

GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGIA  
INDUSTRIAL

# TRABAJO FIN DE GRADO

*PLANTA TERMOSOLAR DE  
CONCENTRADORES CILINDRICO  
PARABOLICOS DE 50 MWE*

**Alumno/Alumna:** Etxebarria Basterretxea, Asier

**Director/Directora:** De la Peña Aranguren, Víctor

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** 2017/07/16



BILBOKO  
INGENIARITZA  
ESKOLA  
ESCUELA  
DE INGENIERÍA  
DE BILBAO

<b>1. RESUMEN TRILINGUE.....</b>	<b>4</b>
1.1. CASTELLANO .....	4
1.2. EUSKERA .....	4
1.3. INGLES .....	5
<b>2. LISTAS DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRONIMOS.....</b>	<b>6</b>
2.1. LISTA DE TABLAS .....	6
2.2. LISTA DE ILUSTRACIONES .....	6
2.3. LISTA DE ACRÓNIMOS.....	7
<b>3. INTRODUCCION.....</b>	<b>8</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>10</b>
<b>5. ALTERNATIVAS .....</b>	<b>10</b>
5.1. DISCO STIRLING .....	10
5.2. TORRE TERMOSOLAR.....	12
5.3. COLECTORES FRESNEL.....	14
5.4. CILINDRO PARABOLICO .....	16
<b>6. ALTERNATIVA SELECCIONADA.....</b>	<b>18</b>
<b>7. DESCRIPCION DE LA PLANTA.....</b>	<b>18</b>
7.1. DATOS GENERALES .....	18
7.2. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA.....	19
7.2.1. <i>Campo solar</i> .....	20
7.2.2. <i>Ciclo de potencia</i> .....	21
<b>8. DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES.....</b>	<b>24</b>
8.1. EQUIPOS DEL CAMPO SOLAR .....	25
8.1.1. <i>Reflectores CCP (espejos)</i> .....	25
8.1.2. <i>Tubo de absorción</i> .....	27
8.1.3. <i>Sistema de seguimiento</i> .....	29
8.1.4. <i>Cimentación y estructura</i> .....	30
8.2. FLUIDO TÉRMICO.....	30
8.3. EQUIPOS DEL CICLO DE POTENCIA.....	32
8.3.1. <i>Generador de vapor</i> .....	32
8.3.1.1. <i>Generación de vapor principal</i> .....	33

8.3.1.2.	Recalentador.....	35
8.3.2.	<i>Grupo turbina-alternador.....</i>	<i>36</i>
8.3.2.1.	Turbina.....	36
8.3.2.2.	Alternador .....	37
8.3.3.	<i>Condensador de vapor.....</i>	<i>38</i>
8.3.4.	<i>Torre de refrigeración .....</i>	<i>39</i>
8.3.5.	<i>Precalentador.....</i>	<i>40</i>
8.3.6.	<i>Desgasificador .....</i>	<i>41</i>
8.3.7.	<i>Bombas .....</i>	<i>43</i>
8.3.8.	<i>Equipos auxiliares.....</i>	<i>44</i>
<b>9.</b>	<b>CALCULOS Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES.....</b>	<b>44</b>
<b>10.</b>	<b>ESTUDIO ECONOMICO.....</b>	<b>49</b>
<b>11.</b>	<b>DIAGRAMA DE GANTT .....</b>	<b>50</b>
<b>12.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>51</b>

# 1. RESUMEN TRILINGUE

## 1.1. Castellano

En este trabajo de fin de grado, primeramente, se realiza un análisis somero sobre el contexto global internacional que está sometiendo al mercado a la consecución de fuentes de energía que cumplan con unos exigentes compromisos de eficiencia y gestión del medio ambiente. A partir de este contexto, se identifican y describen distintas alternativas focalizadas en tecnologías termosolares, para optar finalmente por una solución basada en colectores cilíndrico parabólicos. Se describe con mayor detalle el funcionamiento global de una planta de este tipo, así como cada uno de sus componentes principales. Finalmente, se despliega un esquema económico del diseño y desarrollo de la planta.

## 1.2. Euskera

Gradu amaierako proiektu honetan, lehenengo pausua nazioarteko testuinguruari buruzko azaleko azterketa egitea izan da, honek merkatuari energia eraginkortasunaren eta ingurunearen kudeaketaren inguruko konpromiso zorrotzak betetzen dituzten energia-iturri berriak garatzen ezarri dio. Testuinguru honetatik habiatuta, teknologia termosolarrean ardaztutako aukera desberdinak identifikatu eta deskribatu egiten dira, kolektore zilindriko parabolikoetan oinarrituriko irtenbide bat aukeratuz. Mota honetako instalazio baten funtzionamendu orokorra eta osagai nagusiak xehetasun handiagoz deskribatzen dira. Azkenik, instalazioaren diseinuaren eta garapenaren eskema ekonomikoa aurkeztu egiten da.

### 1.3. Ingles

In this end-of-degree project, a brief analysis of the global context which is subduing the market to the development of energy sources that accomplish demanding commitments of efficiency and environmental management is first performed. From this context, different alternatives focused on solar-thermal technologies are identified and described, in order to finally opt for a solution based on parabolic cylindrical collectors. The overall operation of a plant of this kind, as well as each of its main components, is described in greater detail. Finally, an economic scheme of the design and development of the plant is deployed.

## 2. LISTAS DE TABLAS, ILUSTRACIONES Y ACRONIMOS

### 2.1. Lista de tablas

1. TABLA: CARACTERÍSTICAS DE CADA PLANTA.....	18
2. TABLA: DATOS DE CÁCERES.....	19
3. TABLA: CARACTERÍSTICAS DEL CAMPO SOLAR.....	21
4. TABLA: CARACTERÍSTICAS DE LOS COLECTORES.....	27
5. TABLA: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL FLUIDO TÉRMICO .....	31
6. TABLA: CARACTERÍSTICAS DEL CICLO DE POTENCIA .....	45
7. TABLA: TABLA DE RESULTADOS.....	48
8. TABLA: PRESUPUESTO.....	49

### 2.2. Lista de ilustraciones

1. ILUSTRACIÓN: DISCO STIRLING.....	11
2. ILUSTRACIÓN: CENTRAL TORRE TERMOSOLAR .....	13
3. ILUSTRACIÓN: CENTRAL COLECTORES FRESNEL .....	15
4. ILUSTRACIÓN: CENTRAL CCP .....	17
5. ILUSTRACIÓN: MAPA SOLAR DE ESPAÑA .....	19
6. ILUSTRACIÓN: ESQUEMA EQUIPOS TÉRMICOS .....	22
7. ILUSTRACIÓN: DIAGRAMA T-S .....	22
8. ILUSTRACIÓN: FUNCIÓN DEL RECALENTADOR .....	23
9. ILUSTRACIÓN: RECEPTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO.....	25
10. ILUSTRACIÓN: ESTRUCTURA DE LOS ESPEJOS DE VIDRIO .....	27
11. ILUSTRACIÓN: TUBO DE ABSORCIÓN .....	28
12. ILUSTRACIÓN: SEGUIMIENTO SOLAR .....	29
13. ILUSTRACIÓN: ESQUEMA DE LA PLANTA TERMOSOLAR .....	32
14. ILUSTRACIÓN: GENERADOR DE VAPOR PRINCIPAL EN EL CICLO .....	33
15. ILUSTRACIÓN: INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO KETTLE .....	34
16. ILUSTRACIÓN: INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO CARCASA-TUBO .....	35
17. ILUSTRACIÓN: PRECALENTADOR.....	35

18. ILUSTRACIÓN: GRUPO TURBINA-ALTERNADOR EN EL CICLO .....	36
19. ILUSTRACIÓN: TURBINA DE REACCIÓN.....	37
20. ILUSTRACIÓN: CONDENSADOR EN EL CICLO.....	38
21. ILUSTRACIÓN: CONDENSADOR .....	39
22. ILUSTRACIÓN: TORRE DE REFRIGERACIÓN.....	40
23. ILUSTRACIÓN: PRECALENTADOR EN EL CICLO .....	40
24. ILUSTRACIÓN: DESGASIFICADOR EN EL CICLO .....	41
25. ILUSTRACIÓN: DESGASIFICADOR.....	42
26. ILUSTRACIÓN: BOMBAS EN EL CICLO .....	43
27. ILUSTRACIÓN: BOMBA CENTRIFUGA .....	43
28. ILUSTRACIÓN: APROXIMACIÓN DE LA PLANTA .....	45
29. ILUSTRACIÓN: DIAGRAMA T-S DE LA APROXIMACIÓN.....	45
30. ILUSTRACIÓN: DIAGRAMA DE GANTT.....	50

### 2.3. Lista de acrónimos

- CCP: *Colector Cilíndrico Parabólico*

### 3. INTRODUCCION

El final del siglo XX y el principio del actual están siendo convulsionados por el enorme impacto de los temas medioambientales, llegando a movilizar a un amplio abanico de actores políticos y civiles. Este escenario ha creado un amplio mosaico de agendas y compromisos a nivel internacional entre una gran cantidad de países, lo cual implicará un fuerte impulso en el desarrollo tecnológico de las próximas décadas en pos de la consecución de energías cada vez más eficientes y limpias.

Los marcos que a priori van a ser más relevantes y se prevé van a tener una mayor repercusión en el ámbito tecnológico son los siguientes:

- Protocolo de Kioto, mediante este tratado los países firmantes se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a desarrollar métodos de generación eléctrica sostenibles. Para ello tomaron una serie de medidas, de las cuales las más importantes en el contexto de este proyecto son:
  - Fomento de la eficiencia energética.
  - Reducción progresiva o eliminación de las deficiencias del mercado, los incentivos fiscales, las exenciones tributarias y arancelarias y las subvenciones que sean contrarios al objetivo de la Convención en todos los sectores emisores de gases de efecto invernadero y aplicación de instrumentos de mercado.
  - Fomento de reformas con el fin de promover unas políticas y medidas que limiten o reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero.
  - Investigación, promoción, desarrollo y aumento del uso de formas nuevas y renovables de energía y de tecnologías avanzadas y novedosas que sean ecológicamente racionales.

- Plan de los cinco veintes, mediante el cual, los países miembro de la Unión Europea se comprometieron a cumplir los siguiente tres puntos para 2020:
  - Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20%.
  - Ahorrar el 20% del consumo de energía mediante una mayor eficiente energética.
  - Promover las energías renovables hasta el 20%.

Este escenario inyectará una gran presión tanto en la oferta de productos y servicios energéticos como en la demanda de los mismos, y cambiará drásticamente los criterios de elección hacia tecnologías que hasta el momento han sido consideradas poco rentables. Las energías renovables en general, y las termosolares en particular, aparecen como las grandes candidatas y beneficiarias de importantes inversiones para el desarrollo de plantas de nueva generación de energía.

Concretando en la tecnología termosolar, se esbozan algunos aspectos que a priori dan relevancia a esta tecnología a la hora de compararlo con otras alternativas:

- Son tecnologías con un potencial inmenso.
- Se puede almacenar la energía generada.
- Es gestionable. Es decir, se puede generar electricidad incluso en momentos del día en los que no haya luz.
- Ante una incidencia puede empezar a generar electricidad de forma de casi inmediata.
- Son las centrales que más empleo generan.
- Como el resto de las energías renovables, reduce la dependencia energética del país.

En los próximos capítulos se analizarán y describirán con mayor precisión soluciones basadas en la tecnología termosolar.

## 4. OBJETIVOS

El objetivo principal a la hora de construir una planta de este tipo es la producción de 130 GWh al año mediante una tecnología limpia, valiéndonos de una fuente de energía infinita como es el sol. Hay que mencionar que, aunque las emisiones de una planta termosolar, una vez está en marcha son nulas, a la hora de contabilizar las emisiones totales de la planta hay que tener en cuenta las provenientes de la fabricación de los componentes de la planta.

La necesidad de construir una planta que genere electricidad mediante tecnologías renovables viene de las medidas acordadas en el protocolo de Kioto. Como se ha mencionado anteriormente, entre las medidas que acordaron los países firmantes están la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> o la transición hacia modelos de generación energética más sostenibles.

La planta cumple también con una serie de objetivos de carácter secundario. Como son:

- La independencia energética del país.
- La revalorización de terrenos de poco valor. Este tipo de plantas se suelen construir en zonas áridas, secas y con poca densidad de población. Las cuales, a priori, no son adecuadas para construcciones de otro tipo.
- Creación de empleos. La construcción de una planta de este tipo genera 500 puestos de trabajo y entre 50 y 85 puestos una vez la planta está en marcha.

## 5. ALTERNATIVAS

### 5.1. DISCO STIRLING

El sistema de Disco Stirling es un equipo de generación de energía basado en la radiación solar directa. El concentrador, de alta reflectividad, refleja toda la radiación solar incidente en un único punto, punto focal. En este punto, la radiación es absorbida

y utilizada para calentar el gas del motor Stirling. En este sistema se da la mayor relación de concentración, pueden llegar a 3000:1. Gracias a esto, se consiguen temperaturas de alrededor de 650°C.

Para la generación eléctrica se utiliza un motor Stirling. Basado en el Ciclo de Stirling, el ciclo termodinámico más eficiente en cuanto a la transformación de calor en energía eléctrica se refiere. Normalmente, el rendimiento es de al redor del 25% pero puede llegar al 32%. Este motor tiene dos grandes ventajas. La primera es que no tiene combustión interna, motor de combustión externa, por lo que sus elementos no se degradan. Y la segunda es que, al no ser un motor de rozamiento no vibra ni hace ruido.

Hoy en día, este sistema no está muy desarrollado. La producción de cada módulo oscila entre 5 y 25 kW, por lo que hace falta una cantidad muy elevada de módulos para poder competir con las otras tecnologías. Además, solo se puede almacenar la energía creada mediante baterías eléctricas, las cuales a día de hoy son muy caras.



**1. Ilustración: Disco Stirling**

Ventajas:

- Los módulos son independientes, lo que los hace adecuados para instalaciones individuales y aplicaciones descentralizadas.

- El motor es de combustión externa, por lo que sus elementos no se degradan. Además, opera sin rozamiento por lo que no vibra. Estas dos características hacen que tenga una vida útil larga.
- Como ya se ha mencionado, tiene el ratio de concentración más alto de las cuatro tecnologías, puede llegar a 3000:1, lo que hace que alcance temperaturas elevadas, alrededor de 650°C.
- No hay fluido circulando por el campo solar.

#### Desventajas:

- La construcción de los espejos, por su forma parabólica, es muy compleja.
- Cada módulo tiene una capacidad de entre 5 y 25 kW.
- A día de hoy es una tecnología poco desarrollada, hay que superar algunos problemas técnicos.
- Para poder competir con las otras tecnologías son necesarias grandes extensiones de terreno, ya que, por su poca capacidad es necesario un número elevado de módulos.

## **5.2. TORRE TERMOSOLAR**

Este sistema está formado por un campo solar y una torre a donde se refleja la radiación para calentar el fluido térmico. Este fluido se utiliza para generar electricidad mediante los ciclos termodinámicos clásicos.

El campo solar o heliostato, son un grupo de espejos que reflejan la radiación solar y la concentra en el receptor situado en lo alto de la torre. En este caso la concentración de luz puede llegar a 1000:1. Hay que mencionar que el heliostato puede llegar a suponer el 50% de la inversión. Para aumentar el rendimiento de la planta, los espejos disponen de dos ejes de rotación, mediante los cuales hacen un seguimiento al sol. La coordinación de todos los espejos es una de las grandes dificultades de diseño.

Una de las grandes desventajas de esta tecnología es la vasta extensión de terreno que necesita. Cerca de 380 hectáreas para producir 100 MW.

Los receptores absorben la irradiación solar y la transfieren al fluido absorbente. Este es el encargado de transportarlo al ciclo de potencia. Los receptores están colocados en lo alto de la torre. La cual, debe tener más de 100 metros de altura, para que no genere sombras ni obstaculice la concentración de la radiación. Los receptores pueden llegar a alcanzar los 1000°C, lo que permite trabajar con distintos tipos de ciclos de potencia.

Este tipo de centrales permite el almacenamiento térmico, el cual hace posible que la central siga trabajando sin necesidad de sol.

A día de hoy está en fase de investigación, solo se pueden producir 20 MW, pero se cree que en un futuro puede ser una tecnología muy interesante.

Por último, hay que mencionar que puede ser usada para otras aplicaciones, además de la generación eléctrica. Por ejemplo, en procesos químicos orientados a la metalurgia o en la producción de combustibles.



## 2. Ilustración: Central torre termosolar

### Ventajas:

- Existe la posibilidad de almacenamiento energético, gracias a esto se podrá generar electricidad en los momentos en los que no haya sol.
- Los espejos son planos, lo que los abarata los costes.
- El ratio de concentración puede llegar a 1000:1, lo que hace que alcance temperaturas elevadas, alrededor de 1000°C.
- No hay fluido circulando por el campo solar.
- La distancia necesaria entre los espejos es menor que en las otras tecnologías. Por lo que el campo solar necesario será menor.

#### Desventajas:

- El límite práctico de la máxima potencia a obtener es de 20 MW. Ya que a partir de aquí al aumentar el campo solar disminuye el rendimiento.
- Hoy en día no hay muchas plantas de este tipo construidas.
- Aunque existe la posibilidad de almacenamiento energético, a día de hoy está muy poco desarrollado y es muy caro.

### **5.3. COLECTORES FRESNEL**

Su funcionamiento es similar al de los CCP. Está formado por unos espejos lineales que concentran la radiación en un tubo absorbedor.

El reflector está formado por espejos planos. Y tienen capacidad de seguir al sol en un plano de movimiento. El hecho de que tenga espejos planos, hace que el rendimiento de la planta sea un 15% más bajo que el de una central con colectores cilíndrico parabólico.

En algunos casos se ha conseguido una relación de concentración de 40:1 aunque lo normal es que este al redor de 20:1. En consecuencia, la temperatura del fluido de absorción no supera los 270°C, por lo que el fluido de absorción puede ser vapor de agua saturado. Esto hace que no haga falta un intercambiador de calor en el

ciclo de potencia y que tampoco haga falta que el tubo absorbedor tenga cámara de vacío. Lo que abarata los costes.

Este tipo de plantas necesitan menos espacio entre colectores que las centrales CCP, lo que hace que el campo solar, para generar la misma potencia, sea menor.

Aunque su rendimiento sea menor que el de las centrales CCP la diferencia de precio hace que pueda resultar una opción interesante. Por ejemplo, en lugares en los que no es posible la utilización de grandes extensiones de terreno.

Por último, hay que mencionar que con esta tecnología no es posible almacenar el calor ni la energía generada.



### 3. Ilustración: Central colectores Fresnel

#### Ventajas:

- Como se ha mencionado anteriormente los espejos son planos y el ciclo Rankine no necesita un intercambiador de calor. Esto, además de simplificar la planta hace que sea una tecnología barata.
- La distancia necesaria entre los espejos es menor que en las otras tecnologías. Por lo que el campo solar necesario será menor.

#### Desventajas:

- Los ratios de concentración son bajos, 20:1. Y en consecuencia, las temperaturas que se pueden conseguir también, 270°C.

- La simplicidad del ciclo Rankine que se ha mencionado como ventaja hace que el rendimiento del ciclo sea bajo.
- No tiene la posibilidad de almacenar energía.
- A día de hoy, es todavía una tecnología poco madura.
- Tiene problemas con el tratamiento del agua que se utiliza en el ciclo.

#### **5.4. CILINDRO PARABOLICO**

Es la tecnología más madura de las cuatro. Se empezó a instalar en los años 80. Y a día de hoy en España hay instalados más de 2300MW.

Este tipo de centrales se dividen en dos partes. Por una parte está el heliostato y por otra el ciclo de potencia. En este caso, el heliostato estará formado por espejos de forma parabólica. Los cuales reflejan la radiación solar a un tubo absorbedor que pasa por la línea focal del espejo. Con este método se consigue una relación de concentración de luz de en torno a 80:1. Además, los colectores tienen seguimiento solar de un eje, de esta forma se maximiza el rendimiento de la planta.

El tubo receptor transporta el fluido térmico, pueden ser sales o un aceite térmico. Normalmente, el fluido no supera los 400°C. El fluido transporta el calor al generador de vapor del ciclo de potencia, ciclo de potencia Rankine.

En este texto se va a analizar el funcionamiento de una planta de este tipo, por lo que se explicara su funcionamiento más adelante.



#### 4. Ilustración: Central CCP

##### Ventajas:

- Es la tecnología más madura de las cuatro. Lleva siendo utilizada de forma comercial desde la década de los 80.
- El uso de un fluido calorportador optimiza la transferencia calor.
- El ratio de concentración lineal puede llegar a 80:1, lo que hace que alcance temperaturas elevadas, 399°C.
- Tiene posibilidad de almacenamiento energético. Mediante sales fundidas.

##### Desventajas:

- Los espejos curvos necesarios en este sistema son muy difíciles y caros de fabricar.
- Que un fluido atraviese el campo solar complejiza la planta.
- Para el funcionamiento óptimo de los espejos la separación entre las filas debe de ser grande, lo que hace que el campo solar necesite una superficie muy amplia.
- El tratamiento del agua necesaria para la limpieza de los espejos supone un problema.

## 6. ALTERNATIVA SELECCIONADA

Una vez descritas las características de las distintas alternativas termosolares, a la hora de decantarse por alguna de ellas, éstas tienen que someterse a un complejo entramado de necesidades muchas veces contrapuestas. Esto hace que el proceso de decisión pueda ser muy complejo. De cara a clarificar esta labor, en este proyecto se enumeran algunas características que se ha considerado pueden tener un peso favorable hacia la elección de la tecnología termosolar. Como son:

Debido a que es una tecnología madura y estable, el alto rendimiento y la capacidad de almacenamiento de energía que tiene se considera que es la mejor opción a llevar a cabo. A pesar del amplio espacio de terreno y la gran inversión que es necesaria.

## 7. DESCRIPCION DE LA PLANTA

### 7.1. DATOS GENERALES

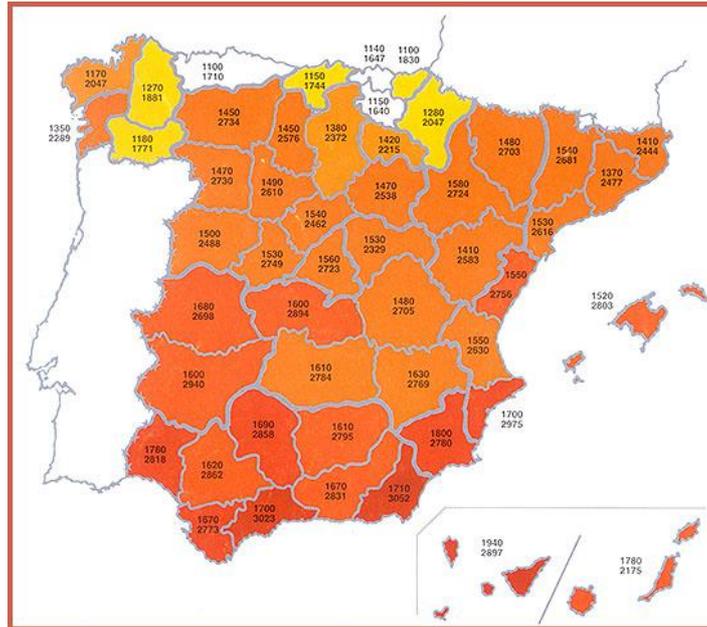
Este documento tomara como referencia una planta situada en la provincia de Cáceres, la cual, es parte de una plataforma solar compuesta por cuatro plantas iguales.

En la tabla adjunta se ven las características principales de cada una de las plantas.

Potencia	50 MW
Generación eléctrica	100.000 MWh/año
Campo solar	110 ha
Hogares que abastece anualmente	26.000
Emisiones de CO <sub>2</sub> evitadas anualmente	31.400 tn

**1. Tabla: Características de cada planta**

En la imagen inferior (5. Ilustración) se plasman tanto la radiación solar anual, como las horas de sol clasificadas por provincias.



**5. Ilustración: Mapa solar de España**

En el caso de Cáceres, donde está situada la central, los datos son los que se muestran en la tabla adjunta (2. tabla).

Radiación solar	1680 (kWh/m <sup>2</sup> año)
Horas de sol anuales	2698 horas

**2. Tabla: Datos de Cáceres**

## 7.2. FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA

Las plantas termosolares están divididas en dos partes. Por un lado el campo solar y por otra el ciclo de potencia Rankine. Además, existe la posibilidad de añadir instalaciones de apoyo con el fin de poder mantener la planta en funcionamiento en los

momentos en los que la radiación solar sea menor de la necesaria para su funcionamiento óptimo (ciertos momentos del día o días nublados). Existen dos posibilidades.

- Almacén de sales fundidas. Almacena el excedente de calor en las horas de mayor radiación, para usarlo en los momentos que haga falta.
- Equipo de potencia de apoyo, este equipo usara combustible convencional. Además de como apoyo a la hora de generar electricidad, este equipo se utiliza para evitar que el fluido térmico se congele.

La central que se estudia en este caso no tiene ni almacén de sales ni equipo de potencia de apoyo.

A continuación, se describirán las principales características tanto del campo solar como del ciclo de potencia.

### 7.2.1. Campo solar

El campo solar estará formado por 360 unidades de colectores. Con un área de apertura de 300.000 m<sup>2</sup>. Cada colector está formado por 12 módulos de 12 metros de longitud y 6 metros de ancho. Cada uno de estos módulos está formado por 28 espejos y tres tubos absorbedores.

Los colectores de 150 metros de longitud, se agrupan de cuatro en cuatro, paralelos de dos en dos y conectados en serie, para formar un total de 90 lazos.

La potencia térmica del campo solar es de 185 MWt. El campo solar está dividido en cuatro secciones, con el bloque de potencia colocado en el centro.

Como ya se ha mencionado anteriormente, esta tecnología permite una concentración sobre el tubo absorbedor de 80 veces la radiación solar directa. Como se explicara más adelante, el tubo absorbedor está colocado en la línea focal de los espejos.

En la tabla adjunta (3. Tabla), se recopilan las características principales del campo solar.

CONCEPTO	VALOR
Area de apertura	300.000 m <sup>2</sup>
Potencia termica	185 MWt
Numero de colectores	360
Numero de colectores por lazo	4
Longitud de cada colector	150 m
Numero de módulos por colector	12

**3. Tabla: Características del campo solar**

### 7.2.2. Ciclo de potencia

El ciclo de potencia que se empleara para la generación de electricidad en este tipo de centrales es un ciclo Rankine. Los ciclos Rankine utilizan el vapor de agua como fluido de trabajo.

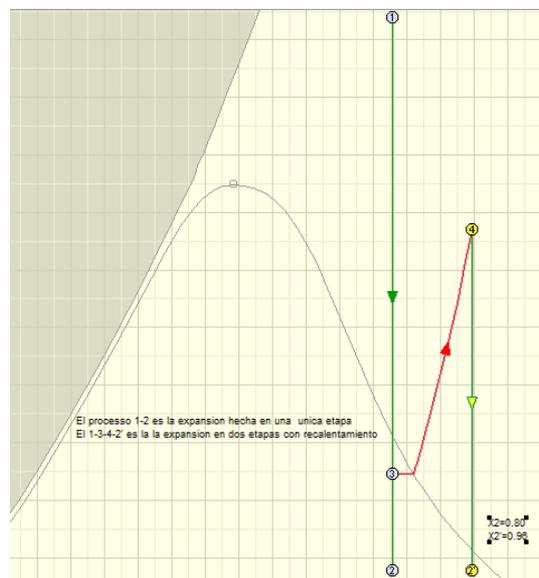
Este ciclo está diseñado para generar una potencia eléctrica de 50 MWe. Para ello, contará con una turbina de dos etapas. La primera, de alta presión y la segunda de baja presión. El vapor se generará en un intercambiador de calor. En él, el fluido de transferencia de calor transferirá el calor absorbido a su paso por el campo solar al agua del ciclo. Para mejorar el rendimiento del ciclo se utilizaran los métodos conocidos como recalentamiento y regeneración, que se explicarán más adelante con más detalle.



El recalentamiento, consiste en devolver a la fase gaseosa el vapor ya saturado en la turbina (de alta presión). Es un proceso que se utiliza con dos objetivos, aumentar el rendimiento térmico del ciclo y proteger a la turbina.

Si el vapor se expande de la presión de entrada de la turbina (80 bar) hasta la de salida (1 bar) en una única etapa, a la salida de la turbina habría muchas gotas de agua, el título sería de alrededor de 0.8, lo que es muy dañino para la turbina. Hay que recordar, que si el título es menor que 0.9, la vida útil de la turbina disminuye significativamente. Por lo tanto, mediante este proceso se consigue que el título no sea en ningún momento menor que 0.9.

En la siguiente imagen se observa cuáles son los estados de salida dependiendo de si la expansión se hace en una o dos etapas, es decir, dependiendo si se hace sin recalentamiento o con él.



## 8. Ilustración: Función del recalentador

El agua sale de la turbina con una presión de 1 bar y entra en el condensador [6], de donde sale en fase líquida [7]. Después, pasa por la primera de las bombas [7-8], donde la presión aumentará hasta los 3 bares.

A la salida de la bomba el agua entrará en un conjunto de dos calentadores, el primero de ellos abierto [8-9] y el segundo cerrado [10-11]. Estos intercambiadores se valen de las extracciones mencionadas anteriormente para llevar a cabo el procedimiento conocido como regeneración.

La regeneración, consiste en extraer parte del caudal de las turbinas y utilizarlo para precalentar el líquido proveniente del condensador, antes de llevar el total de caudal al generador de vapor. Este proceso hace que la temperatura media de absorción de calor en el generador de vapor aumente, lo que mejora el rendimiento térmico del ciclo. Normalmente, en las centrales con múltiples calentadores, como es en este caso, al menos uno de ellos es un calentador abierto, también conocido como degasificador. El degasificador opera a una presión mayor que la atmósfera con el fin de expulsar los gases disueltos en el ciclo.

Al salir del intercambiador cerrado [11] el agua subenfriada entrará en el intercambiador de calor empezando el proceso otra vez.

## **8. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES**

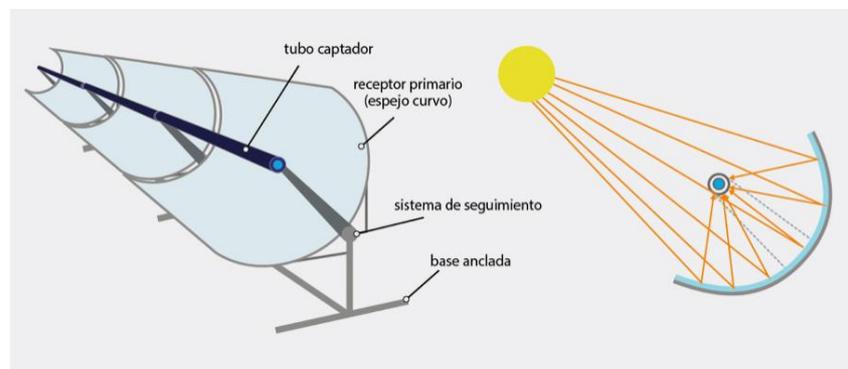
Como se ha mencionado anteriormente, una planta termosolar CCP consta de dos partes, El campo solar, donde se genera el calor necesario en el ciclo de potencia, y el ciclo de potencia, que es donde se genera la electricidad.

A continuación se van a describir los equipos principales de cada una de las partes.

## 8.1. EQUIPOS DEL CAMPO SOLAR

### 8.1.1. Reflectores CCP (espejos)

Los reflectores solares parabólicos, son un grupo de espejos que reflejan la radiación solar que incide sobre ellos en único punto, la línea focal. En este punto estar situado el tubo receptor.



### 9. Ilustración: Receptor cilíndrico parabólico

Los materiales utilizados deben de cumplir dos requisitos básicos:

- Alta reflectividad de los espejos.
- Durabilidad a la intemperie. Normalmente, sufren el efecto de la radiación ultravioleta y el de la corrosión de los contaminantes del aire, tales como el polvo o arena.

A la hora de elegir los materiales que forman el reflector y su estructura, hay tres opciones principales que se expondrán a continuación con sus ventajas e inconvenientes.

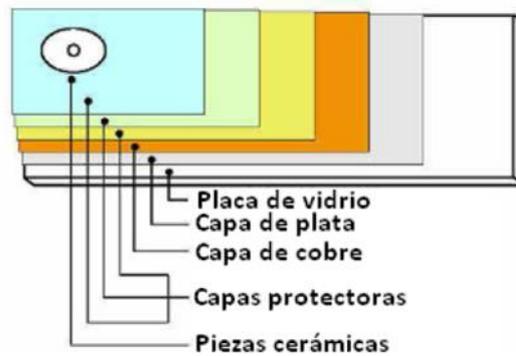
- Chapas metálicas, normalmente de aluminio. Si se utilizan chapas metálicas como soporte, existe la opción de que este material pueda hacer la función de reflector. Para ello lo único que hay que hacer es pulir el material metálico. Es el

método más barato y se consigue una reflectividad relativamente alta, pero no soporta bien las condiciones de la intemperie y presenta grande desgastes.

- La segunda opción es utilizar un soporte de plástico sobre el que se coloca una fina capa de aluminio o plata, que hará las veces de espejo. La versatilidad del plástico permite utilizar todo tipo de soportes. Esta opción tiene dos grandes inconvenientes. El primero es el mismo que en el caso de las chapas metálicas, el gran desgaste que sufre el plástico en condiciones de intemperie. Y el segundo es que el viento puede cargar electrostáticamente el plástico haciendo que partículas de polvo se adhieran al reflector, ensuciándolo y disminuyendo su eficiencia.
- La última opción, y la más utilizada, es usar el vidrio como soporte. Sobre este soporte de vidrio, se coloca una fina capa de plata protegida por una capa de cobre. Sobre estas capas se colocan tres capas protectoras. La primera será una capa base, la segunda una capa fina y un último recubrimiento fabricado con arena del desierto. Finalmente, se utilizan unas piezas de cerámica para unir la estructura reflectante al soporte.

Cada colector está formado por varios espejos, hasta 330. El vidrio de los espejos es un vidrio grueso (4 mm de espesor). Cada espejo tiene 1,7 metros de ancho y una superficie de alrededor de 2 m<sup>2</sup>. La reflectividad del espejo es del 95%, más o menos.

Hoy en día, los espejos tienen un coste de entorno al 20% sobre el coste total de los colectores. Por lo que se están investigando nuevos materiales de cara a abaratar costes.



### 10. Ilustración: Estructura de los espejos de vidrio

En la tabla adjunta (4. tabla), se muestran las características principales de los colectores.

PARAMETRO	VALOR
Longitud focal	1.71 m
Distancia media al foco	2.12 m
Radio absorbedor	3.5m
Longitud absorbedor	4 m
Anchura de apertura	5.77 m
Área de apertura	833 m <sup>2</sup>

4. Tabla: Características de los colectores

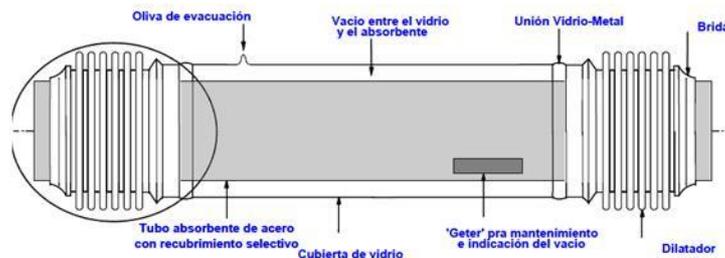
#### 8.1.2. Tubo de absorción

Se encarga de transportar y calentar el fluido térmico que se mueve por su interior. Como se ha mencionado anteriormente, el tubo está situado en la línea focal de los espejos parabólicos, de forma que toda la radiación que incide en los espejos se refleja en el tubo.

Está compuesto por dos tubos concéntricos, el interior es metálico y el exterior de vidrio.

Normalmente el tubo metálico es de acero y tiene una superficie selectiva de alta absorptividad (95%) y una emisión infrarroja inferior al 12%. Estas propiedades hacen que tenga un alto rendimiento técnico. Esta superficie selectiva está formada por cuatro capas. Una capa anti-difusión, una capa de reflexión infrarroja, una capa Cermet y una capa antireflexiva.

Al tubo exterior, de vidrio, tiene unas características ópticas excepcionales. Deja pasar al 96% de la radiación solar y a una temperatura de 400°C emite alrededor del 10% de radiación térmica. Este tubo tiene dos misiones principales. Crear vacío de tal forma que se minimizan las pérdidas por convección y proteger el tubo metálico del polvo, humedad, etc.



## 11. Ilustración: Tubo de absorción

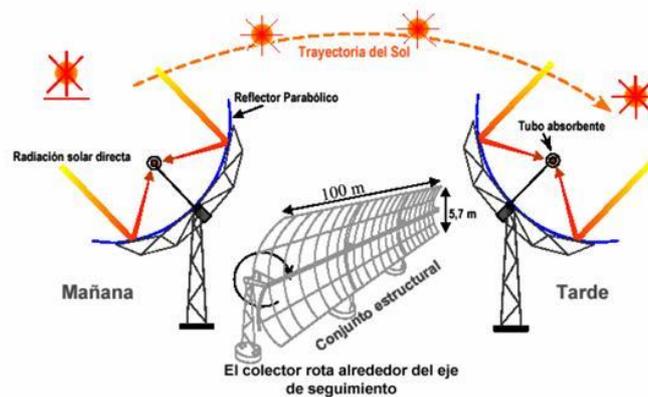
Para asegurar el vacío se utiliza una pieza llamada *getter*. Estas piezas absorben cualquier partícula que se meta en el hueco que se genera entre los tubos.

Entre los tubos absorbentes se colocan unas piezas denominadas dilatadores. Como su propio nombre indica, su función es evitar las tensiones mecánicas derivadas de las distintas dilataciones que sufren los distintos tubos.

### 8.1.3. Sistema de seguimiento

Para poder aprovechar de la manera más eficiente posible la radiación solar, es necesario un sistema que mantenga enfocado el colector hacia el sol a lo largo de todo el día. Este sistema hace girar al colector alrededor de uno o dos ejes. Normalmente se utilizan sistemas de seguimiento de un eje. Ya que son sencillos, robustos y, sobre todo, más baratos que los de dos ejes.

El movimiento de cada colector se hace por medio de motores hidráulicos colocados en el pilón central. Se utilizan este tipo de motores ya que es necesario un elevado par de giro para poder mover los colectores (cada colector puede alcanzar los 150 metros de largo).



## 12. Ilustración: Seguimiento solar

Hay dos ejes de rotación posibles: de Norte a Sur o de Este a Oeste. Se elige un eje de rotación u otro, dependiendo de la latitud en la que este situada la central. Se elige la orientación Este-Oeste, entre las latitudes  $30^\circ$  y  $45^\circ$ . Con esta orientación el eje colector se sitúa a lo largo de la línea Norte-Sur, realizando el movimiento de Este a Oeste. La

central a estudio en este texto, está situada en la latitud  $39^\circ$ , por lo que tiene un sistema de orientación Este-Oeste.

#### **8.1.4. Cimentación y estructura**

La cimentación fija los captadores al suelo y aguanta los esfuerzos y cargas que los colectores generan. Los esfuerzos generados por el viento y el propio peso de los colectores son las principales fuerzas que hay que tener en cuenta a la hora de dimensionar la cimentación. Que por norma general, es de hormigón armado.

La estructura del colector, da rigidez al colector y sirve de apoyo para los reflectores. Actualmente, se fabrican de metal pero se están investigando nuevas estructuras de fibra de vidrio o materiales plásticos con la intención de abaratar costes.

La estructura de los colectores puede operar con vientos de hasta 20 m/s, pero por precaución, cuando la velocidad llega a 16 m/s los espejos se colocan en posición stow ( $-30^\circ$ ). De esta forma su exposición al viento es mínima.

Los principales componentes de la estructura son los siguientes:

- Pilonas
- Brazos del soporte
- Soportes del tubo receptor
- Caja estructural

#### **8.2. Fluido térmico**

La función del fluido térmico es transportar el calor desde los colectores solares hasta el generador de vapor, donde transferirá el calor absorbido en el campo solar al ciclo de potencia.

Hay varias opciones a la hora de elegir el fluido térmico. Por una parte está la posibilidad de usar agua en el campo solar. Esta opción tiene un gran inconveniente. Y es que, se tiene que mantener la presión del circuito por encima de la presión de saturación de la temperatura máxima que se alcance en la instalación. Esto hace que haya que aumentar las medidas de seguridad lo que encarece mucho la planta.

Otra opción es, usar aceite térmico. Esta opción junto al uso de sales es la más extendida. Este aceite tiene una temperatura de congelación baja, alrededor de 10°C. Por lo que en momentos del día, o épocas del año, en las que la radiación solar no sea suficiente para que la planta pueda estar en funcionamiento, resulta bastante barato mantener el aceite por encima de la temperatura de congelación. El gran problema del aceite es que por encima de los 400°C se degrada, limitando el funcionamiento de la planta.

La central a estudio utiliza sales fundidas. Estas sales están compuestas por una mezcla de  $\text{KNO}_3$  y  $\text{NaNO}_3$ . Las sales permiten una temperatura de salida mayor al resto de fluidos, alrededor de los 450°C-550°C. Esto hace que aumente el rendimiento de la planta. Además de esto, no corroen prácticamente la instalación y son más baratas que el aceite térmico. El gran problema que tienen las sales fundidas es que su punto de congelación es muy alto, dependiendo del compuesto oscila entre los 120°C y los 220°C. Esto hace que sea necesario un sistema de mantenimiento de temperatura de las sales, ya que si se congelan puede colapsarse el equipo.

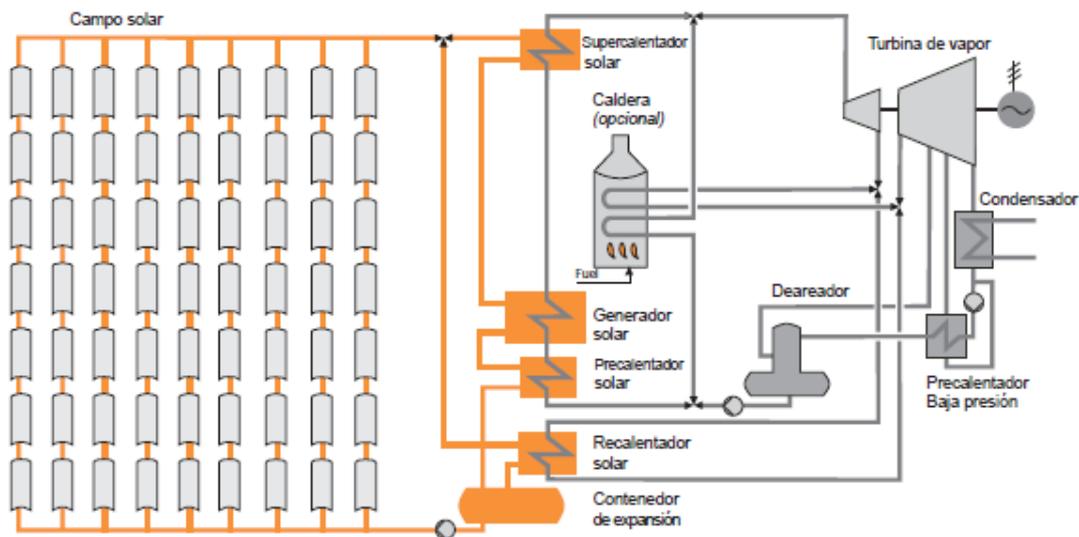
En la siguiente tabla se recogen las principales características de estas sales.

Calor específico en fase sólida	1,7 (J/g.°C)
Calor específico en fase líquida	1,6(J/g.°C)
Conductividad térmica	1-3 (W/m.K)

**5. Tabla: Características principales del fluido térmico**

### 8.3. EQUIPOS DEL CICLO DE POTENCIA

En la próxima imagen (13. Ilustración) se muestra el esquema de la planta solar. A continuación se describe y se explica el funcionamiento de los equipos principales de la planta.



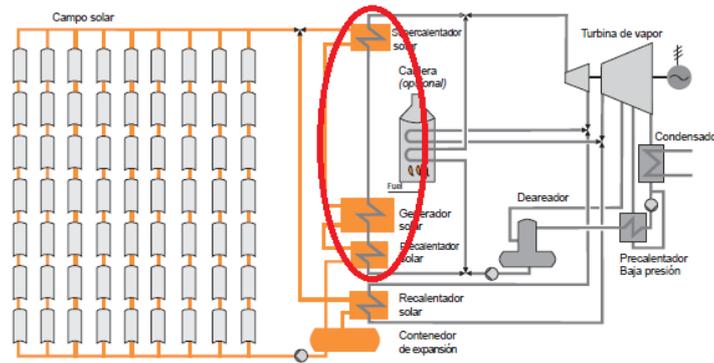
13. Ilustración: Esquema de la planta termosolar

#### 8.3.1. Generador de vapor

Son dispositivos que tienen como objetivo calentar (o enfriar) un fluido, valiéndose de otro que este a una temperatura mayor (o menor). En esta etapa, el HTF proveniente del campo solar le transferirá su calor al agua del ciclo Rankine.

En esta planta, los intercambiadores de calor se usaran con dos finalidades distintas. La primera será la generación de vapor principal y la segunda será como recalentadores. A continuación, se describirá cada una de ellas.

### 8.3.1.1. Generación de vapor principal



#### 14. Ilustración: Generador de vapor principal en el ciclo

El sistema de generación de vapor es donde el fluido de trabajo consigue las condiciones óptimas para generar trabajo en la turbina. En este caso 520°C y 80 bares. Para ello se vale de dos trenes de intercambiadores en paralelo. Cada uno de los trenes consta de tres intercambiadores diferentes (economizador, evaporador y sobrecalentador) que se describirán más adelante.

El motivo principal por el que se lleva el líquido frío que sale del condensador, hasta las condiciones de entrada a la turbina en tres etapas diferentes, es para aumentar la eficiencia de la planta.

- Economizador

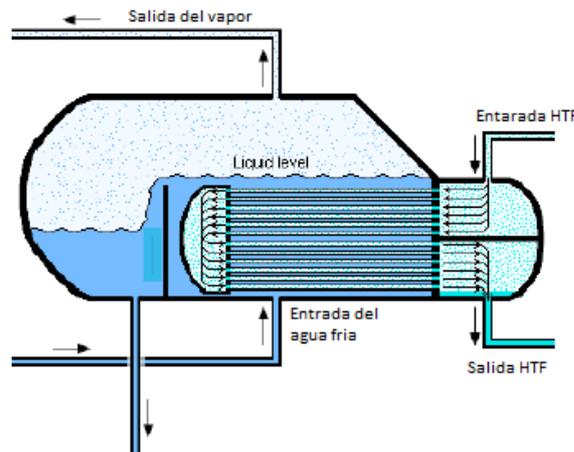
El economizador (o precalentador) tiene la función de calentar el agua hasta temperaturas cercanas, pero inferiores, a la de ebullición. Esto hace que la transferencia de calor en el evaporador sea óptima, aumentando de forma considerable el rendimiento térmico de la central.

Tanto el economizador como el sobrecalentador serán intercambiadores de calor de tipo carcasa-tubo, se explicara más adelante con más detalle.

- Evaporador

En el evaporador se consigue vapor en condiciones de saturación. A la salida del evaporador se coloca un separador de gas, con el objetivo de separar las gotas de agua que hayan podido ser arrastradas a lo largo del proceso. Estas gotas podrían ser realmente dañinas para el sobrecalentador.

El evaporador utilizado en esta planta es del tipo kettle. La temperatura del líquido frío entrante en ellos suele ser cercana a la de vaporización ( $T_{sat}$  para la presión en la que se encuentre el líquido). Como se ha mencionado anteriormente el agua proveniente del economizador está cerca de las condiciones de saturación.



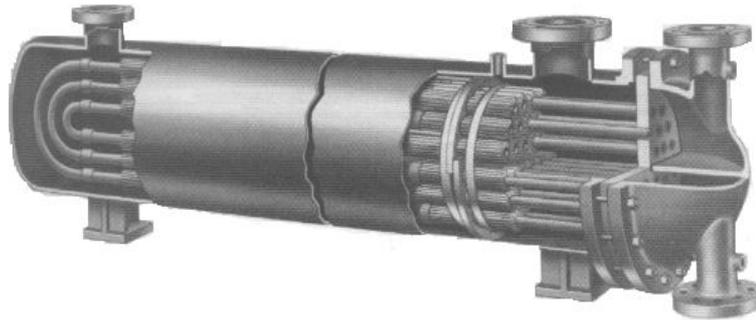
### 15. Ilustración: Intercambiador de calor tipo kettle

- Sobrecalentador

El sobrecalentador se encarga de conseguir las condiciones necesarias del vapor en la entrada de la turbina para que el funcionamiento de la misma sea el óptimo.

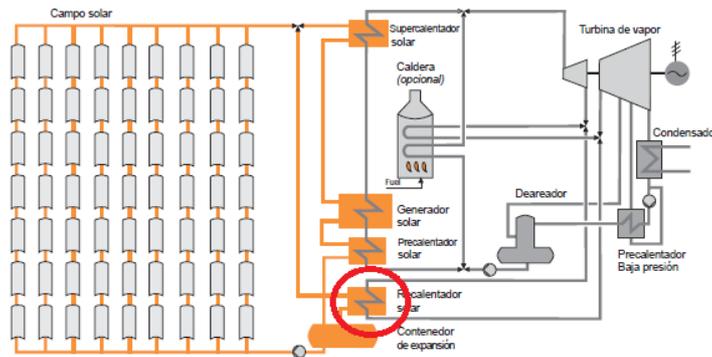
Como se ha mencionado anteriormente, será un intercambiador de tipo carcasa-tubo. Estos intercambiadores son los más usados en la industria, ya que son los más

eficientes. Tienen dos cámaras de presión diferentes, los tubos y la carcasa. En este caso, el HTF ira por los tubos y el agua por la carcasa.



**16. Ilustración: Intercambiador de calor tipo carcasa-tubo**

### 8.3.1.2. Recalentador

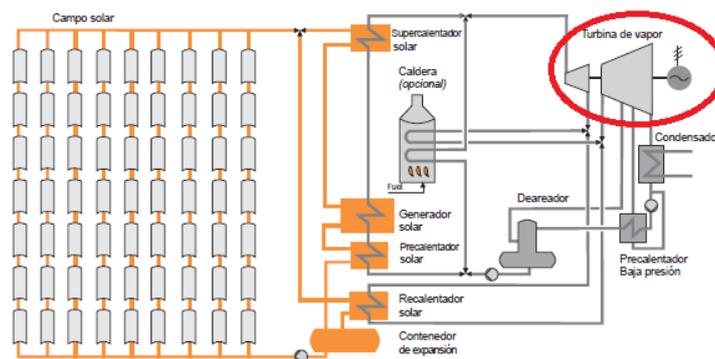


**17. Ilustración: Precalentador**

El vapor que sale de la turbina de alta presión después de haber generado trabajo, se lleva al recalentador, donde es calentado para volver a expandirse en la turbina de baja presión. Hay que mencionar que parte del vapor que ha entrado en la turbina ha sido extraído para ser utilizado en el precalentador. Por lo que en esta etapa el caudal es menor que en el generador de vapor principal.

El recalentador será un intercambiador del tipo carcasa-tubo a contracorriente y será el HTF el que le transfiera el calor.

### 8.3.2. Grupo turbina-alternador



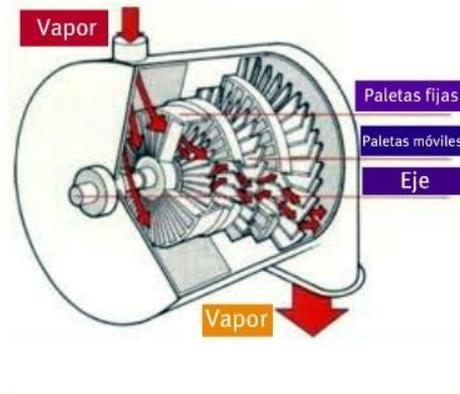
#### 18. Ilustración: Grupo turbina-alternador en el ciclo

El grupo turbina-alternador se encarga de generar la electricidad. El alternador convierte en energía eléctrica la energía mecánica que la turbina consigue del vapor.

#### 8.3.2.1. Turbina

Se va a usar una turbina de reacción de dos etapas con extracciones de vapor en ambas etapas. Diseñada para poder dar tiempos rápidos de activación y de parada, necesario para permitir los horarios de inactividad.

En las turbinas de reacción hay dos grupos de alabes. Los alabes fijos y los móviles. Los fijos actúan como toberas, dirigen el vapor a los alabes móviles. Una diferencia de presión entre los dos lados de las ruedas de los alabes lo que hace girar al rotor. La presión va disminuyendo hasta que al final la presión a la salida de la turbina es menor que la atmosférica .



### 19. Ilustración: Turbina de reacción

El vapor entra a la primera etapa de la turbina, cuerpo de alta presión, donde se expande hasta una presión intermedia. De aquí, el vapor se pasa al recalentador y posteriormente por el cuerpo de baja presión.

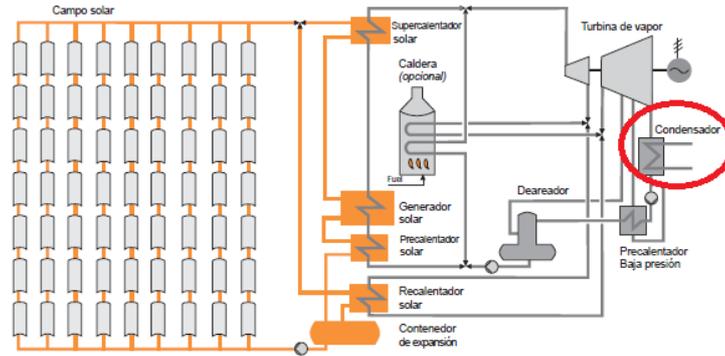
La gran parte del trabajo lo realiza el cuerpo de baja presión. Al trabajar con menor presión, la temperatura de evaporación del agua disminuye, lo que permite que el salto térmico sea mayor, y que en consecuencia la potencia obtenida sea mayor. El cuerpo de alta presión aumenta el rendimiento global del ciclo.

#### 8.3.2.2. Alternador

Alternador síncrono de 50MW y 50 Hz. El alternador trabaja con un factor de potencia de 0,9 a 11kV.

La energía generada se conduce al transformador principal de la planta, donde se conecta con la red eléctrica.

### 8.3.3. Condensador de vapor

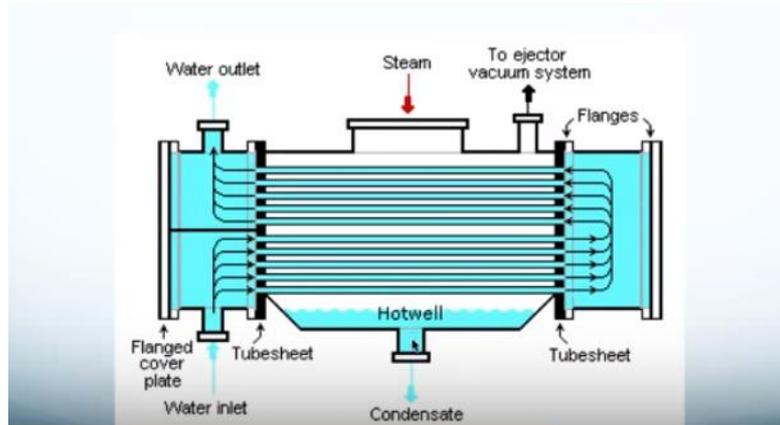


#### 20. Ilustración: Condensador en el ciclo

A la salida de la turbina se tiene una mezcla de vapor y líquido sin ninguna capacidad para generar trabajo. Su temperatura es muy baja y su presión 1 bar. Por lo que para poder aprovecharla hay que condensarla. Condensando esta agua se consiguen varias cosas.

- Se consigue a la salida de la turbina una presión inferior a la atmosférica. Esto hace que el salto de la presión entre la entrada y la salida de la turbina sea más grande y en consecuencia también la potencia generada. Si el vapor saliese de la turbina directamente a la atmósfera no se podría conseguir un salto de presión tan grande.
- Presurizar un líquido, por su incompresibilidad, es más barato y fácil que presurizar un gas. ¿¿Comprimir vapor hasta la presión de entrada de la turbina consume más energía que la que se generaría en su expansión??

Para condensar el agua saliente de la turbina se utilizara un intercambiador de calor carcasa-tubo en el que se usara agua fría para condensar el vapor que sale de la turbina. El agua fría circulara por los tubos en este caso, y el vapor del ciclo circulara por la carcasa. El agua condensada se almacena en una piscina de donde es bombeada. Este punto es el idóneo para reabastecer el ciclo Rankine en caso de que fuera necesario.



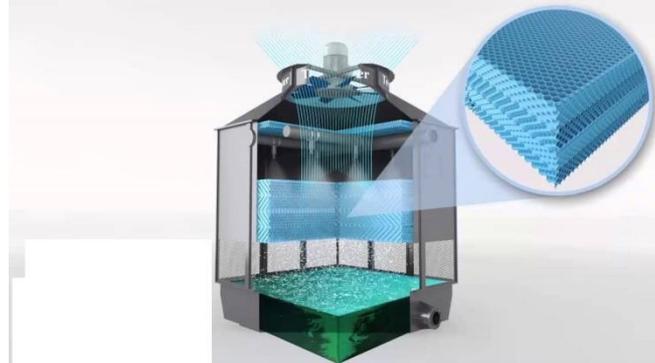
## 21. Ilustración: Condensador

Hay que mencionar que el proceso de condensación (cualquier cambio de fase) requiere de una gran cantidad de energía, en torno a 2000 kJ/kg. Por este motivo, la temperatura del agua de refrigeración debe ser lo más baja posible y se necesita una gran superficie para que la transferencia de calor se óptima.

El agua fría o agua de refrigeración viene de la piscina de la torre de refrigeración. En este caso es una torre de refrigeración húmeda con tiro mecánico inducido. A continuación se explicara con más detalle su funcionamiento.

### 8.3.4. Torre de refrigeración

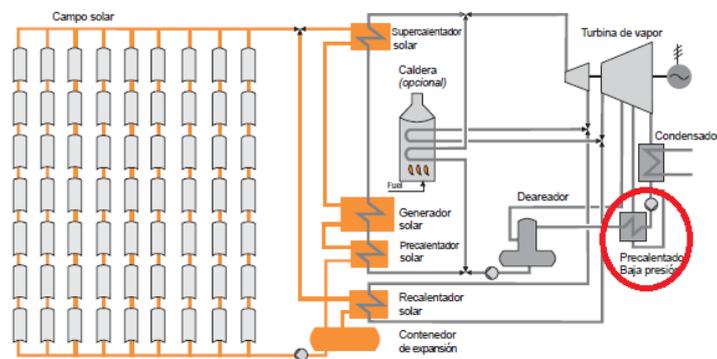
En estas centrales se utilizan torres de refrigeración húmedas con tiro mecánico inducido. Estas torres tienen un ventilador en la parte superior que genera una depresión. Esta depresión hace que el aire circule de abajo a arriba.



## 22. Ilustración: Torre de refrigeración

El agua proveniente del condensador se pulveriza en la parte superior de la torre. Esta agua cae sobre un relleno, cuyo objetivo es aumentar el tiempo de retención y el contacto con el aire ascendente. Esta interacción con el aire hará que parte del agua se evapore y salga por la parte superior de la torre, otra fracción de agua será arrastrada por el aire y saldrá junto al agua evaporada y el resto caerá a la piscina que hay en la parte inferior de la torre. Como consecuencia de la evaporación de parte del agua, el agua que no se ha evaporado se. Es de recalcar que es necesaria la reposición del agua constante, ya que como se puede observar, solo una parte del agua que es pulverizada llega a la piscina.

### 8.3.5. Precaentador



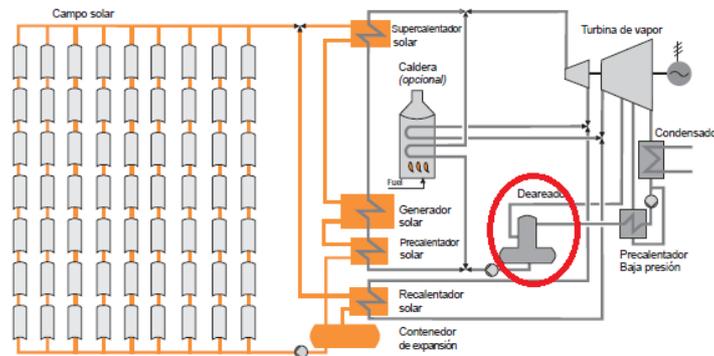
## 23. Ilustración: Precaentador en el ciclo

El precalentador aumenta la temperatura de entrada del agua en el generador de vapor facilitando la transmisión de calor. Con esto, se aumenta notablemente el rendimiento del ciclo de potencia.

Utilizan el vapor de las extracciones de las turbinas para calentar el fluido. Dependiendo de la turbina de la que se hayan realizado las extracciones habrá precalentadores de alta y baja presión. En este caso, las extracciones de la turbina de baja presión se utilizarán en el desgasificador, siguiente punto, y serán las extracciones hechas en la turbina de alta presión las que se utilicen el precalentador.

El intercambiador de calor es de carcasa-tubo del tipo U. El agua condensada fluirá por dentro de los tubos y la de las extracciones por la carcasa.

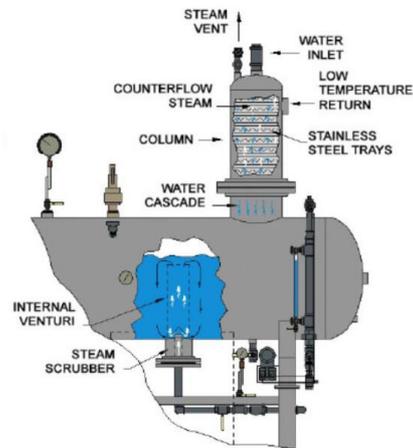
### 8.3.6. Desgasificador



### 24. Ilustración: Desgasificador en el ciclo

El objetivo principal del desgasificador es reducir la concentración de los gases indisolubles que hay dentro de los conductos. La concentración de estos gases debe de estar por debajo de 7 ppb (partes por billón), ya que si se encuentran por encima de este valor la vida útil de la central se reduce exponencialmente.

En el desgasificador confluye el vapor procedente de la turbina de baja presión, el agua que sale del precalentador de alta presión y el agua del condensador.



## 25. Ilustración: Desgasificador

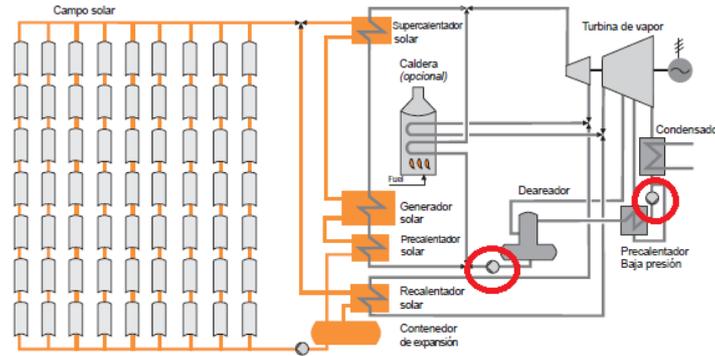
En este caso, el desgasificador será del tipo térmico. Este tipo de desgasificador consta de dos cuerpos. En el primero se realiza la desgasificación y en el segundo se almacena el agua.

Para que la transferencia de calor sea la adecuada, se han de cumplir las siguientes condiciones:

- El tiempo de residencia debe ser elevado. Para ello se nebuliza el agua, de esta forma las gotas tienen mayor superficie en relación con su peso.
- La superficie de contacto debe ser elevada. Se colocan unas bandejas en zig-zag, para que el agua haga un mayor recorrido.
- El coeficiente de transferencia de calor debe ser alto.

En la parte superior del desgasificador hay una válvula de sobrepresión por donde se expulsa el aire cuando la presión aumenta más de lo deseado.

### 8.3.7. Bombas



#### 26. Ilustración: Bombas en el ciclo

El único objetivo de las bombas es el de propulsar el agua a través de todo el circuito. Para ellos se colocan dos grupos de bombas. El primero a la salida del condensador y el segundo a la salida del desgasificador.



#### 27. Ilustración: Bomba centrífuga

El primer grupo de bombas eleva la presión del agua hasta la presión del desgasificador, 3 bares en este caso.

El segundo grupo, aumentará la presión hasta la presión máxima del circuito, es decir 80 bares.

Los dos grupos de bombas están compuestos por tres bombas en paralelo. Cada una de las bombas tiene capacidad para bombear el 50% del caudal del circuito. Dos bombas operan a la par mientras la tercera está en reserva.

Como se ha mencionado anteriormente, es conveniente que solo entre agua en fase líquida en la bomba, ya que este tipo de bomba es incapaz de presurizar vapor.

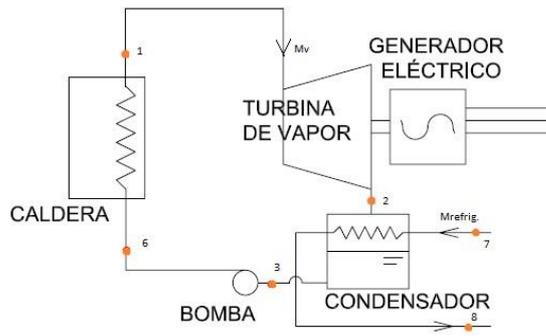
### **8.3.8. Equipos auxiliares**

Los principales equipos auxiliares que necesita una central termosolar de colectores cilíndrico parabólicos para su funcionamiento son los siguientes:

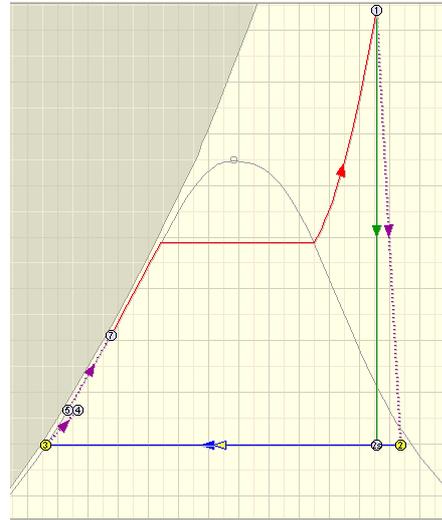
- Sistema de refrigeración de equipos.
- Planta de tratamiento de agua.
- Planta de tratamiento de efluentes.
- Sistema de limpieza de espejos.
- Estación meteorológica.
- Sistema de aire comprimido.
- Sistema contra incendios.

## **9. CALCULOS Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS PRINCIPALES**

Debido a la gran distancia existente entre el alcance del trabajo y el dimensionamiento de una planta, se plantea una aproximación que intente reflejar una imagen lo más fiel posible. Para ello se utilizará un modelo representado en la siguiente imagen (ilustración 27).



**28. Ilustración: Aproximación de la planta**



**29. Ilustración: Diagrama T-s de la aproximación**

En la siguiente tabla se exponen las características principales del ciclo de potencia.

PARAMETRO	VALOR
Potencia eléctrica neta	50 MWe
Rendimiento alternador	0,97
Rendimiento turbina	0,85
Rendimiento isotrópico de la turbina	0,7
Rendimiento isotrópico de las bombas	0,65
Estado a la salida del generador de vapor	$T_1=520^{\circ}\text{C}$ y $P_1=80\text{bar}$
Presión salida de la turbina	$P_2=1\text{bar}$
Presión desgasificador	$P_4=3\text{bar}$

**6. Tabla: Características del ciclo de potencia**

Teniendo en cuenta tanto el rendimiento del alternador como el de la turbina, para generar 50 MWe será necesario generar 60,6428 MW térmicos.

$$W_{termico} = \frac{50 \text{ MW}}{0,85 * 0,97} = 60,6428 \text{ MW}$$

Los cálculos presentados en adelante, se refieren a cada uno de los componentes del ciclo de potencia.

### Turbina

$$\eta_{iso.}^{turb.} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \rightarrow h_2 = h_1 - \eta_{iso.}^{turb.} * (h_1 - h_{2s}) \rightarrow$$

$$\rightarrow 3446,79 - 0,7 * (3446,79 - 2461,28) = 2756,933 \left(\frac{kJ}{kg}\right)$$

$$W_{termico} = \dot{m}_v * (h_1 - h_2) \rightarrow \dot{m}_v = 87,9064 \left(\frac{kg}{seg}\right)$$

### Condensador

$$(h_2 - h_3) * \dot{m}_v = \dot{m}_{refrigeracion} * (h_8 - h_7) \rightarrow \dot{m}_{refrigeracion} = 8102,5238 \left(\frac{kg}{seg}\right)$$

$$\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}_v * (h_2 - h_3) = 205608,5 \text{ (kW)}$$

### 1. bomba

$$\dot{W}_{B1}^t = -\dot{m}_v * \int_{P_3}^{P_4} v * dp = \dot{m}_v * v_3 * (P_4 - P_3) = 15,1013 \text{ (kW)}$$

$$\dot{W}_{B1}^{real} = \frac{\dot{W}_{B1}^{teorico}}{\eta_B} = 23,2327 \text{ (kW)}$$

### 2. bomba

$$\dot{W}_{B2}^t = -\dot{m}_v * \int_{P_5}^{P_6} v * dp = \dot{m}_v * v_5 * (P_6 - P_5) = 598,6798 \text{ (kW)}$$

$$\dot{W}_{B2}^{real} = \frac{\dot{W}_{B2}^{teorico}}{\eta_B} = 921,0458 \text{ (kW)}$$

### Generador de vapor

$$\begin{aligned}
 Q_{campo \ solar} &= \dot{m}_v * (h_1 - h_6) = 72,3935 * (3446,79 - 883,102) \\
 &= 185594,3472 \text{ (kW)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{campo \ solar} &= \dot{m}_{HTF} * c * (T_{entrada} - T_{salida}) \rightarrow \dot{m}_{HTF} = \frac{\dot{Q}_{campo \ solar}}{c * (T_{entrada} - T_{salida})} \\
 &= \frac{185594,3472 \left(\frac{kJ}{seg}\right)}{1,6 \left(\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}\right) * (450 - 250)(^\circ C)} = 583,63 \left(\frac{kg}{seg}\right)
 \end{aligned}$$

En la siguiente tabla se muestran los principales resultados obtenidos.

CONCEPTO	VALOR
Trabajo térmico de la turbina	60,6428 MW
Trabajo realizado por la primera bomba	23,2327 kW
Trabajo realizado por la segunda bomba	921,0458 kW
Calor obtenido en el generador de vapor	185.594,3472 kW
Calor cedido en el condensador	205608,5 kW
Flujo másico del vapor	72,3935 (kg/seg)
Flujo másico del agua de refrigeración	8102,5238 (kg/seg)
Flujo másico del agua de refrigeración	583,63 (kg/seg)

**7. Tabla: Tabla de resultados**

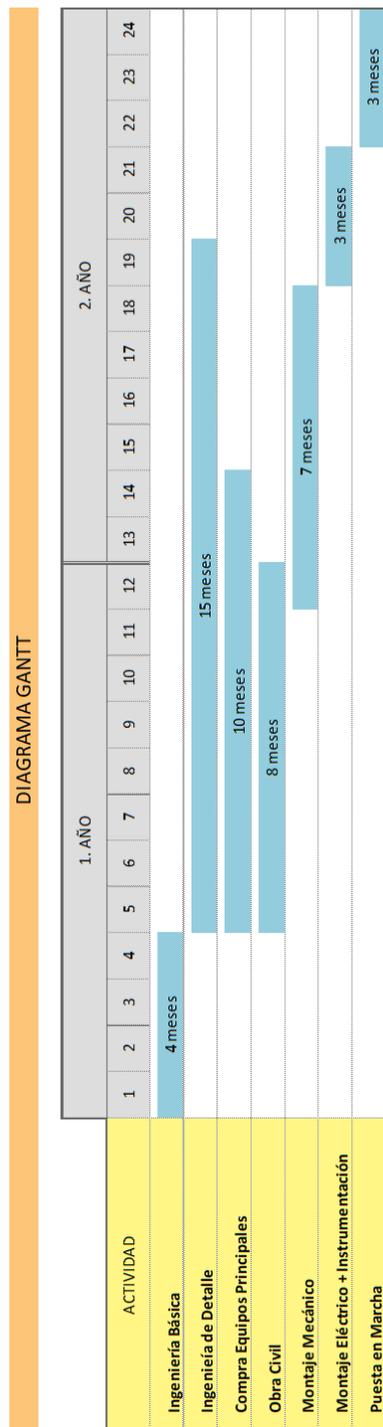
## 10. ESTUDIO ECONOMICO

Se esboza un presupuesto que atañe a el desarrollo constructivo de la planta. Hay que mencionar que no se incluyen otras partidas muy importantes en ciclo de vida de la misma como pueden ser el mantenimiento, costes de operación, etc.

CONCEPTO	VALOR
Campo Solar	90.000.000 €
Generador de Vapor	35.000.000 €
Turbina-Alternador	27.000.000 €
Equipo Auxiliar	25.000.000 €
Obra Civil	48.000.000 €
Montaje	28.000.000 €
Montaje Eléctrico y Instrumentación	32.000.000 €
<b>TOTAL</b>	<b>285.000.000 €</b>

**8. Tabla: Presupuesto**

## 11. DIAGRAMA DE GANTT



30. Ilustración: Diagrama de Gantt

## 12. BIBLIOGRAFÍA

- Sitio Web: [https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project\\_detail.cfm/projectID=233](https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=233)
- Sitio Web: <http://opex-energy.com>
- Sitio Web: <http://www.sc.ehu.es/nmw migaj/Torre.htm>
- Sitio Web: <https://www.protermosolar.com/>
- Michael J.Moran y Howard N.Shapiro. (2004). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Barcelona: Reverté.
- D. Santiago García Garrido. (2012). Principios de funcionamiento de las centrales solares termoeléctricas. En Guía técnica de la energía Solar Termoeléctrica (13-48). Madrid: Arias Montano.
- D. Santiago García Garrido. (2010). Ingeniería de centrales termosolares CCP : estado del arte en tecnología termosolar. Madrid: Renovetec
- D. Juan R. Fernández García-Revilla. (2012). Centrales termosolares con tecnología de captadores cilindro parabólicos. En Guía técnica de la energía Solar Termoeléctrica (249-270).Madrid: Arias Montano.
- Aynat Piquer, A. (2012). Determinación del ciclo de vapor de una central termosolar termoeléctrica CCP de 50MW. Universidad Carlos III de Madrid.
- De la Peña Aranguren, Víctor y Herranz Soler, Margarita. (2014). Centrales Termosolares. Bilbao.