habido variados intentos por utilizar de manera eficiente los colectores parabólicos para generar energía eléctrica. Advaco Corporation produjo un disco parabólico de 11 metros de diámetro, el cual ocupaba un motor Stirling en su foco para generar electricidad. El conjunto disco motor tuvo el record histórico en eficiencia de conversión de energía solar en eléctrica, el cual fue de 31 %. Sin embargo, el proyecto fue cerrado debido a los altos costos del colector y de mantenimiento.

Otra conocida planta solar existía en Shenandoah, Georgia. Esta planta contaba con 114 colectores parabólicos, los cuales totalizaban un área de colección de 4352 m<sup>2</sup>. Fue diseñada para generar 450 kW y su eficiencia final fue de 17 %. Debido a sus altos costos de instalación y mantenimiento, el proyecto fue concluido en 1990.

Sandia National Laboratories en EEUU y Almería en España son dos centros de investigación donde se pueden encontrar aplicaciones experimentales del conjunto disco parabólico-Motor Stirling, sin embargo, no se le ha dado un uso comercial aún.

Durante los últimos 50 años se han diseñado muchas variantes y mejoras en la construcción de colectores concentradores. Todas concentran la energía de los rayos del sol en un punto, transmitiendo esta energía a un fluido para calentarlo y posteriormente alimentar un sistema mecánico [4].

## 2.5. Tipos de colectores desarrollados

Como se mencionó en la sección 2.3 existen colectores solares fotovoltaicos para transformar la energía del sol en energía eléctrica directamente aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores, sin embargo, en esta sección se abordan sólo los tipos de colectores para aplicaciones térmicas.

Los colectores solares son un tipo especial de intercambiadores de calor los cuales transforman la energía de la radiación solar en energía interna de un medio de transporte. El componente más importante en un sistema solar es el colector, este dispositivo el cual absorbe la radiación solar que incide sobre él, convirtiéndola en calor, para después transferir este calor a algún fluido que circula a través del colector (normalmente aire, agua o aceite). Una vez que el fluido alcanza su máxima temperatura a través del colector solar es llevado directamente hacia algún tipo de equipo especial para ser utilizado (tal es el caso de la turbina en la generación de energía eléctrica), o es almacenado en algún tanque especial para ser usado posteriormente.

La razón entre el área de intercepción ( $A_{ac}$ ) y el área de absorción ( $A_f$ ) es conocida como la razón de concentración de un colector solar ( $C$ ) y es una propiedad intrínseca de cada uno de ellos, y se define como:

$$C = \frac{A_{ac}}{A_f} \quad (2.2)$$

Existen básicamente dos tipos de colectores solares: Colectores no concentradores y colectores concentradores estacionarios. El colector solar no concentrador tiene la misma área de intersección y de absorción de energía solar (con una razón de concentración  $C=1$ ), mientras que los colectores solares concentradores normalmente tienen una superficie reflectora cóncava para interceptar y concentrar en un punto los rayos de energía del sol, y de este modo aumentar el flujo de radiación que incide sobre el fluido [4].

### **2.5.1. Colectores no concentradores**

Los colectores no concentradores pueden ser diseñados para aplicaciones que requieran temperaturas bajas de aproximadamente  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y no necesita de un sistema de seguimiento solar y requieren de poco mantenimiento. Este tipo de colectores son mecánicamente más simples que los colectores concentradores. La aplicación más común de este tipo de colectores es la calefacción de agua de uso doméstico. Además, estos sistemas son en ocasiones híbridos, ya que casi siempre son usados con apoyo de otros tipos de energía como la eléctrica, ya que la energía solar no siempre está disponible, y esto puede ocasionar un paro en el servicio que se ofrece [2].

En esta categoría se tienen los siguientes tipos de colectores:

1. Colectores planos (FPC)
2. Colectores parabólicos compuestos (CPC)
3. Tubos de vacío (ETC)

#### **2.5.1.1. Colectores planos (FPC)**

La abreviación de FPC es por su nombre en inglés (flat-plate collector). Un colector solar plano es mostrado en la figura 2.4. Cuando la radiación solar pasa a través del vidrio cobertor e incide sobre la superficie absorbente, una gran cantidad de esta energía es absorbida en el plano de absorción y después transferida directamente al fluido dentro de los tubos (comúnmente agua), y este fluido después es almacenado u ocupado. Las partes inferiores y laterales

del colector deben estar muy bien aisladas del medio externo para reducir las pérdidas por conducción. Los tubos están conectados entre ellos en ambos extremos por tubos de mayor diámetro (tubo principal).

El vidrio cobertor es usado para reducir las pérdidas por convección en el plano de absorción, ya que aísla el aire estancado entre la superficie de absorción del medio ambiente. Este vidrio también reduce las pérdidas por radiación del colector, de tal forma que, es transparente a longitudes de onda corta provenientes desde el sol, pero es opaco a las longitudes de onda largas emitidas por la superficie de absorción. Este tipo de colectores está usualmente fijo y no necesita de un sistema de seguimiento de sol. Para obtener una mayor eficiencia, este tipo de colectores deben estar orientados en dirección norte e inclinados en un ángulo igual a la latitud del lugar que va desde  $10^\circ$  a los  $20^\circ$ , dependiendo de la aplicación y de la estación del año [4].

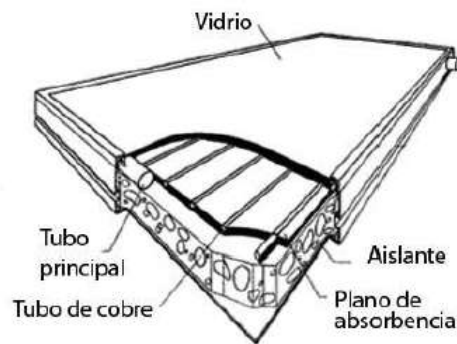


Figura 2.4: Colector solar plano

Los colectores solares planos han sido construidos en una gran variedad de diseños y de muchos materiales diferentes. Todos han sido utilizados para calentar fluidos como agua o inclusive aire. Los materiales más frecuentemente usados para los colectores planos son el cobre, aluminio y acero inoxidable.

### 2.5.1.2. Colectores parabólicos compuestos (CPC)

La abreviación para este tipo de colectores viene de su nombre en inglés Compound parabolic collectors (CPC). Estos colectores tienen la capacidad de reflejar y absorber la radiación solar que incide en todos sus límites. Usando

múltiples reflexiones internas, cualquier radiación que entre en la apertura del colector y con el ángulo de captación del colector ( $\theta_c$ ), esta radiación incide en la superficie de absorción que se encuentra situada en el fondo del colector. Este colector puede tomar diferentes configuraciones, entre ellas puede ser plano o cilíndrico como el que se muestra en la figura 2.5. En la figura 2.5 se observa que las partes inferiores del colector (AB y BC) son circulares, mientras que las partes superiores (BD y CE) son parabólicas.

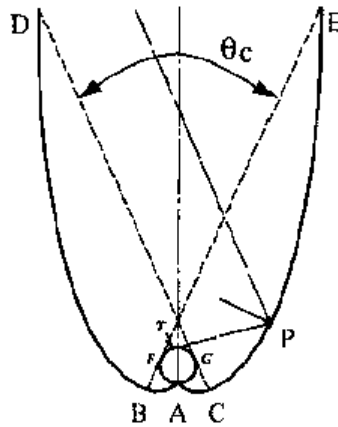


Figura 2.5: Colector parabólico compuesto

Estos colectores normalmente son cubiertos con vidrio para evitar que entre polvo o cualquier otro material que pueda entrar en el colector y afectar su funcionamiento [4].

### 2.5.1.3. Tubos de vacío (ETC)

Evacuated tube collector (ETC) es el nombre que llevan los tubos de vacío en inglés. Estos colectores solares consisten en un tubo de calor dentro de un tubo sellado al vacío. La envoltura de vacío reduce las pérdidas por convección y conducción, esto hace que este tipo de colectores puedan operar a temperaturas un poco más altas que los colectores planos (FPC).

Los tubos de vacío al igual que los colectores planos, aprovechan la radiación directa y la difusa que incide sobre ellos.

En la figura 2.6 se muestra la imagen del un tubo de vacío individual con sus partes.

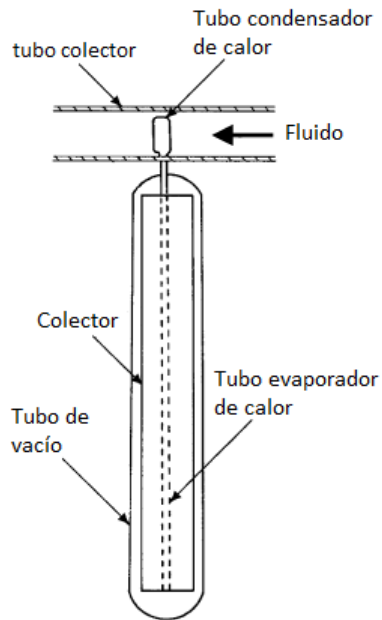


Figura 2.6: Diagrama esquemático del tubo de vacío

Los tubos de vacío como se muestra en la figura 2.6 constan de un conducto o tubo de evaporador de calor (el cual es un conductor térmico de alta eficiencia) situado dentro de un tubo sellado al vacío (colector). El conducto, que es un tubo de cobre sellado y es por donde circula el fluido a utilizar, es posteriormente unido a una conexión de cobre que llena el conducto. En los extremos del conducto se encuentra una punta metálica unida a cada uno de los conductos, esta punta metálica es el condensador [4].

### 2.5.2. Colectores concentradores

La temperatura alcanzada por un colector puede ser incrementada reduciendo el área donde se producen las pérdidas de calor. Se pueden alcanzar temperaturas superiores a las que se obtienen con los colectores planos (FPC) si una gran cantidad de radiación solar es concentrada en una pequeña área

de colección. Esto se logra mediante la interposición de un dispositivo óptico entre la fuente de radiación solar y la superficie de absorción de energía (área por donde circula el fluido). Los colectores concentradores presentan ciertas ventajas con respecto a los concentradores planos convencionales (FPC). Las principales son:

- El fluido de trabajo alcanza temperaturas mayores en un colector concentrador, si se considera que en ambos se toma la misma superficie de colección de calor. Esto significa que se puede lograr una mayor eficiencia termodinámica.
- La superficie reflectora requiere menos material y su estructura es más simple que los colectores planos.
- Dado que la superficie absorbente es relativamente pequeña, y ya que el colector concentrador usa superficies de absorción selectivas, además ocupar tratamiento y zonas de vacío para disminuir pérdidas, estos son alternativas económicamente viables y de mayor eficiencia.

En contra parte también presentan algunas desventajas, las cuales son:

- Los colectores concentradores en gran parte sólo utilizan la radiación directa y de la radiación difusa únicamente aprovechan pequeñas cantidades.
- Es necesario implementar un sistema de seguimiento solar para estos colectores.
- La superficie reflectante del colector puede perder sus propiedades con el tiempo y requiere de limpieza y mantenimiento constante [4].

Muchos diseños han sido considerados para los colectores concentradores. Por ejemplo pueden ser reflectores o refractores, pueden ser cilíndricos o parabólicos y pueden ser continuos o segmentados. Los colectores pueden ser convexos, planos, o cóncavos, y pueden, o no, ser cubiertos con vidrio para reducir pérdidas de calor.

1. Reflector lineal fresnel (linear Fresnel reflector)(LFR)
2. Heliostato
3. Disco parabólico (Parabolic Dish)(PD)
4. Colector cilindro-parabólico (Parabolic through collector)(PTC)

### 2.5.2.1. Reflector lineal Fresnel

Los colectores reflectores lineales Fresnel están constituidos por un campo de espejos lineales, los cuales concentran los rayos solares en un captador fijo que es montado en una torre lineal.

En la figura 2.7 se muestra una representación de los elementos que constituyen un campo de colección con colectores reflectores lineales Fresnel. La gran ventaja que presentan este tipo de colectores es que se pueden usar reflectores planos o elásticamente curvados, lo cual lo hace que su costo sea más bajo comparado con otros tipos como los reflectores parabólicos de vidrio. Adicionalmente, son colocados sobre el piso, lo cual reduce el costo de montaje de estructuras [4].

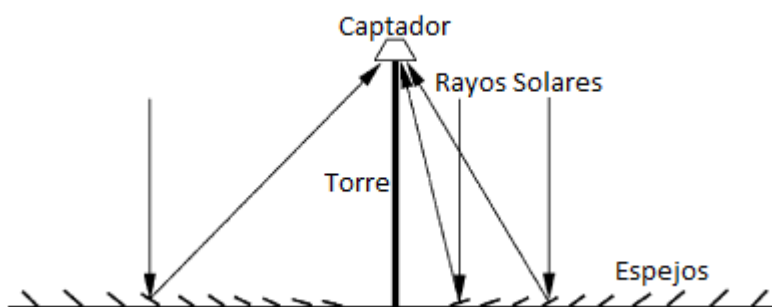


Figura 2.7: Diagrama esquemático de un campo de colectores lineales Fresnel

Una dificultad que se presenta con esta tecnología es que existen bloqueos y se produce sombreado entre cada uno de los reflectores. Para evitar esto y hacer que toda la luz que incide sobre el reflector se proyecte sobre el captador es necesario incrementar la altura de la torre donde se encuentra el captador, lo cual aumenta el costo de este tipo de instalaciones.

Actualmente, se ha diseñado un campo compacto de reflectores lineales Fresnel, en el cual se instalan dos torres, cada una con su respectivo captador en la parte más alta y los espejos son intercalados para evitar sombreado entre ellos. Esto además reduce los costos de instalación en las estructuras haciendo que las torres no sean tan altas.

En la figura 2.8 se muestra el arreglo para un campo de colectores lineales Fresnel con dos torres y los espejos intercalados. Este tipo de arreglo es usado en instalaciones donde el espacio es reducido, además de que cuando se utiliza este tipo de colectores en centrales de generación alta (del orden de los MW). Se instalan varias torres para los captadores y además, si las torres están lo suficientemente cerca, con este tipo de arreglos se tiene la opción de que un sólo espejo pueda reflejar los rayos del sol en más de un captador y así se obtiene mayor eficiencia [4].

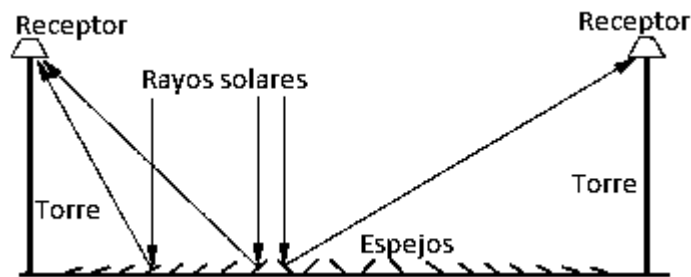


Figura 2.8: Campo de colectores lineales Fresnel con dos torres y espejos intercalados

### 2.5.2.2. Helióstato (también conocidos como Sistema de Receptor Central)

Para obtener muy altos niveles de radiación solar, se coloca un campo formado por varios espejos planos (helióstatos) los cuales reflejan la radiación directa incidente en cada uno de ellos a un punto receptor montado en una torre central. Para concentrar los rayos del sol en la torre central en todo momento cada helióstato es montado en un sistema de seguimiento solar en dos ejes (de altitud-azimut) para buscar la posición óptima entre el colector y el sol y

aprovechar la mayor cantidad de energía posible a lo largo del día y durante las estaciones del año.

En la figura 2.9 se muestra el diagrama esquemático de un campo de heliostatos y la manera en que reflejan la radiación solar al punto receptor de calor.

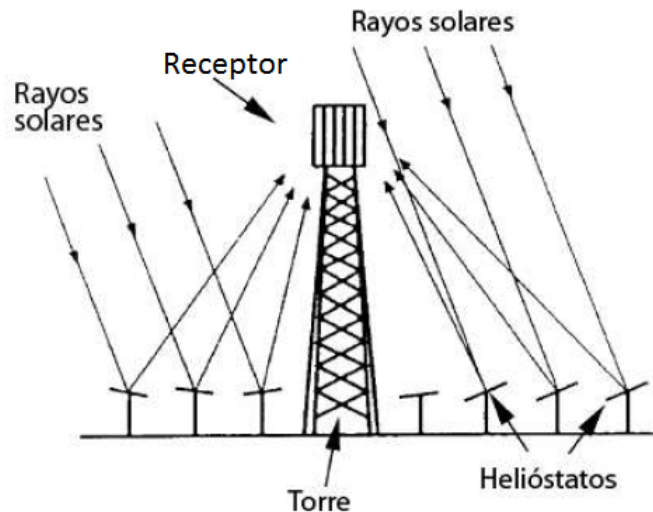


Figura 2.9: Campo de Heliostatos con receptor central

Mediante el uso de segmentos de espejo ligeramente cóncavas en los heliostatos, una gran cantidad de energía térmica es captada en el receptor. Esta energía de calor concentrada y absorbida por el receptor se transfiere a un fluido circulante que puede ser almacenado y utilizado posteriormente para producir energía eléctrica. Este fluido (normalmente agua) es transformado en vapor a alta presión y temperatura.

Se estima que en promedio el flujo de rayos solares que incide sobre el receptor alcanza valores desde 200 y hasta 1000 KW/m<sup>2</sup>. Este flujo de energía solar permite obtener temperaturas relativamente altas de más de 1500 °C. Este tipo de sistemas de colectores son usados en plantas de generación de energía eléctrica que alcanzan una escala hasta de algunos cientos de MW de capacidad [4] [5].

### 2.5.2.3. Disco Parabólico

Este tipo de colectores concentra la energía solar en un receptor situado en el foco de la parábola que forma el disco en su superficie. En la figura 2.10 se muestra esquemáticamente, un colector parabólico con todas sus partes.

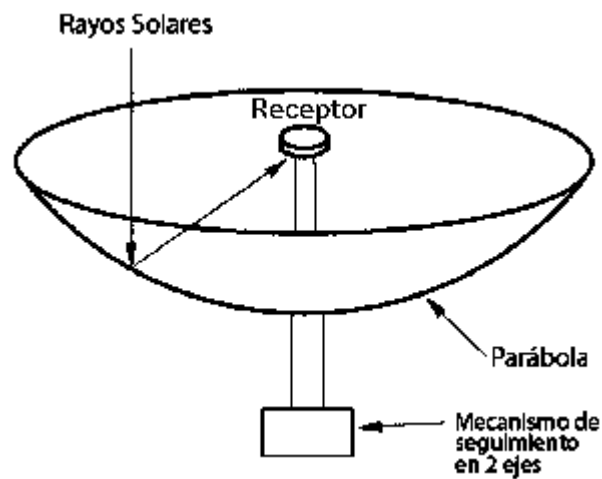


Figura 2.10: Colector Disco Parabólico

Este colector debe estar siempre orientado hacia el sol ya que la radiación incidente en él se concentra en su foco. Por ello, debe seguir al sol en sus dos grados de libertad (altitud y azimut). Esto quiere decir, que debe seguir al sol a lo largo del día y a lo largo de las estaciones del año.

El receptor colocado en el foco, absorbe la energía en forma de radiación solar y la transforma en forma de energía térmica para calentar un fluido circulante. La energía térmica presente en el fluido puede ser convertida a electricidad mediante el uso de un generador colocado directamente en el foco, o puede ser transportada a través de tuberías a un receptor central y posteriormente ser usada para generación de energía eléctrica o para otra aplicación. Los discos parabólicos pueden alcanzar temperaturas superiores a los 1500 °C [4].

Los colectores parabólicos tienen ventajas importantes con respecto a otros colectores [4]:

- Debido a que siempre están apuntando al sol, son el sistema de concentración solar más eficiente.
- El colector, por sus características de operación puede ser usado de manera independiente o ser parte de un campo de colectores.

La necesidad de hacer circular el fluido de transferencia de calor a través del campo de colectores presenta algunos problemas de diseño de la instalación, tales como tuberías de distribución, sistemas de bombeo, y las pérdidas térmicas [4].

#### **2.5.2.4. Colector cilindro-parabólico**

Una de las características más importante de los colectores cilindro-parabólicos (PTC) es que pueden lograr altas temperaturas y con una alta eficiencia. Estos colectores son construidos mediante una tecnología muy sencilla y de bajo costo. Estos pueden ser usados en un amplio rango de temperaturas para aplicaciones que van desde los 50 °C, y hasta hasta los 400 °C.

Estos colectores se construyen doblando una hoja de lámina de material reflectante, de tal forma que la superficie de la lámina quede en forma parabólica. Un tubo metálico de color negro, cubierto con un tubo de vidrio para disminuir las pérdidas de calor, es colocado a lo largo de la línea focal que forma la superficie de la lámina.

Cuando la parábola es orientada en dirección directamente hacia el sol, los rayos paralelos incidentes en el colector son reflejados hacia la línea focal (donde se encuentra el tubo receptor).

En la figura 2.11 se muestra el diagrama esquemático del colector PTC con las partes que lo conforman y una vista frontal del tubo receptor de calor.

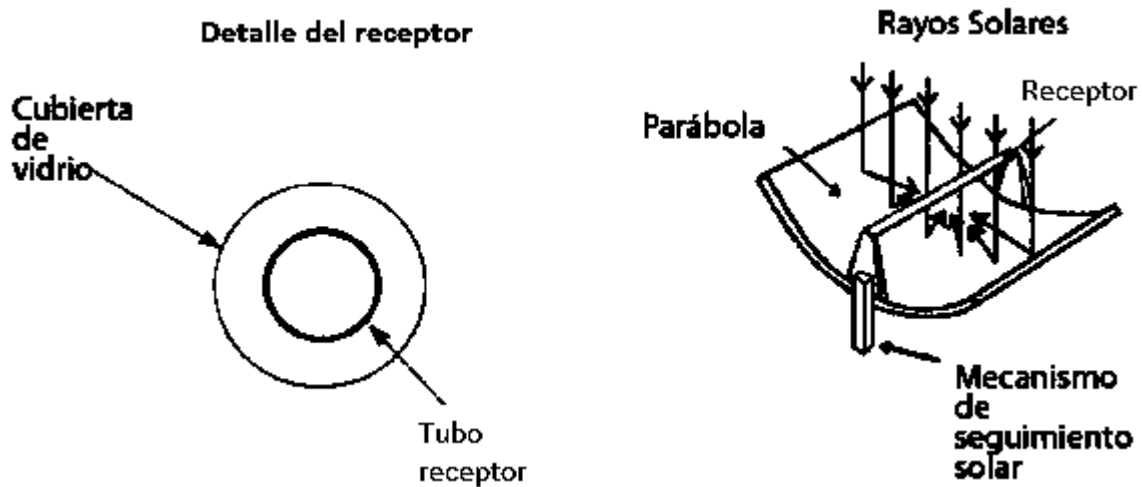


Figura 2.11: Diagrama esquemático del colector cilindro-parabólico

Para el uso de los colectores PTC es suficiente hacer seguimiento solar en un solo eje de dirección. El colector puede ser orientado en dirección Norte-Sur y hacer el seguimiento de sol de Este a Oeste, esto es, un seguimiento de sol a lo largo del día; o también puede ser orientado en dirección Este-Oeste y hacer el seguimiento del sol de Norte a Sur, es decir, a lo largo de las estaciones del año.

Este tipo de tecnología es la más avanzada dentro de las tecnologías solares, debido a la gran experimentación que se ha realizado con ellos y a la formación de un pequeño grupo de industrias comerciales que construyen y venden estos colectores.

Durante el período de un año, un campo de colectores con orientación norte-sur generalmente recoge un poco más de energía que uno con orientación este-oeste. Sin embargo, el campo de norte-sur aprovecha una gran cantidad de energía en verano pero en invierno baja demasiado la cantidad de energía aprovechada. Mientras que el campo de este-oeste recoge más energía en el

invierno que un campo de norte-sur pero recoge un poco menos en verano, proporcionando una producción anual más constante. Por lo tanto, la elección de la orientación general depende de la aplicación y si se necesita más energía durante el verano o durante el invierno.

Las mayores instalaciones de este tipo de sistemas se encuentran en las plantas de generación de energía eléctrica del sur de California conocidas como Solar Electric Generating Systems (SEGS) [4], donde se tiene una capacidad instalada de 354 MW de generación, y otra es en la Plataforma Solar de Almería (PSA) [4] en el sur de España donde principalmente se tiene con fines experimentales, y cuenta con una capacidad instalada de 1.2 MW de generación.

# Capítulo 3

## UNA CENTRAL DE GENERACIÓN CON COLECTORES SOLARES

### 3.1. Introducción

En este capítulo se da una breve introducción del funcionamiento y las partes de una central termoeléctrica. También se plantea analíticamente la eficiencia de una central partiendo de algunos valores de presión y temperatura para una central convencional.

Posteriormente, se analiza la eficiencia del generador de vapor utilizando los colectores solares cilindro-parabólicos en conjunto con el generador de vapor. Para este caso, el vapor obtenido mediante los colectores solares se hace pasar por la caldera para sobrecalentarlo y obtener las condiciones de Presión-Temperatura necesarias para que pueda entrar a la turbina, y así obtener un buen funcionamiento de la central.

Una central de generación termoeléctrica es una instalación completa con el objeto de producir energía eléctrica a través de la combustión de combustibles fósiles, como pueden ser sólidos (carbón), líquidos (gas-oil y fuel-oil, originados en la refinación del petróleo crudo), y gases.

En este proceso primero se quema el combustible para producir energía calorífica, esta energía calorífica se emplea para calentar agua y producir vapor (energía térmica), la energía del vapor se transforma en energía mecánica al pasar por la turbina y hacerla girar. Esta turbina a su vez está acoplada a un generador eléctrico, donde se cumple el objetivo de la central: generar energía eléctrica.

Para una central termoeléctrica todo el equipo es importante, pero se clasifican los equipos principales de acuerdo a su participación en la obtención del objetivo, así como por su tamaño y costo, y son los siguientes:

- a) Generador de Vapor**
- b) Turbina y condensador**
- c) Generador eléctrico**

Para el análisis de la central se utiliza el ciclo termodinámico de Carnot. Mediante el ciclo de Carnot se da una comparación entre el rendimiento real e ideal de una máquina o en este caso la central. Al hacer dicha comparación del rendimiento térmico real con otro ideal, se puede juzgar que tan cerca de la perfección está una máquina real.

El ciclo de Carnot en una central termoeléctrica consiste de dos procesos isotérmicos, que son en la caldera y en el condensador; y dos procesos isoentrópicos que son en la turbina y en la bomba.

Un proceso Isotérmico es aquel en el cual su temperatura es la misma al inicio y al final del proceso (Temperatura constante). Mientras que un proceso Isoentrópico es aquel en el cual la entropía no cambia ni al inicio ni al final (entropía constante).

### 3.2. Central Termoeléctrica con vapor seco suministrado por una caldera

En primer lugar, a manera de diagrama de bloques, la figura 3.1 muestra una central termoeléctrica convencional con el generador de vapor, la turbina conectada al generador eléctrico, el condensador y la bomba.

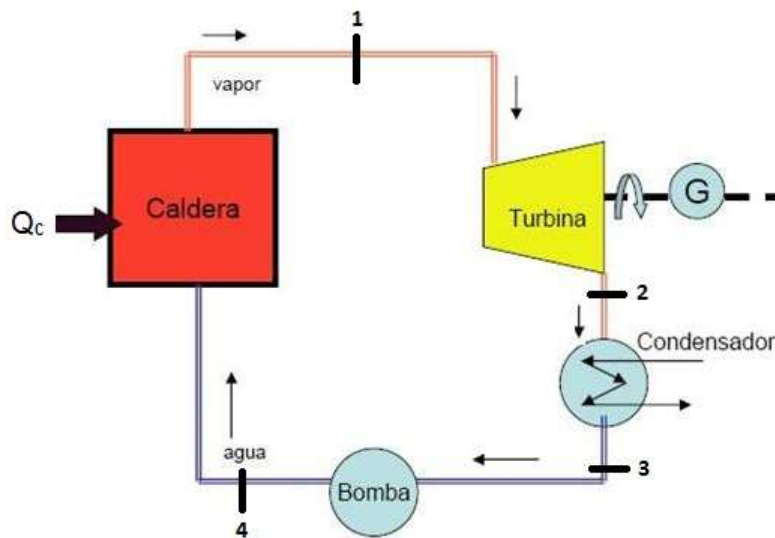


Figura 3.1: Diagrama de la Central Termoeléctrica

Para este primer cálculo se tienen los siguientes datos:

$$P_1 = 30 \text{ bar}$$

Vapor seco

$$P_2 = 0.080 \text{ bar}$$

Utilizando la tabla de las propiedades del agua saturada (tabla de presión) se tienen los siguientes datos de Entalpía (h) y Entropía (S)

$$h_1 = h_g |_{P=30\text{bar}} = 2804.2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$S_1 = S_g |_{P=30bar} = 6.1869 \frac{KJ}{Kg \cdot K}$$

$$hf_2 = 173.88 \frac{KJ}{Kg}$$

$$hfg_2 = 2403.1 \frac{KJ}{Kg}$$

$$Sf_2 = 0.5926 \frac{KJ}{Kg \cdot K}$$

$$Sg_2 = 8.2287 \frac{KJ}{Kg \cdot K}$$

$$Sfg_2 = 8.2287 - 0.5926 = 7.6361 \frac{KJ}{Kg \cdot K}$$

Para calcular el trabajo de la turbina, por ser un proceso isoentrópico, se calcula mediante la diferencia de entalpías en el punto 1 y 2 considerando la figura 3.1, teniendo la siguiente fórmula:

$$W_t = h_1 - h_2 \quad (3.1)$$

Como ya se conoce el valor de  $h_1$  de los datos obtenidos de las tablas, se procede a calcular la entalpía en el punto 2 ( $h_2$ ) mediante la siguiente expresión:

$$h_2 = hf_2 + X_2 hfg_2 \quad (3.2)$$

Para la fórmula (3.2) el valor de  $X_2$  se calcula de la siguiente manera:

$$X_2 = \frac{S_1 - Sf_2}{Sfg_2} \quad (3.3)$$

Al sustituir los valores de entropía obtenidos de las tablas en (3.3) se tiene el siguiente resultado:

$$X_2 = \frac{6.1869-0.5926}{7.6361} = 0.7326$$

Una vez obtenido el valor de  $X_2$  se procede a encontrar el valor de  $h_2$  sustituyendo valores como sigue:

$$h_2 = 173.88 + (0.7326)(2403.1) = 1934.391 \frac{KJ}{Kg}$$

Una vez que se tienen los valores de entalpía en el punto 1 y en el punto 2 se calcula el trabajo en la turbina:

$$W_t = h_1 - h_2 \tag{3.4}$$

Sustituyendo valores en se tiene:

$$W_t = 2804.2 - 1934.391 = 869.809 \frac{KJ}{Kg}$$

Para calcular el calor  $Q_c$  que absorbe la caldera se tiene la siguiente fórmula:

$$Q_c = h_1 - h_4 \tag{3.5}$$

Para este cálculo se desprecia el trabajo de la bomba y se tiene:

$$W_b = 0 \Rightarrow h_4 \cong h_3$$

Del condensador se sabe que:  $P_2 = P_3$  y  $T_2 = T_3$ ; entonces para obtener el valor de  $h_4$  se tiene que  $h_3 = hf_2 = 173.88$  y  $h_3 = h_4$

Sustituyendo valores en la ecuación del calor de la caldera se tiene:

$$Q_c = 2804.2 - 173.88 = 2630.32 \frac{KJ}{Kg}$$

Para el cálculo de la eficiencia en el generador de vapor se usa la siguiente expresión:

$$e_{GV} = \frac{Q_c}{Q} \quad (3.6)$$

Para este caso se tiene que  $Q = Q_c$ ; entonces  $e_{GV} = 1$ :

Por último se calcula la eficiencia total mediante la siguiente fórmula:

$$e = \frac{W_t}{Q_c} \quad (3.7)$$

Sustituyendo valores de trabajo y calor:

$$e = \frac{869.809}{2630.32} = 0.3306 = 33.06 \%$$

Esta eficiencia indica que del total de combustible suministrado al generador de vapor, sólo el 33.06 % se convierte en energía eléctrica generada por la central.

### 3.3. Central Termoeléctrica con una combinación de colectores solares-sobrecalentamiento

Para este problema se analiza de manera individual el generador de vapor para observar las condiciones del vapor que entra a la turbina. Para esto, utilizando los colectores cilindro-parabólicos se obtiene vapor seco, y este vapor se hace pasar por el generador de vapor para el proceso de sobrecalentamiento y posteriormente entrar a la turbina.

En la figura 3.2 se muestra el esquema del generador de vapor y los puntos con los que se va a trabajar que son el 1, y el punto señalado como m.

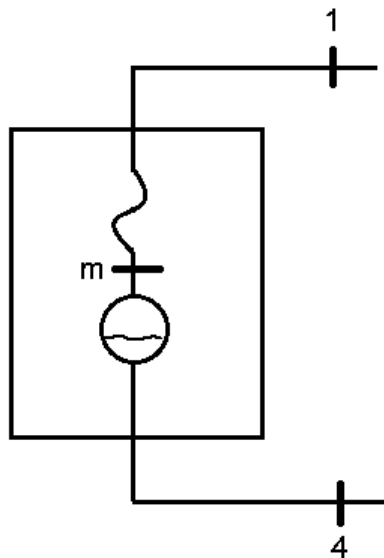


Figura 3.2: Esquema del generador de vapor

La figura 3.3 muestra el diagrama detallado de la conexión del generador de vapor acoplado a los colectores solares, en donde se puede ver que del punto 4 al punto señalado como m son los colectores y del punto m al 1 es la caldera del generador.

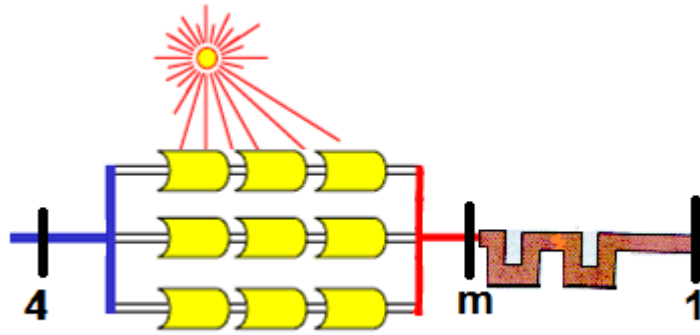


Figura 3.3: Diagrama de los colectores y el generador de vapor

En seguida se muestran los cálculos para obtener la eficiencia del generador de vapor usando los colectores solares. Para esto se tiene que  $T_1=400\text{ }^\circ\text{C}$  y se sabe del ejercicio anterior que  $P_1=30\text{ bar}$ .

Para obtener la eficiencia se utiliza la fórmula usada en el ejemplo anterior:

$$e_{GV} = \frac{Q_c}{Q}$$

Para obtener  $Q_c$ , que es el calor total del generador de vapor, desde el punto 4 y hasta el punto 1, se tiene la siguiente fórmula:

$$Q_c = h_m - h_4 \quad (3.8)$$

Para la solución a esta fórmula se sabe que :

$$h_m = h_g |_{P=30\text{bar}} = 2804.2 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$h_4 = 173.88 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Sustituyendo los valores de entalpía en la ecuación (3.8) se tiene:

$$Q_c = 2804.2 - 173.88 = 2630.32 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

El cálculo de  $Q$  se realiza mediante la diferencia de entalpías del punto 1 al punto 4 como sigue:

$$Q = h_1 - h_4 \quad (3.9)$$

Para este caso se toman los valores de la tabla para vapor sobrecalentado y se obtienen los siguientes datos:

$$T_{\text{sat}} = 233.9 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 3230.9 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$S_m = 6.9212 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

Sustituyendo valores en (3.9) se tiene:

$$Q = 3230.9 - 173.88 = 3057.02 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Por lo tanto, la eficiencia total en el generador de vapor, considerando los colectores solares es:

$$e_{GV} = \frac{2630.32}{3057.02} = 0.8604 = 86\%$$

Esto quiere decir, que del total de vapor producido por el generador de vapor, el 86 % será producido por los colectores, aprovechando la energía proveniente del sol. En tanto que, sólo un 14 % será producido por el generador de vapor convencional mediante la combustión de algún combustible.

### 3.4. Central Termoeléctrica con una combinación de colectores solares-sobrecalentamiento CASO II

Ahora, para el caso II se presenta la solución al caso planteado en el punto 3.3 pero ahora considerando  $T_1=500$  °C y la misma presión de  $P_1=30$  bar.

Como la presión es la misma,  $Q_c$  queda igual y no cambia su valor.

Se obtienen los valores de la tabla de vapor sobrecalentado, pero ahora para 500 °C y se tiene que:

$$T_{\text{sat}}=233.9 \text{ °C}$$

$$h_1 = 3456.5 \frac{KJ}{Kg}$$

se sustituye nuevamente en la ecuacion (3.9) y se tiene que:

$$Q = 3456.5 - 173.88 = 3282.62 \frac{KJ}{Kg}$$

Se obtiene la energía para este valor de Q y queda como sigue:

$$e_{GV} = \frac{2630.32}{3282.62} = 0.8013 = 80.13 \%$$

De este resultado se observa que al aumentar la temperatura del vapor que entra a la turbina a 500 °C la eficiencia de los colectores se reduce un poco, es decir, ahora los colectores entregan el 80.13 % y el generador el otro 19.87 %. Y se observa que si se requieren temperaturas mayores, los colectores empiezan a ser insuficientes para abastecer la potencia necesaria.

### 3.5. Flujo de calor suministrado al generador de vapor

En esta parte se calcula el flujo de calor que se le suministra al generador de vapor mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \dot{m}_v(h_m - h_4) \quad (3.10)$$

Se tienen los siguientes datos:

$$Pot=50 \text{ MW}$$

$$\eta_{tg} = 0.9$$

$$Pot = \dot{m}_v \eta_{tg} W_t \quad (3.11)$$

Para conocer el flujo másico  $\dot{m}$  se despeja de la fórmula anterior y se tiene la siguiente expresión:

$$\dot{m}_v = \frac{Pot}{\eta_{tg} W_t} \quad (3.12)$$

Se conocen todas las variables para el flujo másico y sustituyendo:

$$\dot{m}_v = \frac{50MW}{(0.9)(869.809 \frac{KJ}{Kg})} = 63.871 \frac{Kg}{seg}$$

Una vez obtenido el flujo másico se sustituyen los valores en la fórmula del calor y se tiene que:

$$\dot{Q} = 63.871(2804.2 - 173.88) = 168.006 \text{ MW}$$

Este flujo de calor es el necesario para producir una potencia eléctrica de 50 MW en la central.

# Capítulo 4

## DISEÑO DE UNA CENTRAL TÉRMICA SOLAR

### 4.1. Introducción

Una central térmica solar o central termosolar es una instalación industrial en la que, a partir del calentamiento de un fluido mediante radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, se produce la potencia necesaria para mover una turbina para generación de energía eléctrica como en una central térmica clásica. La conversión de radiación solar se realiza a través de los colectores solares para producir el vapor que entra a la turbina.

Adicionalmente, cuando el uso de los colectores no es suficiente para alcanzar las condiciones para el vapor de presión y temperatura necesarias para entrar a la turbina y tener un funcionamiento óptimo, se interconecta una etapa de recalentamiento, utilizando el generador de vapor convencional usado en las centrales termoeléctricas. Esta etapa es conocida como Etapa de Recalentamiento.

En este capítulo se muestran las dos tecnologías de colectores solares más usadas actualmente para la producción de energía eléctrica en centrales termosolares. Son los colectores cilindro-parabólicos y los sistemas de campo de Helióstatos y torre de potencia central. Y se realiza el diseño para una central de generación de energía eléctrica en México utilizando los colectores cilindro-parabólicos, por ser la tecnología más avanzada para aprovechar la energía solar.

## 4.2. Central térmica solar con Helióstatos y almacenamiento Térmico

Como se mencionó en la sección 2.4.4.2 Las centrales de potencia termosolares de alta temperatura, para la generación de la energía eléctrica a partir de energía solar, mediante un ciclo termodinámico, consisten en general, en un adecuado ordenamiento de espejos, llamados helióstatos, situados sobre un terreno, ordenados y orientados automáticamente, para que en todo momento reflejen la radiación solar directa que incide sobre ellos, en un receptor situado a gran altura sobre el terreno en el que van ubicados los espejos, de forma que toda la energía solar captada sea dirigida directamente hacia la torre central.

La figura 4.1 muestra un sistema básico de torre central con los helióstatos y generación directa de vapor.

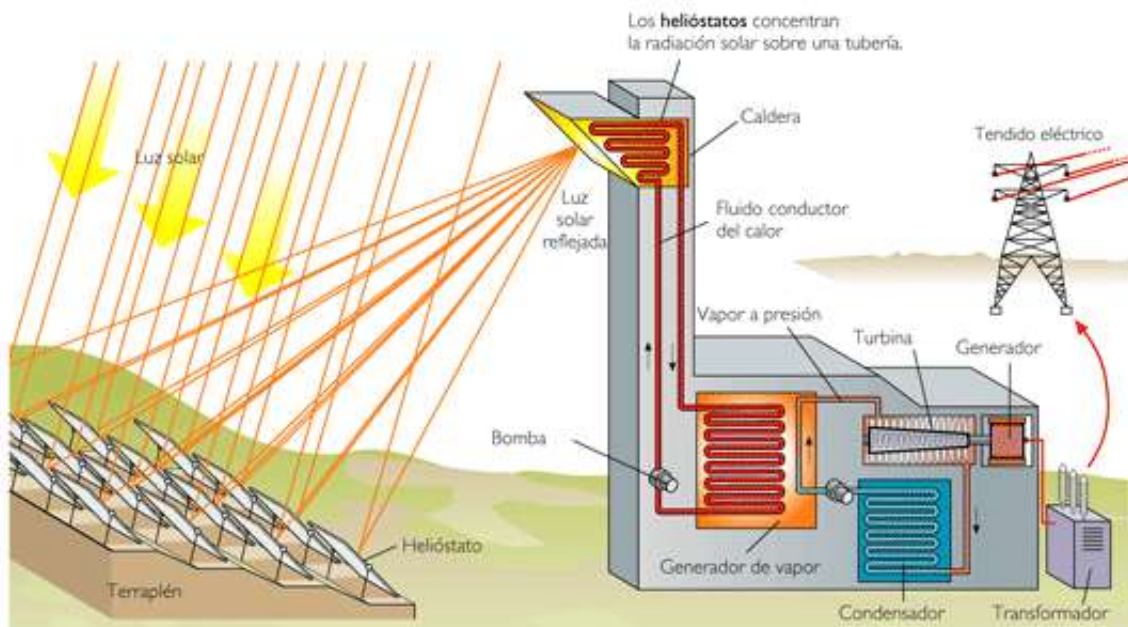


Figura 4.1: Diagrama de una central de generación directa de vapor mediante helióstatos.

Para el diseño del generador de vapor mediante colectores cilindro-parabólicos mencionado en el capítulo anterior, se utilizó un sistema similar al mostrado en la figura 4.1. Donde se obtiene el vapor haciendo circular agua directamente sobre los colectores y posteriormente, el vapor obtenido se envía a una etapa

de recalentamiento en una caldera convencional (quemando algún tipo de combustible). En otros casos el fluido que pasa por los colectores es aceite sintético y posteriormente se hace la transferencia de calor hacia el fluido que se transforma en vapor para entra a la turbina.

Típicamente, cuando se utilizan los helióstatos y la torre central, se utiliza la incorporación de un novedoso sistema de almacenamiento térmico en sales fundidas que permite la producción de electricidad en ausencia de radiación solar [6].

Una planta de generación experimental de 10 MW que usa este tipo de tecnología ha sido implementada en 1996 por el departamento de energía y el consorcio Solar II de investigadores privados, liderados por la Edison California Southern, es conectada a la red y tiene capacidad para abastecer hasta 10,000 casas. El receptor central fue desarrollado por el laboratorio Nacional de Sandia, alcanzando temperaturas hasta de 1050 °F [5].

En la figura 4.2 se muestra el esquema de una central de generación con almacenamiento térmico usando sal. La sal que utiliza esta central tiene una excelente retención de calor y además posee muy buenas propiedades de transferencia de calor.

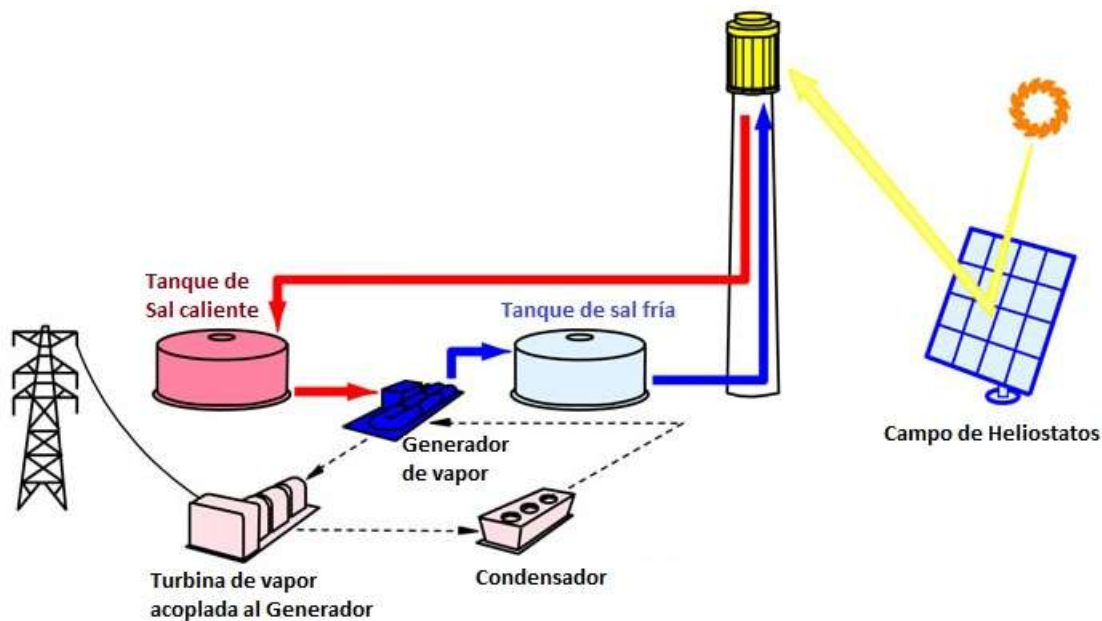


Figura 4.2: Central de generación con almacenamiento térmico.

La sal calentada se almacena en grandes tanques para ser utilizada inmediatamente para producir vapor y generar energía eléctrica, o también puede ser almacenada para usarla durante periodos nublados o bajo la ausencia del sol en la demanda de carga nocturna.

Esta propiedad única de almacenamiento es crucial, ya que cuando la energía solar está disponible es captada y almacenada, y posteriormente es utilizada cuando es requerida. La sal seleccionada por el laboratorio de Sandia para esta planta es de sodio y nitrato de potasio, la cual trabaja en una fase sencilla líquida, sin olor y sin sabor. Además de las altas temperaturas que alcanza, no es costosa y es segura.

Las características de diseño y de operación de la planta de potencia Solar 2 se muestran a continuación.

## **Características de diseño Solar II**

### Lugar

- Desierto de Mojave en California.
- 1949 pies de altura sobre el nivel del mar.
- 7.5 Kwh/m<sup>2</sup>-día promedio anual de insolación.
- 95 acres de tierra.

### Sistema de Almacenamiento Térmico

- Suministro Pitt Des Moines.
- Dos tanques de almacenamiento nuevos de 231000 galones, 38 pies.
- Tanque frío de acero de 25.8 pies de altura, 9 pulgadas de aislante.
- Tanque caliente de acero 30427.5 pies de altura, 18 pulg de aislante.
- 3 horas de almacenamiento en relación a la salida de la turbina.

## Torre

- Re usada de planta Solar.
- 277 pies de altura.

## Helióstatos

- Helióstato de vidrio plateado
- 1818 helióstatos de solar 1, 39.1m<sup>2</sup>, reflectividad de 91 %.
- 108 helióstatos Lug nuevos, 95.1m<sup>2</sup>, reflectividad 93 %.
- 81,000 m<sup>2</sup> de superficie total reflectiva.
- Puede operar en vientos hasta de 35 mph.

## Sal Nitrato-Nitrato de Chilean

- 60 % NaNO<sub>3</sub>, 40 % KNO<sub>3</sub>.
- Temperatura fría 430 °F.
- Temperatura caliente 1100 °F.
- Densidad de almacenamiento de energía 2/3 partes de agua.
- Densidad dos veces que la del agua.
- Inventario de sal 3.3 millones de libras.

## Generador de vapor

- Suministro ABB Lummus.
- Nuevo supercalentador de sal en Shell.
- Nueva caldera de sal en tubo.
- Nuevo precalentador de sal en Shell.

## Turbina-Generador

- Suministro compañía Eléctrica General.
- Reconstruida de planta solar 1, sin etapa de recalentamiento.
- Neto 10 MW.
- 12 MW gross.

## Receptor

- Nueva para la planta solar 2, Cilindro exterior de 24 paneles.
- Suministro Rockwell.
- Relación de potencia térmica 42.2 MW.
- Promedio de flujo 429 suns (429 KW/m<sup>2</sup>).
- Pico de flujo 800 suns.
- 24 paneles, 32 tubos por panel.
- 20 pies de alto y 16.6 pies de diámetro.
- 0.8125 plg de tubo OD.
- 0.049 pies de tubo de pared de anchura.
- Tubos de acero 316H.

## **Características de operación de solar II**

### Ciclo termodinámico

- Temperatura de la sal caliente 1050 °F.
- Temperatura de la sal fría 550 °F.
- Temperatura del vapor 1000 °F.
- Presión del vapor 1450 Lb/plg<sup>2</sup>.

- Relación de flujo de sal del receptor 800,000 Lb/hr.
- Relación de flujo de vapor del generador 660,000 Lb/hr.

### Generador Eléctrico de Potencia

- Capacidad 10 MW.
- Factor de capacidad 20 %.
- Eficiencia solar eléctrica 16 %.
- Costo de conversión de Solar 1, 40M dólares.

La figura 4.3 muestra una vista completa real de la planta Solar II en California.



Figura 4.3: Planta Solar II

### 4.3. Central térmica solar con PTC y almacenamiento Térmico

Para una planta de potencia mediante el uso de colectores PTC (cilindro-parabólicos) y el sistema de almacenamiento térmico se ejemplificarán las características de diseño y operación con la central situada en Granada España Andasol 1. La cual ocupa una superficie de 510,000 m<sup>2</sup> y genera una potencia de 50MW (178,000MWh de energía al año) y cuenta con 28,500 toneladas de sal para acumular calor suficiente como para hacer funcionar las turbinas de vapor durante unas siete horas después de la puesta del Sol [9].

Andasol 1 está ubicada en la altiplanicie de Guadix, en la provincia de Granada, llevan en servicio desde 2008. Flagsol GmbH, empresa tecnológica filial de Solar Millennium AG, ha suministrado los servicios de ingeniería para el campo solar, es decir, el proyectado, el dimensionamiento y el seguimiento, así como la dirección de las obras [10].

La figura 4.4 muestra el diagrama de la central Andasol 1 con colectores cilindro-parabólico y con almacenamiento térmico usando sal.

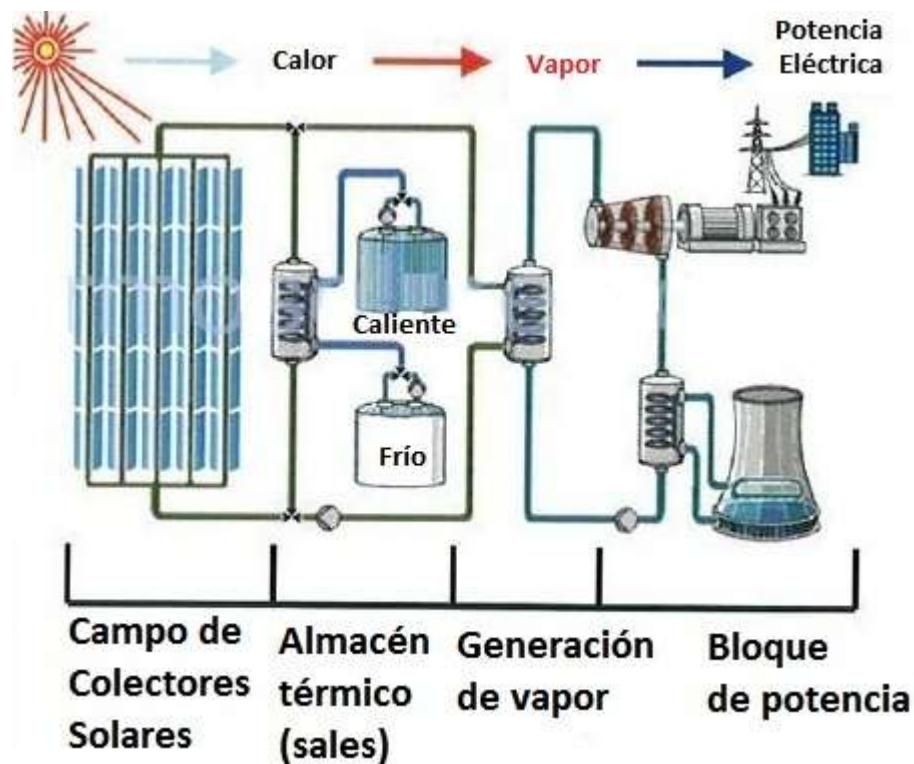


Figura 4.4: Diagrama de la central Andasol 1

Las características de diseño y operación para la planta Andasol 1 son las siguientes [11]:

### Localización

- 10 Km al este de Guadix en el municipio de Aldeire, Provincia de Granada.
- 195 hectáreas de terreno (1,300m x 1,500m).
- Orientado de Norte a Sur.

### Campo de Colectores

- Tecnología cilindro-parabólica SKALET 150.
- Tamaño del campo solar 510,120 m<sup>2</sup>.
- 156 lazos paralelos (4 x 150 m de longitud c.u.).
- 12 sumódulos de 12 m.
- Concentración solar 82:1.
- Superficie reflectante parabólica.
- Tubos absorbedores.
- Estructura metálica de soporte (rigidez, precisión). 14.000 tm.
- Sensores de posición del sol e inclinación.
- Precisión más del 98 % de los rayos.
- Reflectividad de 93 %. Longitud total de los tubos 92 Km.
- Producción anual de vapor por el campo solar 464,703,000 KWh<sub>t</sub>/a.
- Eficiencia anual media de conversión de radiación a vapor 43 %.

### Almacenamiento térmico

- Dos tanques de almacenamiento de sales (t= 36 m, h= 14 m)
- Fluido: 60 % NaNO<sub>3</sub>, 40 % KNO<sub>3</sub>
- Cantidad: 28.500 tm
- Temperatura de fusión: 221 °C
- Rango de trabajo: 291 °C-384 °C.
- Modo de operación: tanque frío/tanque caliente
- Capacidad de almacenamiento (Et): 1010 MWht
- Capacidad de almacenamiento (h): 7,5 h @ 50 MW
- Bombas verticales e intercambiadores sales/fluido térmico.

### Turbina-Generador

- Vapor recalentado 100 bar
- Turbina de condensación con recalentamiento simple y seis extracciones
- Caldera de apoyo a generación. Programabilidad.
- 49.9 MW nominal
- 3,644 horas a plena carga anuales
- 181,831,000 KWh de generación anual.
- Eficiencia media de conversión de radiación a electricidad anual de 16 %.
- Conexión a línea de 400 KV.

En la figura 4.5 se muestra una vista lejana de la planta de generación de energía eléctrica Andasol 1.



Figura 4.5: Planta de Generación Andasol 1

#### 4.4. Ejemplo de diseño de una central Termosolar en México

Para la implementación de una central termosolar en México se comienza por seleccionar el lugar más viable, es decir, con mayor insolación anual. Se seleccionan tanto el tipo de colector, el tubo y el fluido de trabajo a utilizar. Para posteriormente realizar los cálculos necesarios del número de colectores necesarios para un punto de diseño dado.

#### 4.4.1. Selección de la ubicación

México es uno de los 5 países en todo el mundo con mejor radiación solar. Por lo que es viable la instalación de una central de generación Termosolar ya sea con colectores cilindro-parabólicos o sistema de torre central y helióstatos.

Las regiones en el Mundo, en las que estas centrales pueden ser instaladas son las siguientes:

- Sur de África, zona del desierto de Kalahari.
- Países de la cuenca del Mediterráneo (incluyendo el norte de África, Oriente Medio y algunos lugares del sur de Europa).
- Países de la India y Pakistán.
- Partes de Brasil y Chile.
- México y la zona suroeste de EEUU.
- Y en Australia.

Estas regiones antes mencionadas, las cuales cuentan con radiación solar muy alta se muestran en la figura 4.6.

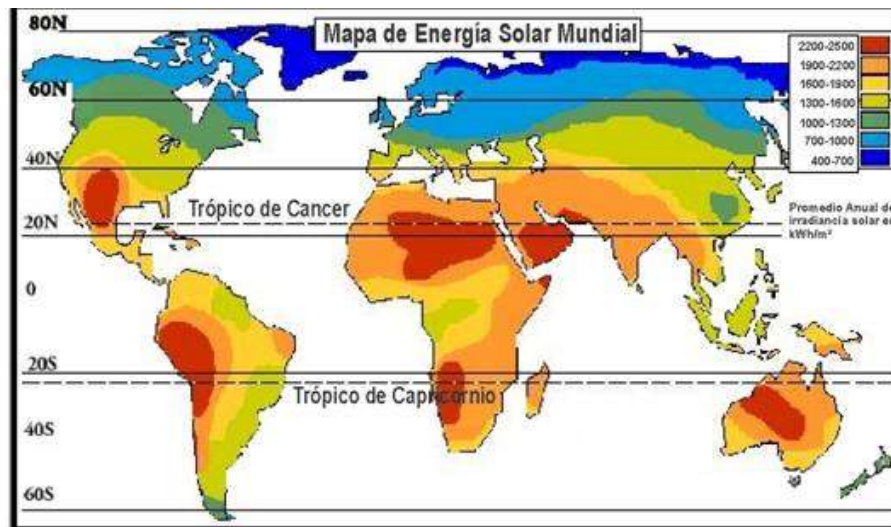


Figura 4.6: Radiación Solar en el Mundo

Analizando nuestro país, México para seleccionar una ubicación idónea para la posible instalación de una central Termosolar, tenemos, tal como se puede apreciar en el mapa de la figura 4.7, la zona del noroeste de México es particularmente idónea para el aprovechamiento de esta tecnología [15].

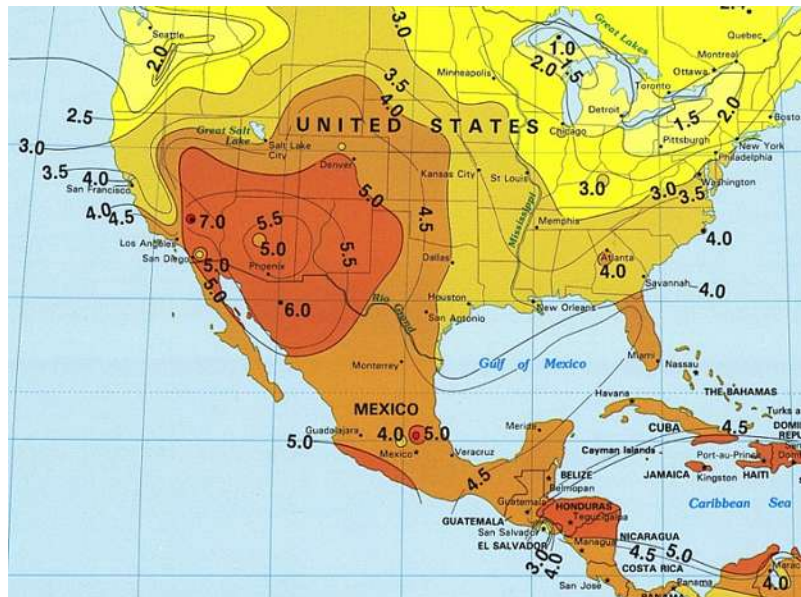


Figura 4.7: Radiación solar en México

La figura 4.8 muestra algunas cantidades en KWh/m<sup>2</sup> para los estados con mayor radiación solar por día en México, donde se observa que estados como Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Zacatecas y Durango, además del estado de Oaxaca, son opciones muy viables para el uso de la tecnología termosolar, ya que presentan las cantidades de insolación más altas en el país [16].

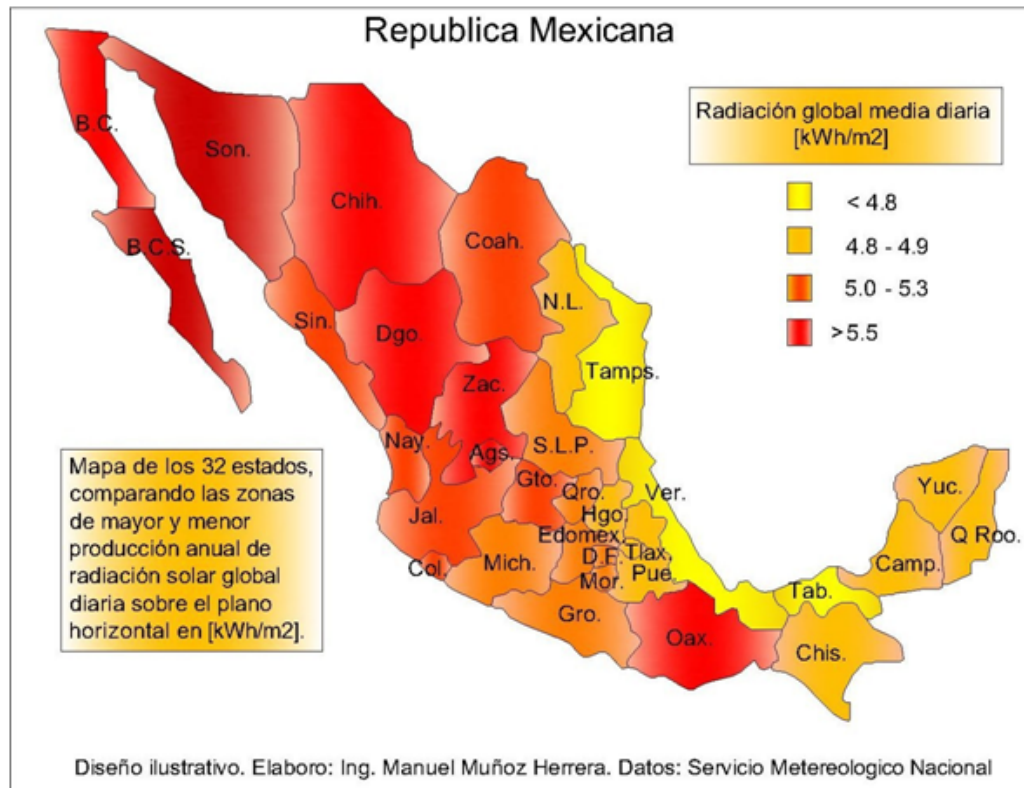


Figura 4.8: Estados con mayor radiación solar

Con datos obtenidos de la tabla de Insolación global media inclinación a latitud en México en kWh/m<sup>2</sup>-Día, los estados de mayor potencial en cuanto a insolación son Chihuahua y Sonora, los cuales alcanzan una insolación máxima hasta de 8.9 y 8.6 kWh/m<sup>2</sup>-Día respectivamente en la capital de cada uno (Chihuahua y Hermosillo) [17].

Sin embargo, para este estudio se considera la zona que cuente con el promedio anual mayor, ya que se tendrá mayor cantidad de radiación solar a lo largo de un año entero. Por el contrario si se tienen cantidades de radiación muy altas pero sólo es en periodos cortos de tiempo, y al obtener el promedio anual se tendrá menos cantidad de potencia solar y con ello se vería reducido el rendimiento de una central Termosolar.

Considerando la tabla 4.1 nuevamente se observa que para Chihuahua, en la parte de Ciudad Juárez, es donde se tiene la mayor radiación promedio anual en el país de México, con los siguientes valores en kWh/m<sup>2</sup>-Día para cada mes del año:

Tabla 4.1 Radiación solar en Ciudad Juárez

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
6	7.2	7.3	7.3	6.9	6.5	6.3	6.5	6.8	7.4	6.6	5.9

Con un promedio anual de 6.7 kWh/m<sup>2</sup>-Día, si este valor lo multiplicamos por los 365 días del año obtenemos una radiación solar anual de 2445.5 kWh/m<sup>2</sup>, una cantidad muy buena para el uso de la tecnología termosolar.

Por lo tanto para este estudio, la ubicación seleccionada para la posible instalación de una central Termosolar es en Ciudad Juárez, Chihuahua, con coordenadas 31°44'22" latitud Norte, 106°29'13" Latitud Oeste. La figura 4.9 muestra la ubicación en el mapa del país.



Figura 4.9: Ubicación idónea para una Central Termosolar

#### 4.4.2. Selección del colector

El CCP es un tipo de colector de concentración con foco lineal que está formado por una serie de espejos cilindros parabólicos que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo de características especiales colocado en la línea focal de la parábola. Esa radiación concentrada hace que el fluido que circula por el interior del tubo se caliente [18].

Estas superficies reflectantes de los colectores se consiguen mediante películas de plata o aluminio que se depositan sobre un soporte que les da la rigidez necesaria. Los soportes más empleados son estructuras metálicas, de plástico y cristal. El material más empleado como soporte es el vidrio y es la opción elegida por la mayoría de las centrales [12].

La tabla 4.2 muestra una comparación de las características principales de diferentes colectores [19].

Tabla 4.2: Tabla comparativa de Colectores

	<b>SKAL-ET150</b>	<b>SENERtrough</b>	<b>IST</b>	<b>Solargenix</b>
<b>Apertura (m)</b>	5.77	5.76	4.4	5.77
<b>Distancia focal (m)</b>	1.71	1.7	1.7	-
<b>Longitud (m)</b>	148.5	150	148.5	100-150
<b>No de módulos</b>	12	12	12	8-12
<b>Longitud del módulo (m)</b>	12.37	12.5	12	12
<b>Factor de concentración</b>	82	~80	~63	82
<b>Colectores por lazo</b>	4	4	4	4
<b>Reflector</b>	Espejo de cristal	Espejo de cristal	Aluminio pulido o película de plata sobre aluminio	Espejo de cristal
<b>Area de apertura (m<sup>2</sup>)</b>	817.5	>800	430 por colector	470 por colector
<b>Peso específico (Kg/m<sup>2</sup>)</b>	28	-	~17	~22
<b>Eficiencia óptica pico (%)</b>	80	-	75	~77
<b>Carga de viento de diseño (m/s)</b>	31.5	33	35.8	~33

Históricamente, cuatro han sido los colectores que se han utilizado en plantas de características similares a las de este proyecto y son: colectores LS-2, LS-3, Solargenix y colectores Eurotrough.

Cabe mencionar que los colectores LS-2 y LS-3 que pertenecían a la desaparecida empresa Luz ya no están disponibles comercialmente [18].

Tras la desaparición de Luz. Un consorcio de empresas y laboratorios de investigación europeos (Inabensa, Fichtner Solar, Flabeg Solar, SBP, Iberdrola, CIEMAT DLR, Solel, CRES), inició el desarrollo del diseño de un nuevo colector basándose en las experiencias de los colectores Luz y con la intención de aunar en él todos los conocimientos adquiridos en el diseño del LS-2 y LS-3. El colector Skal-ET150, es el resultado de estas indagaciones. Se trata de la tercera generación de colectores Eurotrugh, es decir, es el sucesor del colector LS-3 [12] [18].

El colector que se va a elegir para la planta Termosolar va a ser el modelo de última generación SKAL-ET 150 de la empresa Flagsol. Ya que cuenta con una elevada rigidez, y un rendimiento óptico del 80 % y con esto se aprovecha en mayor medida el recurso solar aumentando su rendimiento.

En la figura 4.10 se muestra el colector SKAL-ET 150 que se ha seleccionado como mejor opción para esta central [20].



Figura 4.10: Colector SKAT-EL 150 de Flagsol

### 4.4.3. Selección del tubo receptor

El tubo receptor es uno de los elementos más importantes que componen un colector cilindro parabólico, puesto que, es el encargado de transmitir al fluido de trabajo toda la energía solar térmica concentrada en el colector para su posterior conversión en energía eléctrica, por lo que el rendimiento global del colector depende en gran medida de este elemento.

El receptor está formado por un tubo metálico y una carcasa de vidrio concéntrica al exterior. El fluido calorífico circula por dentro del tubo metálico, mientras que en el espacio delimitado entre los dos componentes se hace el vacío. El tubo metálico está recubierto por un material con elevado coeficiente de absorción.

El tubo se sitúa en la línea focal del canal parabólico que forma el colector y se sujeta por medio de unos soportes equidistantes a lo largo de toda la longitud del colector.

La carcasa de cristal se utiliza por una doble razón: proteger el tubo metálico de las condiciones meteorológicas adversas y reducir las pérdidas de calor por convección en todo el conjunto.

En la figura 4.11 se muestra el tubo receptor.



Figura 4.11: Tubo receptor

Los principales fabricantes de tubos receptores son Siemens AG y Schott Solar CSP GmbH. Estas empresas fabrican los tubos que actualmente se están utilizando en las centrales solares en operación. Se trata de tubos diseñados para emplear aceite térmico como fluido de trabajo. Sin embargo, como consecuencia de la aparición de sales fundidas como elemento de trabajo en los colectores, también ha aparecido un nuevo modelo de tubo receptor desarrollado por Archimede Solar Energy capaz de soportar las mayores temperaturas que se obtienen con el empleo de sales fundidas, teniendo una mayor resistencia a la corrosión que se deriva del uso de este fluido.

En la tabla 4.3 se muestran los modelos de tubos receptores de última generación que ofrecen cada una de estas marcas, las cuales incorporan los últimos avances tecnológicos proporcionados por la gran experiencia acumulada por estas empresas en los últimos años en los distintos proyectos Temiosolares en los que han participado [12] [18].

Tabla 4.3: Tabla comparativa de tubos receptores

		<i>UVAC 2101 (SIEMENS)</i>	<i>SCHOTT PTR 70</i>	<i>ARCHIMEDE</i>
<b>Longitud (mm)</b>	$L_{abs}$	4060	4060	4060
<b>Diámetro exterior (mm)</b>	$D_{ext\_abs}$	70	70	70
<b>Diámetro interior (mm)</b>	$D_{int\_abs}$	64	64	64
<b>Emisividad</b>	$\epsilon_{abs}$	0,09	0,10	0,12
<b>Coefficiente de absorción</b>	$\alpha_{abs}$	0,96	0,95	0,954
<b>Conductividad térmica (<math>W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}</math>)</b>	$k_{abs}$	54	54	54
<b>Diámetro exterior de la carcasa de cristal (mm)</b>	$D_{ext\_cristal}$	115	125	115
<b>Diámetro interior de la carcasa de cristal (mm)</b>	$D_{int\_cristal}$	109	119	109
<b>Emisividad de la carcasa de cristal</b>	$\epsilon_{cristal}$	0,09	0,10	0,09
<b>Transmitancia de la carcasa de cristal</b>	$\tau_{cristal}$	0,965	0,96	0,96

Como se puede observar en la tabla comparativa, las diferencias entre cada tubo receptor son mínimas, tanto a nivel de diseño como a nivel de rendimiento Térmico. Por lo que cualquiera de los tres modelos de tubos receptores presentados cumple perfectamente con los requisitos que requiere un elemento tan importante como este dentro de un colector cilindro parabólico.

Para este proyecto se opta por la utilización del Schott ptr 70 ya que es más fácil de adquirir, puesto que Siemens tiene sucursales en diferentes países incluyendo Estados Unidos [21] [22] [23].

#### **4.4.4. Fluido de trabajo**

La energía procedente del Sol es transferida, por medio del colector, a un fluido calorífico que posteriormente será utilizada para producir el vapor necesario en el ciclo de potencia. Este fluido circula a través del tubo metálico que compone el tubo receptor.

La temperatura de operación de este tipo de colectores está entre los 150°C y los 400°C aproximadamente. Cuanto mayor sea la temperatura, las pérdidas térmicas alcanzan un valor considerable, haciendo que sea necesaria otro tipo de tecnología, así como diferentes materiales.

El fluido de trabajo que normalmente se emplea en las plantas termosolares de Colectores Cilindro-parabólicos actuales es el aceite sintético Therminol VP-1. Este aceite sintético trabaja bien hasta los 400 °C aunque tiene su punto de congelación en 12 °C, lo que obliga a mantener todo el circuito a una temperatura superior a ese valor, esto no suele ser un problema ya que la energía auxiliar que se consume para ello es muy pequeña, además a altas temperaturas se deberá de presurizar para que no pase a fase vapor.

El uso de sales fundidas tiene algunas ventajas sobre el aceite térmico ya que es posible obtener una temperatura de salida de los colectores hasta de 450°C y 550°C. Así, con esto se puede incrementar la temperatura de operación del ciclo de vapor, obteniendo mayores rendimientos. También las sales son más baratas que los aceites.

Estas sales tienen bajos niveles de corrosión sobre las tuberías y otros elementos del sistema, son térmicamente estables a las temperaturas requeridas y tienen bajas presiones de vapor. Aparte de que no contaminan el terreno donde se instala la Central.

El principal problema que se tiene con el uso de sales fundidas como fluido de trabajo es su alto punto de congelación que varía entre los 120°C y los 220°C dependiendo del tipo de sal. Esto requiere que se empleen sistemas de calentamiento o mantenimiento de la temperatura por encima de un determinado valor, elevando los costes de operación y mantenimiento, por lo que se opta por utilizar el aceite Therminol VP-1 [12] [18].

Algunas de las principales características del aceite se describen a continuación:

- Aceite térmico operando entre 12 y 400 °C
- Temperatura de entrada salida del campo solar: 293 393 °C
- Pérdidas térmicas: 10 %
- Para ver cuál es la presión mínima a la que hay que mantenerlo, se recurre a las especificaciones técnicas para saber cuál es su presión a la máxima temperatura de trabajo (393 °C) y aumentar unos 2 bar sobre ese valor para asegurar que en ningún momento se nos evapore el aceite. En este caso su presión de vapor a 393 °C es de 10 bar (según especificaciones), por lo que deberá mantenerse presurizado a 12 bar como mínimo [24] [18].

#### 4.4.5. Sistema de seguimiento solar

La posición del Sol varía a lo largo del día, y a lo largo de las estaciones del año. Para aprovechar toda la radiación de la manera más eficiente es preciso disponer de un sistema que mantenga el colector enfocado hacia el Sol durante todo el día. Este sistema hace girar al colector a lo largo de uno o varios ejes para conseguir este propósito [12].

El sistema de seguimiento solar debe ser confiable y permitir seguir el sol con cierto grado de exactitud, regresar al colector a su posición original al final del día o durante la noche, y también seguir al sol durante los períodos de nubosidad intermitente.

El sistema del colector CPC aprovecha la radiación solar directa al máximo si existe un mecanismo de seguimiento solar automatizado que siga la trayectoria del sol. Este sistema consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindro-parabólicos del colector alrededor de un eje de seguimiento [13].

En la figura 4.12 se puede observar el colector con el sistema de seguimiento solar de Este a Oeste, es decir, a lo largo del día porque esa es la orientación que permite producir el máximo de electricidad al cabo de un año completo.



Figura 4.12: Sistema de seguimiento solar

El eje se sitúa a lo largo de toda la longitud del colector. El movimiento se realiza por medio de motores hidráulicos. El uso de este tipo de motores se debe al elevado par de giro que se necesita para poder mover estas grandes estructuras. El sistema de accionamiento cuenta con un grupo de presión, pistones de accionamiento y electroválvulas. En el caso de colectores pequeños, se pueden emplear motores eléctricos, ya que no se necesitan grandes potencias [12].

La figura 4.13 muestra el sistema hidráulico que mueve los colectores para colocarlos en la posición correcta.

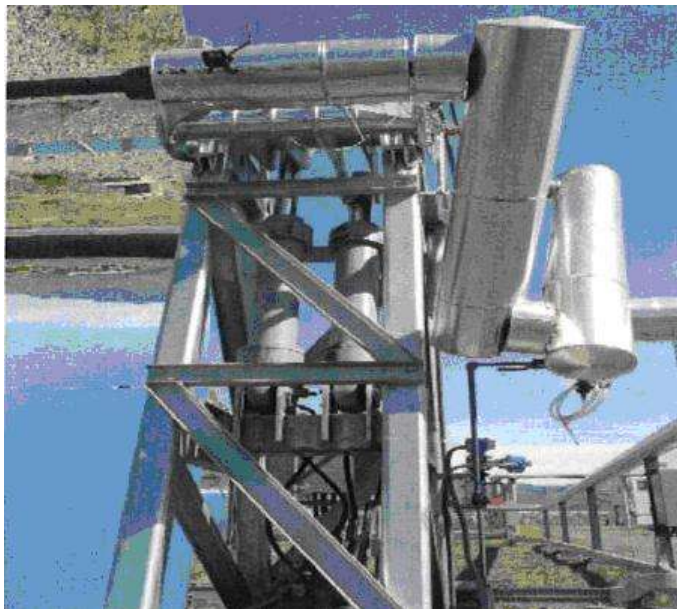


Figura 4.13: Mecanismo de motores hidráulicos

El control de estos movimientos puede ser realizado por medio de un sistema de control electrónico lazo abierto o en lazo cerrado, sin embargo, los más confiables son los de lazo cerrado. Los colectores cuentan con sensores que evalúan la posición del Sol y comparándola con la posición del colector, realizan el giro necesario para un correcto enfoque. Las comprobaciones se llevan a cabo a través de un controlador central que recibe los datos procedentes de los sensores por medio de conexiones físicas o inalámbricas.

Para la orientación se utilizan fotoceldas separadas por una banda de sombra, que en caso de desenfoque, produce un tensión que hace que motor gire o los pistones se muevan en la dirección deseada. Además de permitir el máximo aprovechamiento de la energía solar, el sistema de seguimiento sirve para desenfocar el colector cuando la energía captada es excesiva, otra de sus funciones es colocar los espejos en posición de limpieza o de mantenimiento [14].

En la figura 4.14 se muestra el sensor utilizado para el seguimiento de sol, el cual manda la señal al sistema hidráulico para orientar los colectores.

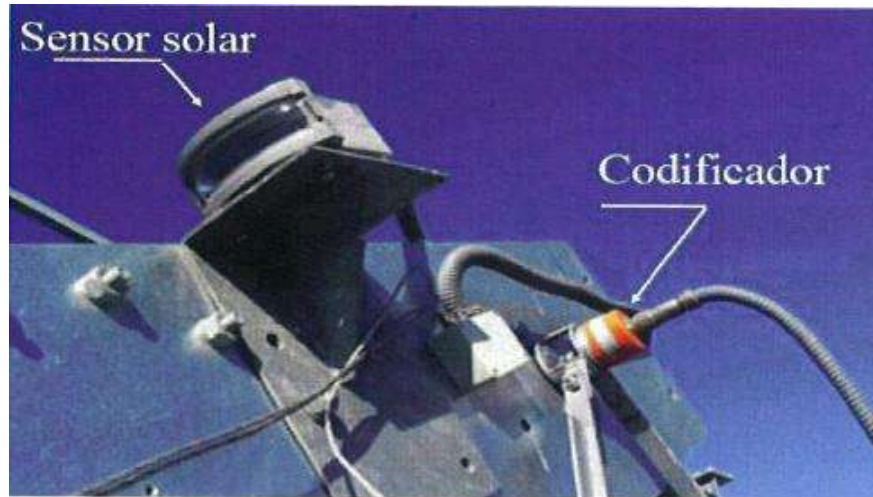


Figura 4.14: Sensor de seguimiento solar

El funcionamiento de las bandas de sombra consiste en dos fotoceldas situadas sobre una superficie plana y separadas por una pared intermedia llamada banda de sombra. Cuando el colector está enfocado, los rayos solares llegan perpendiculares a ambas fotoceldas y la banda de sombra no genera ningún obstáculo. En cambio, cuando el Sol se mueve, empiezan a aparecer sombras sobre una de las fotoceldas. Las señales emitidas por cada uno de estos sensores son diferentes. El controlador central evalúa dichas diferencias y acciona el sistema posicionando de nuevo el colector perpendicular al Sol.

#### 4.4.6. Sistema de Almacenamiento Térmico

Cuando se trata de energías renovables, como es el caso de la energía solar, en lo primero que se piensa es en todos sus beneficios, son inagotables, limpias y se pueden utilizar de forma auto-gestionada (debido a que se utilizan en el mismo lugar donde se producen). Pero que sucede cuando aparecen esas nubes que hacen que el Sol desaparezca por completo. Es aquí donde surge la idea del Sistema de Almacenamiento Térmico.

Se ha comentado anteriormente sobre las ventajas del empleo de un sistema de almacenamiento que permita continuar generando electricidad durante más horas a lo largo del día, o durante la noche.

Las ventajas que se tienen con un sistema de almacenamiento térmico son:

- Aumenta la producción de la central: el exceso de energía almacenada durante el día es utilizada durante horas en las que no se tiene radiación.
- Mejora la calidad de la energía: el sistema de almacenamiento absorbe las variaciones de radiación suministrando un calor constante al generador de vapor.
- Estabiliza la operación de la planta: los transitorios se ven reducidos y las paradas y arranques también [12][25].

Las dimensiones de los tanques son diferentes. El volumen específico del fluido frío es menor que el del fluido caliente no siendo necesario tener dos tanques de las mismas proporciones, con el gasto de material que conllevaría.

Las temperaturas entre las que opera el sistema de almacenamiento son las de entrada y salida de los colectores, en torno a los 290 y 400 °C aproximadamente, Además este sistema de almacenamiento puede mantener la temperatura hasta por siete horas. Debido a las altas temperaturas es necesario un aislamiento muy eficiente para impedir que cuando las sales sean requeridas por el sistema de potencia hayan disminuido su temperatura. También se dispondrá un cableado eléctrico sumergido en el tanque para utilizarse como calentador en casos que la temperatura de la sal esté por debajo del valor necesario.

El funcionamiento de las plantas es muy sencillo y eficiente, en el caso de las centrales de colectores cilindro-parabólicos, las sales inorgánicas como Nitrato de Sodio y Nitrato de Potasio se almacenan en estado líquido en un tanque frío a 293 °C de temperatura, cuando el Sol está radiando sobre los colectores, estas sales se bombean hasta el intercambiador en donde absorben el calor y pueden llegar hasta los 393 °C . Es ahí cuando se traspasan a un tanque caliente.

Lo mismo sucede cuando el Sol no está brillando pero de una manera inversa, ahora es cuando el tanque caliente se traspasa al tanque frío transfiriendo su energía al vapor que entra a la turbina.

La figura 4.15 muestra un esquema de los tanques de almacenamiento térmico en una central de colectores cilindro-parabólicos [26][25].

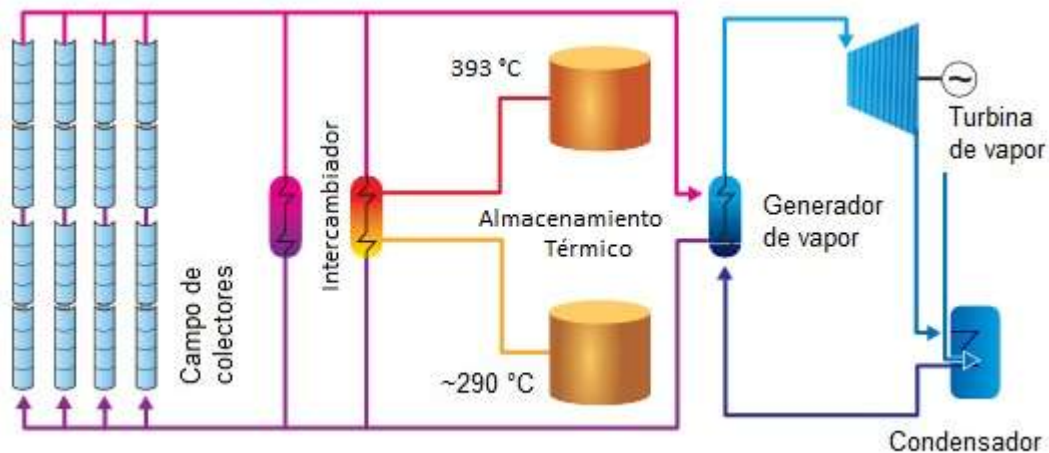


Figura 4.15: Diagrama de una central con almacenamiento térmico

La impulsión de las sales desde los tanques hacia los colectores o hacia el intercambiador de calor se realizará por medio de bombas. Al principio del día únicamente circula fluido entre los colectores y el generador de vapor, y una vez alcanzado el nivel de radiación nominal, se comienza a bombear más fluido desde el tanque frío hacia los colectores que luego se reparte entre el tanque caliente y el generador de vapor.

Durante la tarde, cuando la radiación solar comienza a escasear y no se tiene la potencia suficiente, se apoya el fluido procedente del campo solar con el almacenado en el tanque caliente para continuar operando el ciclo de potencia en condiciones nominales [12].

#### 4.4.7. Dimensionado del campo de colectores

El campo solar para el diseño de esta central de 50 MW (figura 4.15) estará formado por los colectores elegidos en la sección 4.4.2, que son los colectores de tipo Eurotrough en su modelo SKAL-ET 150 fabricados por Flagsol, junto con los tubos receptores que se determinaron en la sección 4.4.3 del fabricante Schott modelo PTR 70, además del fluido de trabajo que en este caso se determinó que va a ser el aceite sintético Therminol PV-1.

Para el dimensionado de una planta de potencia eléctrica neta de 50 MW, utilizando la información disponible de las plantas actuales en funcionamiento, el rendimiento máximo del ciclo Rankine de una Central solar termoeléctrica es alrededor del 38%, sin embargo para este cálculo se utiliza la eficiencia obtenida en la sección 3.2 de 33.06 % por lo que la potencia térmica que debe suministrar el campo solar es de:

$$\frac{50MW_e}{0.3306} = 151.240MW_t$$

El punto de diseño lo fijamos al medio día solar del día 15 de junio, por lo que debemos tener en cuenta que la potencia térmica útil del campo solar en invierno va a ser mucho menor que en el punto de diseño (debido a que la orientación del eje de giro de los colectores es Norte-Sur).

Utilizando la base de datos de la NASA [28], con las coordenadas de la ubicación de la central (Cd. Juárez, Chihuahua), Para el mes de junio se tiene un Ángulo de incidencia de:

Coordenadas: 31°44'22" latitud Norte, 106°29'13" Latitud Oeste.

Ángulo de incidencia:  $\theta = 23^\circ$

Como valor de diseño para la radiación solar directa tomamos 890 W/m<sup>2</sup>, que es el valor obtenido de la base de datos de la NASA a las 12 horas solar del mes de junio en el lugar de ubicación de la Central [29]. Para la temperatura ambiente tomamos un valor de 32°C, este dato fue tomado también de la base de datos de la nasa con las coordenadas de la ubicación de la central [30].

Para fijar las temperaturas que debe tener el aceite a la entrada y salida del campo solar, debemos de tener en cuenta el ciclo Rankine y el intercambiador de calor aceite/agua de la Central, por lo que dichas temperaturas a la entrada y salida del campo lo fijamos con un sato térmico de  $100^{\circ}\text{C}$ , es decir:

$$T_i=293 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_o=393 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ya tenemos definidos los siguientes parámetros para el punto de diseño:

- Potencia térmica neta del campo solar:  $P_u = 151.240 MW_t$
- Radiación solar directa:  $I = 890 \text{ W/m}^2$
- Temperatura del aceite a la entrada del campo solar:  $T_i = 293^{\circ}\text{C}$
- Temperatura del aceite a la salida del campo solar:  $T_o = 393^{\circ}\text{C}$
- Angulo de incidencia  $\theta = 23^{\circ}$
- Temperatura ambiente:  $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$

#### **4.4.8. Cálculo del caudal de aceite Therminol VP-1 por cada fila de colectores en el punto de diseño**

El caudal de aceite por cada fila de colectores en el punto de diseño ha de hacerse buscando que el valor del número de Reynolds sea siempre suficientemente elevado como para que se garantice una buena transferencia de calor en el interior del tubo receptor (régimen turbulento completamente desarrollado). Para ello, vamos a tomar un valor de  $1.5 \times 10^5$  como valor del número de Reynolds en el caso más desfavorable. El caso más desfavorable que se estima es el invierno, que es cuando el caudal de aceite llega a ser sólo un 23% el del verano, debido a la menor radiación solar disponible en esa época del año para colectores con su eje orientado Norte-Sur.

Por lo que se tiene la ecuación (4.1) para el numero de Reynolds

$$Re = \frac{V * D * \rho}{\mu} \quad (4.1)$$

Donde:

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido (kg/m\*s).

$V$  = velocidad del fluido (m/s).

$D$  = diámetro interior de los tubos absorbedores (m).

$\rho$  = es la densidad del aceite (kg/m<sup>3</sup>).

Para obtener el valor de la velocidad que necesitamos en el punto de diseño, se tiene que dividir el número de Reynolds sobre el 23 % del caso más desfavorable que se mencionó anteriormente, por lo que:

$$Re = \frac{1.5x10^5}{0.23} = 6.52x10^5$$

Para la determinación de los parámetros del aceite durante la fase de pre-diseño del campo solar es necesario adoptar una temperatura media, que en nuestro caso es:  $(293 + 393) / 2 = 343^\circ\text{C}$ .

Si consideramos este valor medio de la temperatura del aceite en el campo solar, tenemos que  $\mu$  tiene un valor de  $1.826x10^{-4}$  Pa\*s o kg/m\*s, según la tabla de especificaciones del fabricante , y se tiene una densidad  $\rho = 766.7$  kg/m<sup>3</sup>. [24]

Puesto que el diámetro interior del tubo receptor de un colector Eurotrough es de 65 mm. se puede despejar en la ecuación (4.1) la velocidad mínima que ha de tener el aceite dentro del tubo absorbente. Por lo que, conociendo los valores, se despeja  $V$  de (4.1) y sustituyendo:

$$V = \frac{Re * \mu}{D * \rho} = \frac{(6.25x10^5)(1.826x10^{-4})}{(0.065)(766.7)} = 2.3889\text{m/s}$$

Conociendo estos parámetros precedentes, ahora se puede obtener el caudal másico equivalente a través de la ecuación (4.2)

$$M = V * st * \rho \quad (4.2)$$

Donde

“M” es el caudal másico en kg/s y “st” la sección transversal de los tubos absorbedores en m<sup>2</sup>.

Puesto que, conocemos que la densidad del aceite a 343°C es de 766.7 kg/m<sup>3</sup> y el tubo absorbente tiene una sección transversal de 33.18x10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>. Por lo tanto, el caudal másico equivalente para una velocidad de 2.389 m/s se obtiene sustituyendo en (4.2), de tal manera que:

$$M = 2.389 * 33.18x10^4 * 766.7 = 6.077 \text{ kg/s}$$

Este es el valor del caudal másico de cada fila de colectores para el punto de diseño seleccionado.

#### **4.4.9. Cálculo del incremento de temperatura del aceite en cada colector.**

A continuación, se calcula cual cual es el incremento de temperatura que puede alcanzar el aceite en el colector bajo las condiciones de diseño definidas anteriormente. Para ello, primero hay que determinar las pérdidas térmicas que van a tener lugar en el colector. El coeficiente global de pérdidas térmicas está dado por la ecuación (4.3).

$$U_{L)abs} = a + b * (T_{abs} - T_{amb}) + c * (T_{abs} - T_{amb})^2 \quad (4.3)$$

El valor de los coeficientes "a", "b" y "c" de la ecuación (4.3) para una temperatura de trabajo del aceite igual o superior a 300°C son: 2.8954; - 0.0164 y 0.000065 respectivamente (de acuerdo con las tabla calculadas por el CIEMAT para el colector Eurotrough).

Debido al flujo de calor desde el exterior del tubo absorbedor hacia el aceite que circula por su interior, la temperatura del absorbente,  $T_{abs}$ , es de unos 10 grados superior a la del aceite ( $343^{\circ}\text{C}$ ), por consiguiente consideramos que  $T_{abs}=353^{\circ}\text{C}$  y  $T_{amb}=30^{\circ}\text{C}$ , con lo que de la ecuación se obtiene un valor de:

Por lo que sustituyendo en (4.3) tenemos:

$$U_{L)abs} = 2.8954 - 0.0164 * (353 - 32) + 0.000065 * (353 - 32)^2 = 4.3282 \left[ \frac{W}{m^2 abs^{\circ}C} \right]$$

Puesto que el área Total del tubo absorbente de un colector Eurotrough es de  $32.65 \text{ m}^2$ , cuya longitud es de  $148.5 \text{ m}$  (como se mostro en la tabla 4.2), las pérdidas térmicas en el colector cuya temperatura media del aceite es de  $343^{\circ}\text{C}$  estarán dadas por (4.4).

$$Q_{loss} = U_{L)abs} * A_{abs} * (T_{abs} - T_{amb}) \quad (4.4)$$

Donde:

$Q_{loss}$  = Pérdidas térmicas en el colector, expresada en W

$A_{abs}$  = Area total del tubo absorbente

Como se conocen todos los valores se sustituyen en (4.4), y se tiene:

$$Q_{loss} = 4.3282 * 32.65 * (353 - 32) = 45362.349 \text{ W}$$

El área total de espejos de los módulos cilindro-parabólicos que componen un colector Eurotrough es de  $817.5 \text{ m}^2$  de acuerdo con los datos del fabricante mostrados en la tabla 4.2 y la expresión (4.5) es la ecuación de la energía solar incidente sobre el colector.

$$Q_{sol} = A_c * I * \cos(\theta) \quad (4.5)$$

Donde:

$Q_{sol}$  = Energía solar incidente en el colector en W

$A_c$  = Área de apertura del colector en  $m^2$

$I$  = Radiación global directa en  $W/m^2$

$\theta$  = Ángulo de incidencia en grados

Como todos estos valores son conocidos, la energía solar disponible en la apertura del colector se obtiene sustituyendo en (4.5).

$$Q_{sol} = 817.5 * 890 * \cos(23) = 669326.694 W$$

Por otro lado, el modificador por ángulo de incidencia  $K$  considera todas las pérdidas ópticas y geométricas que tienen lugar en el colector para un ángulo de incidencia (pérdidas geométricas de final de colector, bloqueo de la radiación concentrada por parte de los soportes del tubo absorbente, y en la reflectividad de los espejos).

El modificador por ángulo de incidencia  $K$ , depende directamente del ángulo de incidencia  $\theta$ . El valor de  $K$  se da como una función que se determina experimentalmente. Para el colector Eurotrough, para valores de  $80^\circ$  a  $90^\circ$   $K$  viene dado por la expresión polinómica (4.6).

$$K(\theta) = 1 - 2.23073 \times 10^{-4} * \theta - 1.1 \times 10^{-4} * \theta^2 + 3.18596 \times 10^{-6} * \theta^3 - 4.85509 \times 10^{-8} * \theta^4 \quad (4.6)$$

Como se tiene que para este cálculo el ángulo de incidencia es  $\theta = 23^\circ$ , sustituyendo en (4.6) se tiene:

$$K(\theta) = 1 - 2.23073 \times 10^{-4} * 23 - 1.1 \times 10^{-4} * 23^2 + 3.18596 \times 10^{-6} * 23^3 - 4.85509 \times 10^{-8} * 23^4 = 1.02$$

Una vez obtenido el valor de  $K$ , se calcula la potencia útil del colector mediante la expresión (4.7)

$$Q_{\acute{u}til} = Ac * I * \cos(\theta) * \eta_{opt} * K * Fe * \eta_{th} - Q_{loss} \quad (4.7)$$

Donde:

$Q_{\acute{u}til}$  = Potencia térmica útil en W.

$\eta_{opt}$  = Rendimiento óptico.

$Fe$  = Factor de ensuciamiento.

$\eta_{th}$  = Rendimiento térmico del colector.

Estableciendo un factor de ensuciamiento,  $Fe$  de 0.98 y  $\eta_{th}$  de 0.96, se sustituyen valores en (4.7) y se tiene:

$$Q_{\acute{u}til} = 817.5 * 890 * \cos(23) * 0.80 * 1.02 * 0.98 * 0.96 - 45362.349 = 468789.4 \text{ W}$$

Como, por otro lado, la potencia térmica útil se invierte en aumentar la entalpía del aceite, se tiene la ecuación (4.8).

$$Q_{\acute{u}til} = M * (h_{out} - h_{in}) = M * \Delta H \quad (4.8)$$

Si se expresa el incremento de entalpía, en función del calor especifico del aceite (formula dada por el fabricante), y se integra entre las temperaturas de salida y de entrada en el colector, se obtienen la fórmula (4.9).

$$468789 = 6.077(1.479 * T_{out} + 0.0014T_{out}^2 - 553) \quad (4.9)$$

La ecuación (4.9) es cuadrática, al resolverla se obtiene un valor positivo y un negativo para  $T_{out}$ , por lo que se toma el valor positivo y se tiene:

$$T_{out} = 325.725 \text{ }^\circ\text{C}$$

Por lo tanto el incremento de temperatura en un colector es:

$$325.725 - 293 = 32.725^{\circ}\text{C}$$

#### 4.4.10. Número de colectores en cada fila del campo solar

Puesto que deseamos tener un incremento total de  $100^{\circ}\text{C}$  en cada fila de colectores, y en un colector se consigue un incremento de  $32.725^{\circ}\text{C}$ , el número de colectores que debemos conectar en serie dentro de cada fila es:

$$\frac{100}{32.725} = 3.055$$

A la vista del número obtenido, en principio sería conveniente colocar 3 colectores por fila, sin embargo, desde el punto de vista constructivo, es conveniente elegir un número par de colectores, para que las filas se puedan disponer en forma de “U” y adoptar una configuración del tipo “alimentación central” para las tuberías del campo de colectores. Por lo tanto, dejamos en 4 el número de colectores conectados en serie dentro de cada fila. Como hemos aumentado el número de colectores desde 3.055 a 4, el caudal de aceite por fila tiene que ser aumentado en la misma proporción, de modo que el nuevo caudal de aceite que debe circular por cada fila de 4 colectores se calcula mediante una regla de tres, como sigue:

$$\frac{6.077 * 4}{3.055} = 7.956 \text{ Kg/s}$$

Con este caudal de aceite la velocidad del fluido  $V$ , se eleva hasta  $3.127 \text{ m/s}$  para cumplirse con el caudal másico  $M$ , de  $7.956 \text{ kg/s}$  por cada 4 colectores. Con este caudal de aceite por fila se obtiene un número de Reynolds  $8.53 \times 10^5$ , un valor muy superior al inicialmente previsto para el caso mas desfavorable en invierno, por lo que no se pone en peligro una buena transferencia de calor en los tubos receptores.

#### 4.4.11. Cálculo del número de filas paralelas necesario

La potencia térmica útil que suministrará cada fila de colectores en el punto de diseño será:

$$4 * 468789.4W_t = 1875.157 KWt$$

La planta, como hemos mencionado, se diseña para un almacenamiento de 7 h de funcionamiento, por lo que el campo de colectores deberá de general la potencia térmica necesaria para entregar 151.240 MWt más el almacenamiento que es de (151.240MWt x 7h = 1058MWt).

Esta potencia es mucho mayor a la definida para las condiciones de diseño, por lo que es necesario un valor llamado Múltiplo Solar.

El múltiplo solar es un concepto específico de las centrales Termosolares, y se define como el cociente entre la potencia térmica útil que proporciona el receptor solar en condiciones de diseño respecto a la potencia térmica que requiere el ciclo de potencia en condiciones normales de funcionamiento, y está dado por la ecuación (4.10).

$$SM = \frac{P_R}{P_D} \quad (4.10)$$

Donde:

SM = Múltiplo Solar

P<sub>R</sub> Potencia térmica útil en condiciones de diseño en W.

P<sub>D</sub> = Potencia térmica del ciclo en W

Como no siempre se va a contar con condiciones de radiación ideales, se hace necesario sobredimensionar el campo solar, para que el bloque de potencia trabaje a pleno rendimiento más horas (sino trabajaría a plena carga muy poco tiempo), aunque esto conlleve el desperdicio de algo de energía en días con condiciones solares perfectas.

Para conseguir estas condiciones, si bien se puede realizar de forma iterativa, es mejor realizarlo a través del programa tipo SAM (Solar Advisor Model) [32]. Este programa necesita una serie de datos de entrada como son: la potencia de la turbina, las horas de almacenamiento, la ubicación geográfica, y el tipo de fluido de trabajo. Y entrega una serie de valores y gráficas de generación de potencia anual, entre otros valores, entrega el valor del Múltiplo Solar.

Para el caso de este estudio, la ubicación es Ciudad Juárez Chihuahua, en las ubicaciones que tiene definidas el programa SAM, no se encuentra esta ubicación, por lo que se recurre a utilizar la zona existente más cercana, siendo: El Paso Texas con coordenadas 31.8° Norte y 106.4° Oeste, es una ubicación muy cercana al punto de diseño calculado para este estudio, con la diferencia de que está un poco más hacia el Norte.

El valor obtenido para el Múltiplo Solar es  $SM = 2$ . Por lo que la potencia útil que debe generar el campo solar es:

$$2 * 151.240 MW = 302.48 MW_t$$

Finalmente se debe calcular la cantidad de colectores en paralelo son necesarios. Se sabe que un colector da una potencia de 468.789 kW, como se conectan 4 colectores en serie por cada lazo, entonces cada lazo proporcionará una potencia de 1875.156 kW. Por lo tanto el número de lazos o filas necesarios son:

$$\frac{302.48MW}{1.875MW} = 161.32 Lazos$$

Puesto que el resultado no fue un número entero se procede a seleccionar el inmediato superior, siendo un total de 162 Lazos.

Ahora sabemos que para el diseño de una central de generación con colectores cilindro-parabólicos en Ciudad Juárez, Chihuahua, se necesitaría conectar 4 colectores en serie por cada fila, y un total de 162 filas, con eso se obtiene el área total de colectores, considerando que cada colector tiene una área de  $817.5 \text{ m}^2$ , tenemos que:

$$4 * 162 * 817.5 = 529740 \text{ m}^2$$

Y se tiene un total de 648 colectores en todo el campo de concentración [18][31].

# Capítulo 5

## Conclusiones

El uso de la energía solar para generación de energía eléctrica es un campo que se ha desarrollado principalmente en España y Estados Unidos, países que cuentan con condiciones muy favorables en cuanto a recurso solar.

Sin embargo, México también cuenta con lugares con condiciones muy favorables para la utilización de la energía solar para producir energía eléctrica, como se observó en el diseño de la central de este trabajo, en la zona del norte del país existen varios Estados donde es muy factible la instalación de una central Termosolar.

En este trabajo se hizo una investigación en diferentes fuentes bibliográficas donde se observó que la zona que cuenta con mayor potencial de energía solar es el caso de Ciudad Juárez en Chihuahua, por lo que todo el cálculo del diseño se realizó para esta ubicación, sin embargo es importante mencionar que países como Sonora y Zacatecas, entre otros, tienen condiciones muy favorables para el uso de esta tecnología.

Del estudio realizado se puede observar que una central de generación de energía eléctrica con colectores solaras no es capaz de producir toda la energía para la que fue diseñada sólo por medio de los colectores, sino que es necesario utilizar un porcentaje de algún combustible para llevar la planta a la capacidad nominal, en este caso 50 MW.

Tal como se observó en el capítulo 3, del total de la eficiencia del generador de vapor considerando una temperatura de 400 °C, los colectores proporcionan el calor necesario para producir el 86 % del vapor necesario para la potencia nominal de la central, mientras que el otro 14 % se obtiene mediante algún combustible como en las centrales termoeléctricas convencionales.

También se observó que si se requieren temperaturas mayores a los 400 °C, y conforme va aumentando la temperatura, el aporte de calor que proporcionan los colectores solares disminuye, y conforme aumenta la temperatura, es necesario quemar más cantidad de combustible para obtener las condiciones de vapor necesarias a esa temperatura. Tal es el caso del capítulo 3, donde se analizó la eficiencia del generador de vapor considerando 500 °C, donde la eficiencia disminuyó a 80.3% respecto al cálculo para 400 °C.

Cabe mencionar, que en el capítulo 3 se utilizó una temperatura de 400 °C para el cálculo de la eficiencia en el generador de vapor usando colectores solares y el generador convencional, y en el capítulo 4 para el diseño, ya no se utilizó ese valor de temperatura, ya que los 400 ° es el valor de temperatura ideal, el cual alcanzan este tipo de centrales. En el capítulo 4 se utilizó el valor de 393 °C, que es el valor máximo que alcanza el colector seleccionado (SKAT-EL 150).

Para el capítulo 4, donde se realizó el diseño para una central de generación en México, se observó que se requiere un espacio muy considerable de terreno para la instalación de una central Termosolar, ya que normalmente las instalaciones actuales son de capacidades pequeñas, alrededor de los 50 MW, porque para mayor capacidad, se requieren espacios mucho más grandes de terreno, y eso implica tener mas pérdidas de temperatura por las largas distancias, y con ello se ve reducido el rendimiento de la central. Esto implica, mayor inversión de recursos y menor eficiencia de generación de energía eléctrica.

También se observó que para este tipo de centrales, se vuelve vital el uso de un sistema de almacenamiento térmico, ya que con esto se garantiza la operación estable de la central durante los días nublados, e incluso por la noche y el tipo de sales fundidas mencionadas dan la seguridad de que la central puede

seguir generando energía hasta por 7 horas. Actualmente se investigan las propiedades térmicas de diferentes tipos de sales para prolongar el tiempo de operación de la central y que sean capaces de almacenar el calor hasta por 15 horas.

Por último, este estudio se realizó considerando valores de temperaturas e irradiación solar tomados de diferentes páginas de Internet, tal es el caso de la base de datos de la NASA. Pero para un estudio más confiable y para asegurar el correcto funcionamiento de una central de generación, es necesario considerar valores históricos confiables y precisos de la ubicación donde se pretenda instalar la central, realizando mediciones en la zona y haciendo un análisis más detallado de las condiciones climatológicas.

# Bibliografía

- [1] <http://es.scribd.com/doc/46863411/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica> [Última visita: Octubre 2013]
- [2] Solar Engineering of Thermal Processes, Duffie, J., Beckman, W., John Wiley & Sons, 1980
- [3] <http://www.sol-arq.com/index.php/factores-ambientales/radiacion> [Última visita: Octubre 2013]
- [4] Solar Thermal Collector and Applications, Kalogirou S., Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 231-295
- [5] Wind and Solar Power Systems, Makund R. Patel, 1999
- [6] <http://www.torresolenergy.com/> [Última visita: Octubre 2013]
- [7] Concentrating solar power, Solar Paces, TYNER, C., et al., 2001
- [8] SOLAR THERMOCHEMICAL PROCESS TECHNOLOGY, R. A. Meyers Ed., Academic Press, Vol. 15, pp. 237-256, 2001
- [9] <http://www.rankingsolar.com/parques-solares/34-parques-solares/844-parque-termosolar-andasol-1.html> [Última visita: Octubre 2013]
- [10] <http://www.solarmillennium> [Última visita: Octubre 2013]
- [11] <http://www.upcomillas.es> [Última visita: Octubre 2013]
- [12] Cálculo, diseño y análisis de una central termosolar de colectores cilíndrico-parabólicos operando con sales fundidas, Daniel Serrano García, Marzo de 2012
- [13] Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua, César Antonio Echevarría L. Septiembre 2011

- [14] <http://www.opex-energy.com> [Última visita: Octubre 2013]
- [15] [http://www.tecnosolar.com.mx/energia\\_solar.html](http://www.tecnosolar.com.mx/energia_solar.html)  
[Última visita: Octubre 2013]
- [16] <http://www.pesco.com.mx> [Última visita: Octubre 2013]
- [17] [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/Apen\\_A.htm](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/Apen_A.htm) [Última visita: Octubre 2013]
- [18] Central Termosolar de 50 MW en Murcia con colectores cilindro-parabólicos, Miguel A. Güillamón L. Junio de 2012
- [19] Parabolic Trough Collector Overview, Dr. David W. Kearney, National Renewable Energy Laboratory. 2007
- [20] <http://www.heliotrough.com/history.html> [Última visita: Octubre 2013]
- [21] <http://www.direc2010.gov.in/pdf/Setting-Benchmark-Receiver-Technology.pdf> [Última visita: Octubre 2013]
- [22] <http://www.energy.siemens.com> [Última visita: Octubre 2013]
- [23] <http://www.archimedesolareenergy.it/brochure.pdf> [Última visita: Octubre 2013]
- [24] <http://www.therminol.com> [Última visita: Octubre 2013]
- [25] <http://centralestermosolares.com/termosolaravanzados04.html> [Última visita: Octubre 2013]
- [26] <http://www.archimedesolareenergy.it/brochure.pdf> [Última visita: Octubre 2013]
- [27] <http://renewablengineering.blogspot.mx/2011/05/planta-solar-termoelectrica-de-50-mw.html> [Última visita: Octubre 2013]
- [28] <https://eosweb.larc.nasa.gov/declination> [Última visita: Octubre 2013]
- [29] <https://eosweb.larc.nasa.gov/midday> [Última visita: Octubre 2013]
- [30] [https://eosweb.larc.nasa.gov/TSKYN\\_MN](https://eosweb.larc.nasa.gov/TSKYN_MN) [Última visita: Octubre 2013]

[31] <http://renewablengineering.blogspot.mx/2011/05/planta-solar-termoelectrica-de-50-mw.html> [Última visita: Octubre 2013]

[32] <https://sam.nrel.gov/content/downloads>[Última visita: Octubre 2013]