

Universidad de Alcalá

Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Y

AUTOMÁTICA INDUSTRIAL

Trabajo Fin de Grado



ORIENTACIÓN Y CONTROL DE LOS CILINDROS PARÁBOLICOS EN PLANTAS TERMOSOLARES

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autora: Alexandría Margareth González Cuesta

Tutor: Ignacio Bravo Muñoz

2015

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Y

AUTOMÁTICA INDUSTRIAL

Trabajo Fin de Grado

ORIENTACIÓN Y CONTROL DE LOS CILINDROS PARÁBOLICOS EN PLANTAS TERMOSOLARES

Autora: Alexandría Margareth González Cuesta

Director: Ignacio Bravo Muñoz

TRIBUNAL:

Presidente:

Vocal 1º:

Vocal 2º:

CALIFICACIÓN:

FECHA:



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecer a mi familia el apoyo que me habéis dado y la confianza que habéis tenido en mí, estos cinco años de carrera y siempre.

También gracias, amigos, por cada una de las etapas que habéis compartido conmigo: ilusiones, sufrimiento, conocimiento, exámenes, éxito, viajes... e infinidad de momentos inolvidables.

A cada uno de los profesores que he tenido, porque con cada uno de vosotros he aprendido, analizado, y me he enfrentado a diferentes situaciones. He podido hacer mi proyecto con las asignaturas que me habéis impartido a lo largo de mi carrera, desde el principio hasta mi fin. Mi futuro para aplicar cada conocimiento aún está por venir, pero os expreso que siempre estaré agradecida, que no sólo estoy ahí en ese puesto por mí, sino también por vosotros.

Por último a mi tutor, Ignacio Bravo Muñoz, por su apoyo y paciencia. No sólo gracias por estar aquí conmigo, en la finalización del proyecto y finalización de mi carrera, sino también porque he sacado yo mi propia conclusión de toda mi carrera y para mi futuro próximo: "No hay que ver cuántos errores comete uno mismo, sino cómo solucionar cada uno de ellos".

Os reitero mi agradecimiento a cada uno de vosotros.





ÍNDICE

1.	Resumen en castellano	11
2.	Resumen en inglés	12
3.	Palabras clave	13
4.	Resumen extendido	14
5.	Contenido de la memoria.....	16
5.1	Introducción	16
5.2	Descripción de la memoria.....	20
5.3	Objetivos	20
5.4	Descripción general de las plantas termosolares en CCP	22
5.4.1	Tecnología Stirling.....	25
5.4.2	Tecnología de Torre.....	27
5.4.3	Tecnología Cilindro-Parabólico.....	28
5.4.4	Tecnología Fresnel	29
5.4.5	Comparación de las Plantas Termosolares.....	30
5.4.6	Plantas Construidas en España.....	33
5.5	Descripción de las plantas termosolares basadas en la simulación de este proyecto.....	39
5.6	Funcionamiento de los diferentes sistemas de las plantas termosolares de Colectores Cilindros Parabólicos.....	41
5.6.1	El campo solar	41
5.6.1.1	Elementos fundamentales de un Colector Cilíndrico Parabólico Solar (CCP).....	42
5.6.2	Sistema de potencia	49
5.6.2.1	El sistema de bombeo.....	50
5.6.2.2	Los tanques de expansión.....	50
5.6.2.3	Los trenes de generación de vapor.....	50
5.6.2.3.1	Turbina.....	51
5.6.2.3.2	Generador.....	51
5.6.2.3.3	Intercambiador de calor.....	52



5.6.2.3.4 Ciclo Rankine.....	52
5.6.3 Sistema de almacenamiento térmico (TES)	54
5.6.4 Sistema de Control para el seguimiento solar	54
5.6.4.1 Sistema de seguimiento solar en el mercado.....	54
5.6.4.2 Sistema de seguimiento solar aplicado a nuestro proyecto.....	56
5.6.5 Explicación breve del funcionamiento de todo el conjunto de sistemas.....	57
5.7 Funcionamiento general de las plantas termosolares en CCP	60
5.8 Funcionamiento de las plantas termosolares basado en la simulación de este proyecto	62
5.9 Problemas en las plantas termosolares de CCP	65
5.10 Simulación de una planta Termosolar de SCADA en Visu +	67
5.10.1 Características generales del Visu +.....	68
5.10.2 Simulación de la planta termosolar en pantallas.....	68
5.11 Problemas y Soluciones.....	78
5.12 Resultados y conclusiones de este proyecto	79
6. Manual de usuario.....	80
7. Presupuesto	85
8. Bibliografía	89



ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y ESQUEMAS

FIGURA 1 <LAZO SOLAR DE UNA CENTRAL CCP >.....	18
FIGURA 2 <COMPARACIÓN DE LAS PLANTAS TERMOSOLARES EXISTENTES >.....	19
FIGURA 3 <DISCOS PARABÓLICOS CON MOTORES STIRLING >.....	25
FIGURA 4 <TECNOLOGÍA DE TORRE CENTRAL>.....	27
FIGURA 5 < CONCENTRADOR (REFLECTOR), TUBO ABSORBEDOR Y SISTEMA DE SEGUIMIENTO>.....	28
FIGURA 6 < TECNOLOGÍA FRESNEL >.....	29
FIGURA 7 < CILINDROS CONECTADOS EN SERIE EN UNA PLANTA TERMOSOLAR BASADA EN LA REALIDAD >.....	39
FIGURA 8 < SEGUIMIENTO SOLAR DE LOS COLECTORES ESTE-OESTE >.....	40
FIGURA 9 < TUBO ABSORBEDOR, TUBO DE VIDRIO INTERNO Y TUBO DE VIDRIO EXTERNO >..	44
FIGURA 10 < ESTRUCTURA DE LOS ESPEJOS >.....	45
FIGURA 11 < UNIDAD DE POTENCIA: TURBINA Y GENERADOR >.....	51
FIGURA 12 < CICLO RANKINE >.....	53
FIGURA 13 < REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS QUE ESTÁN DESCRITOS ANTERIORMENTE: CAMPO SOLAR, TRENES DE GENERADOR DE VAPOR, TURBINA, GENERADOR, ALMACENAMIENTO TÉRMICO, TANQUE DE EXPANSIÓN/RECIPIENTE EXPANSOR>.....	59
FIGURA 14 < COLECTOR FORMADO POR EL ESPEJO LLAMADO REFLECTOR Y EL TUBO ABSORBEDOR, CON HTF EN SU INTERIOR QUE ATRAVIESAN LOS CCP UBICADO EN LA ZONA FOCAL DEL ESPEJO >.....	60
FIGURA 15 <SISTEMAS DE UNA PLANTA TERMOSOLAR>.....	62
FIGURA 16 < EL GRADIENTE TÉRMICO EN LOS CUATRO COLECTORES >.....	65
FIGURA 17 < TANQUE DE SALES >.....	65
FIGURA 18 < PANTALLA LLAMADA "MAIN SCREEN" >.....	69
FIGURA 19 < PANTALLA LLAMADA "CENTRAL SOLAR MENU" >.....	70
FIGURA 20 < PANTALLA DE LA PLANTA SOLAR GENERAL, REPRESENTA LA ACTIVACIÓN DE LOS SISTEMAS QUE PARTICIPAN EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD>.....	71



FIGURA 21 < COLECTORES SOLARES >.....	72
FIGURA 22 < PANTALLA DEL CONTROL DEL SISTEMA QUE REPRESENTA EL CONTROL DE LOS COLECTORES >.....	73
FIGURA 23 < SISTEMA DE POTENCIA EN SIMULACIÓN >.....	75
FIGURA 24 < PANTALLA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO >.....	76
FIGURA 25 <PANTALLA QUE MUESTRA LAS ALARMAS ANALIZADAS EN EL SISTEMA DE SIMULACIÓN >.....	77
FIGURA 26 < EJEMPLO DE UN GAUGE >.....	84
TABLA 1< COMPARACIÓN DE LAS PLANTAS TERMOSOLARES>.....	31
TABLA 2 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >.....	34
TABLA 2.1 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >.....	35
TABLA 2.2 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >.....	36
TABLA 2.3 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >.....	37
TABLA 2.4 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >.....	38
TABLA 3< COMPARACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL COLECTOR>.....	43
TABLA 4 < CONCENTRACIÓN SOLAR >.....	49
TABLA 5 < MARGEN DE TEMPERATURA DEL FLUIDO HTF>.....	66
TABLA 6< DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE LOS COLECTORES SEGÚN LA ESTACIÓN DEL AÑO>.....	74
ESQUEMA 1 < ESQUEMA GENERAL DE LA SIMULACIÓN EN VISU + >.....	68



1. RESUMEN EN CASTELLANO

Este proyecto tiene por objeto la simulación de una planta termosolar de CCP (Colectores Cilindro Parabólicos) basada en un funcionamiento ideal.

Los sistemas principales que forman parte del funcionamiento de estas plantas son:

- 1- El Campo Solar
- 2- El Almacenamiento Térmico
- 3- Generación de Vapor
- 4- Bloque de potencia (Turbina, Generador eléctrico y Transformador de potencia)
- 5- Sistemas Auxiliares (sistemas que no forman parte del proceso)

En el estudio de los sistemas anteriores, se puede ver la complejidad de cada uno de los parámetros que influyen en ellos. Tales como, el algoritmo solar, la radiación solar, el ángulo de incidencia del sol con respecto a los colectores, el fluido que se elige en este tipo de plantas llamado HTF (Heat Transfer Fluid), los márgenes de temperatura que soporta la planta, la presión en el bloque de potencia y muchos parámetros más.

Una vez estudiados los sistemas y sus parámetros influyentes, se hace un análisis ideal. La herramienta utilizada para realizar la simulación de funcionamiento ideal de la planta termosolar CCP con almacenamiento térmico, al variar las entradas/salidas (I/O) del proceso, ha sido SCADA Visu +.



2. RESUMEN EN INGLÉS

The purpose of this project is to simulate the functioning of a CCP (Cylinder Parabolic Collectors) thermal solar plant, based on an ideal operation.

The main systems which are part of the functioning of this type of solar plants are:

- 1.- Solar field
- 2.-Thermal storage
- 3.- Vapor generating
- 4.- Power unit (turbine, generator and power transformer)
- 5.- Auxiliary system (systems which are no part of the process)

The analysis and study of each of the mentioned systems show the complexity of each parameter that influence on the solar plant performance; such as the solar algorithm, solar radiation, the incident angle of the sun in relation to the solar collectors position, the chosen performance of the thermal fluid known as htf (heat transfer fluid), the temperature relations that the solar plant can stand, pressure on the power unit and other parameters.

Once analyzed the global performance of the solar plant, an ideal analysis is done by varying the I/O values of the process during ideal plant operating conditions using the SCADA Visu+ tool.



3. PALABRAS CLAVE

CET: Central Eléctrica Termosolar

CCP: Colector Cilindro Parabólico

HTF: *Heat Transfer Fluid*

HTF: Fluido caloportador

HTF: Aceite térmico

SCADA: *Supervisory Control And Data Acquisition*

Visu +: Programa para realizar SCADA

TES: Almacenamiento térmico

Energía solar

Energía eléctrica

Radiación solar

Sistema



4. RESUMEN EXTENDIDO

Para simular el funcionamiento de una Central Eléctrica Termosolar (CET), se necesita conocer cada uno de los sistemas que la componen y su participación en el proceso de generación eléctrica.

En primer lugar el campo solar cumple una función esencial. Aquí se produce la absorción de la radiación solar que se tiene en un momento determinado. Ya que cada radiación es diferente según la estación del año, el día, la hora, el ángulo solar calculado por el algoritmo solar, el ángulo de incidencia del sol con respecto al colector, las condiciones meteorológicas y el lugar donde está ubicado cada uno de los colectores que componen el campo solar. Éste está formado por diferentes lazos, los cuales a su vez están formados por colectores. En mi caso me he basado en un lazo de colectores llamado SCA (Solar Collector Assembly), cada lazo compuesto por un número de cuatro SCE (Solar Collector Element).

Los Colectores Cilindros Parabólicos (CCP) están formados por dos componentes: espejos y tubo absorbedor. El primero de ellos es un espejo que capta la energía proveniente del sol y refleja parte de ella al tubo absorbedor, y dicho tubo absorbedor, ubicado en la zona focal, es un tubo donde circula un fluido que se calienta con la radiación solar procedente del espejo.

Una vez estudiado el funcionamiento del campo solar, lo he simplificado. En el caso de la simulación en Visu +, la temperatura del fluido depende de la estación del año y de la hora, siendo estas dos variables decisión del usuario. Una vez introducidas estas "inputs", se visualiza la temperatura de los colectores.

En segundo lugar el Generador de Vapor, que funciona mediante el intercambio de calor entre el agua que se introduce y el HTF que circula en las tuberías internas que lo componen a alta temperatura; pero siempre menores a las temperaturas de degradación del fluido térmico. Así se calienta el agua hasta llegar a producir vapor. Este generador de vapor está puesto en el programa del SCADA como un LED que mientras la planta esté en funcionamiento, y no haya ninguna alarma activa, siempre estará el led encendido (led verde). Las alarmas originadas debido a este sistema son formación de "piedras" y creación de fugas. La formación de "piedras" tiene esta denominación por ser unas gotas de agua que se crean en el vapor de agua perjudicando a los álabes. Para evitar estas gotas de agua, se extrae el vapor de agua para calentarlo de nuevo y así evaporar las gotas. Podrían ser un número de piedras elevado, por ello, hay una alarma que si el vapor no ha pasado por la etapa de extracción, se activa. La alarma de creación de fugas se activa, cuando hay una rotura en alguna de las tuberías, se activa la alarma.



En tercer lugar la turbina, teniendo como finalidad la transformación de energía del vapor en energía mecánica. La turbina interesa que tenga un rendimiento alto, pero a mayor rendimiento significa que la temperatura debería ser mayor. Hay que tener en cuenta que a mayor temperatura, mayor pérdidas. En mi aplicación del SCADA, la turbina estará en funcionamiento siempre que la planta se encuentre en funcionamiento. Si el calor del vapor tiene una temperatura máxima a la de diseño, produciendo una presión superior a la presión límite entonces aparecerá una alarma ya que la turbina podría tener alguna fuga.

El Generador de Electricidad consigue la finalidad de una planta termosolar, transformando la energía mecánica en energía eléctrica. Respecto al estudio ideal, siempre que esté en funcionamiento la planta y no se haya producido una alarma podrá producir electricidad, y por ello aparecerá un LED de encendido, en el SCADA Visu+, que representa que todo está en correcto funcionamiento.

Y por último el añadido de esta planta termosolar de CCP (Colectores Cilindros Parabólicos) con almacenamiento térmico. Este almacenamiento no está incluido en todas las plantas termosolares, pero este sistema añadido opcionalmente es lo que hace que la planta sea la más eficiente dentro de las diferentes tecnologías termosolares. Gracias a este almacenamiento la planta puede operar 24 horas al día siendo de mayor eficiencia en comparación al resto. Es muy importante y de mucho interés este sistema. El fluido que se tiene en este almacenamiento térmico son sales, las cuales tienen un rango de temperatura de trabajo entre los 40°C y los 260°C. Permiten la generación de electricidad incluso cuando la radiación del sol no es suficiente o ninguna ya que hay dos tanques con un intercambiador de calor, tanque de sales frías y tanque de sales calientes. Cuando el campo solar esté activo, entrarán en juego las sales frías calentándose gracias a la energía del fluido térmico calentado por la absorción de la radiación del sol. Y cuando el campo solar no esté activo ya que no hay una radiación suficiente, el tanque de sales calientes entra en juego haciendo la misma función que el campo solar manteniendo la temperatura del fluido térmico. Los dos tanques estarán funcionando durante todo el ciclo ya que las sales no pueden pararse, puesto que se solidifican fácilmente al descender a una temperatura mínima de diseño. El esquema de estas sales aparecen en el programa SCADA Visu +, estando los dos tanques activos siempre que la planta esté en funcionamiento, lo único que dependiendo si el campo solar está recibiendo una radiación suficiente o no, entonces se visualiza el fluido del tanque que entra en juego.

Una vez realizado tanto el estudio de la Central Eléctrica Termosolar (CET), y una parte básica de su simulación, entonces se evalúan los problemas de cada uno de los sistemas y las soluciones que se hacen tanto en la realidad como idealmente.



5. CONTENIDO DE LA MEMORIA

5.1 Introducción

En el estudio y desarrollo de este trabajo se han tomado como referencia los principios básicos de diseño, construcción y funcionamiento de una Planta Termosolar y un análisis de las necesidades sociales, técnicas, económicas y medioambientales que han dado origen a las inversiones en su desarrollo.

La situación actual de generación eléctrica por medios convencionales ha abierto las posibilidades a las energías renovables. Las condiciones de abastecimiento, costos y nuevas regulaciones medioambientales han hecho que el desarrollo de nuevas plantas de generación con combustibles fósiles se detenga; abriendo un abanico de posibilidades para el crecimiento en el desarrollo de los medios de generación eléctrica de las energías renovables (Solar, Eólica, Biomasa, Geotérmica, Mareomotriz e Hidroeléctrica). Por ejemplo, en el caso de las centrales termosolares son capaces de producir electricidad a partir de un recurso inagotable como es el Sol sin emitir emisiones contaminantes siendo sus principales beneficios de este tipo de central frente a las convencionales los que se indican a continuación:

❖ **Beneficios medioambientales:**

- - Energía limpia y respetuosa con el medioambiente que evita la emisión de CO₂, y contribuye así a la lucha contra el cambio climático y el efecto invernadero.
- - El uso de las energías renovables evita el agotamiento de importantes recursos naturales como el petróleo y el gas natural contribuyendo a su preservación para las generaciones futuras.
- - Respeto a la calidad del aire, del suelo y a la biodiversidad. Las centrales CSP (Central Solar Power) generan escasos residuos que poder ser eliminados fácilmente.
- - Reversibilidad. Las instalaciones CSP son plenamente reversibles, pudiendo ser desmontadas y recicladas al final de su vida útil.
- Ausencia de contaminación acústica. Éstas centrales son silenciosas.
- - El Sol es, a escala humana, una fuente inagotable de energía.



- - El uso y promoción de la energía solar conlleva una conciencia social en tecnologías ecológicas y respetuosas con el medio ambiente.

❖ **Beneficios socioeconómicos:**

- - Generación de empleo. Las centrales termosolares, han demostrado y demuestran que, generan un gran número de puestos de trabajo desde el inicio de su construcción hasta su puesta en marcha.
- - Reducción de la dependencia exterior para el abastecimiento energético. La tecnología CSP, evita la importación de combustibles fósiles como el petróleo y el gas natural, procedentes de terceros países contribuyendo a reducir la dependencia energética del exterior y aumentar la autonomía energética.
- - Reducción con alto contenido de I+D+I (Investigación, Desarrollo e Innovación). Cualquier tipo de energía renovable permite a los países que las implementan desarrollar tecnologías propias, mejoras, e innovaciones.

Para el desarrollo de este proyecto, se ha considerado la distribución de los distintos colectores del campo solar por módulos llamados SCA (Solar Collector Assembly) conectados en paralelo a tuberías aisladas térmicamente. Los captadores solares considerados en este particular son los Colectores Cilindro Parabólicos. Éstos tienen la forma de un cilindro parabólico. Se orientan según la posición del sol, los rayos solares se concentran en el tubo receptor situado en la línea focal del cilindro.

El campo solar está formado por varios lazos, cada lazo está formado por 4 SCA, agrupados en dos líneas paralelas con 2 SCA en cada una. Cada uno de los SCA está compuesto de 12 SCE (Solar Collector Element) elementos colectores de la radiación solar de 12 m de longitud cada unidad (Ver FIGURA 1).



FIGURA 1 <LAZO SOLAR DE UNA CENTRAL CCP >

Las Centrales Termosolares se podrían dividir en dos grandes grupos:

1. Concentrador de radiación solar en una línea. Este grupo a su vez consta tanto de Colectores Cilindro Parabólicos como los de espejos de Fresnel (Ver FIGURA 2).
2. Concentrador de radiación solar en un punto. Este grupo consta tanto de torre central como discos parabólicos que son los que utilizan motores Stirling (Ver FIGURA 2).

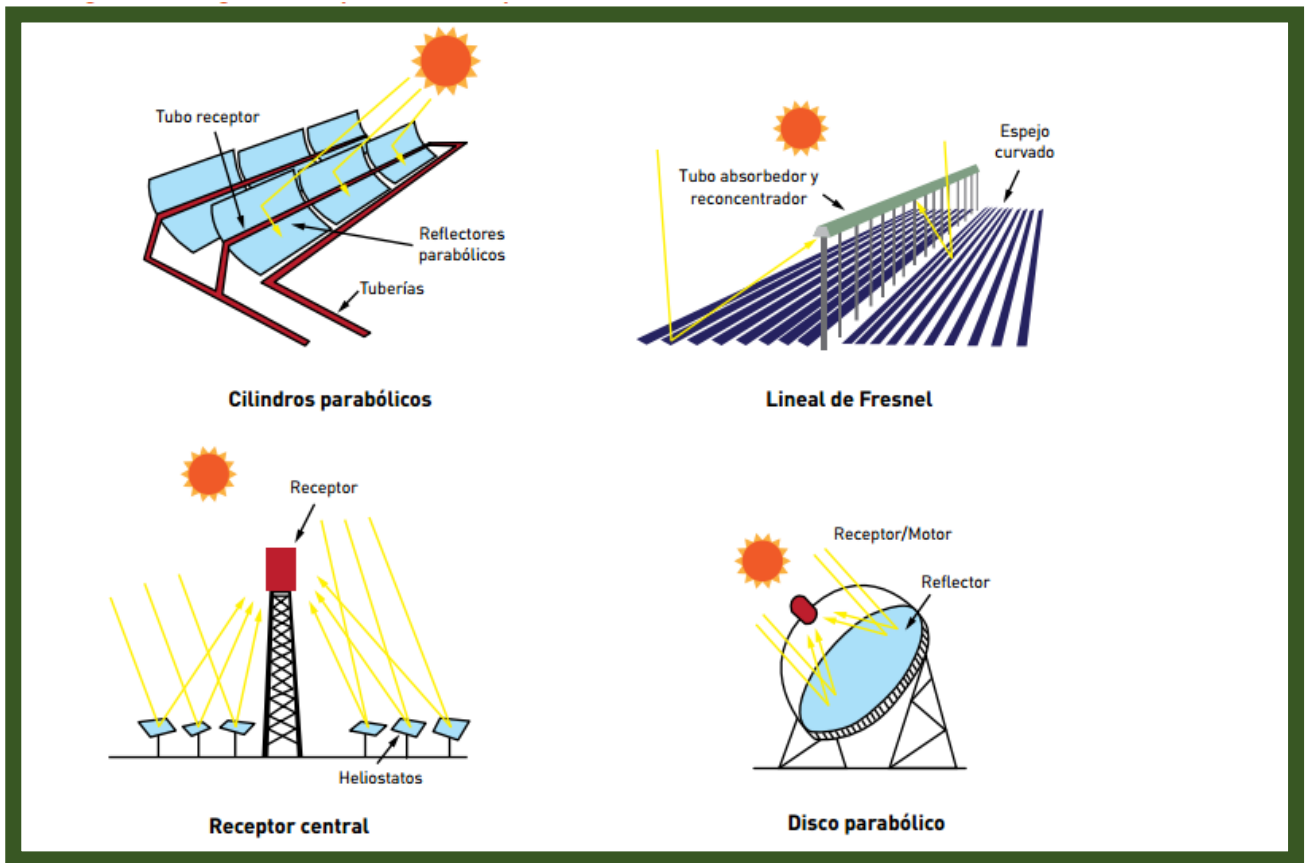


FIGURA 2 <COMPARACIÓN DE LAS PLANTAS TERMOSOLARES EXISTENTES >

La mayor ventaja de las Centrales Eléctrica Termosolares (CETs) es la posibilidad de almacenamiento térmico, permitiendo así la operación continuada tanto de día como de noche, es decir un funcionamiento de 24 horas. De las discrepancias de las tecnologías utilizadas para el desarrollo de las plantas de generación eléctrica utilizando la energía solar, los de mayor aceptación son las plantas termosolares de Colectores Cilindros Parabólicos que se encuentra en etapa comercial y es la tecnología más madura (una mayor experiencia debido a la primera instalación desde los años 80) y común de los CSP (Central Solar Parabolic), aunque se sigue logrando mejoras en su rendimiento.

Son muchas las expectativas y los objetivos que esperamos alcanzar para el 2020. Dando una capacidad de electricidad termosolar aproximadamente de 21.540 MW, una producción eléctrica de 54,6TWh, una inversión acumulada en construcción de centrales de 1.800 millones €, un empleo generado de 200.000 empleos y a su vez evitaremos unos 154.000 millones de toneladas de CO₂. Por ello es importante destacar que la competencia generada entre las CETs, contribuirá sin duda al desarrollo tecnológico que hemos obtenido, estamos teniendo y alcanzaremos en el futuro.



5.2 Descripción de la memoria

5.3 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el estudio y representación en un SCADA, de una planta termosolar basada en Colectores Cilindro Parabólicos (CCP) particularizándola para el comportamiento de un SCA (Solar Collector Assembly) formado por 4 SCE (Solar Collector Element).

Para ello los propósitos fundamentales del presente proyecto son:

❖ **Qué es una planta Termosolar.**

La aplicación de la energía solar ha venido a ser un medio de generar electricidad limpia puesto que el grado de contaminación de las plantas utilizando carbón, petróleo o gas ha perjudicado en gran manera el medio ambiente mundial.

Una planta termosolar es una instalación industrial en la que se calienta un fluido mediante radiación solar, ese fluido térmico fluye a través de un generador de vapor que produce una nueva presión de diseño deseada, mayor a la anterior, que se utiliza para crear el movimiento de una turbina acoplada a un generador eléctrico. Y de manera opcional, hay un almacenamiento térmico que permite almacenar la energía solar y así utilizarla cuando se requiera.

La finalidad de las CET se basa en el aprovechamiento de radiación solar para conseguir electricidad. Al ser una energía renovable que tiene beneficios, está siendo uno de los mayores factores de desarrollo y avance.

❖ **Estudio de las plantas termosolares existentes.**

Se tienen cuatro plantas destacables y diferenciables, las cuales se dividen en métodos distinguibles para captar la energía solar. Uno de los métodos es captar la energía solar de forma lineal, es decir un tubo largo que está captando la energía solar mientras que el otro de los métodos trata de captar la energía solar en un punto, es decir un punto se encarga de poder recoger parte de la energía captada proveniente del sol.

En el método de captación lineal, aparecen espejos Fresnel y Colectores Cilindros Parabólicos (CCP). La más indicada para poder captar energía es la planta basada en CCP al recoger más energía y alcanzar temperaturas



mayores, consiguiendo una mayor eficiencia en convertir la energía solar en eléctrica además de resultar más sencilla al incorporar capacidad de almacenamiento en su diseño.

Respecto al método de captación en un punto, ambas plantas disco parabólico y torre central, se tienen temperaturas más altas al poder concentrar toda la energía en un solo punto pero se parte de menor experiencia a nivel mundial.

De las cuatro tecnologías expuestas, la de mejores rendimientos y la de mayores ventajas en su operación y mantenimiento son, las CCP. El desarrollo de este proyecto está basado en esta tecnología.

❖ **Estudio del software SCADA Visu +.**

Los sistemas SCADA sirven para automatizar y controlar procesos industriales.

La elección de esta herramienta Visu + se debe a una variedad de motivos, su manejo amigable, la posibilidad de introducir datos, su oportunidad de representación gráfica en pantalla y por último el SCADA, que realiza una pequeña simulación ideal en varias pantallas, está relacionado con las funciones del Sistema del Control Distribuido (DCS- Distributed Control System) que participa en una planta termosolar real de los diferentes sistemas que operan en ella.

❖ **Simulación de una planta Termosolar de Colectores Cilindro Parabólicos (CCP) con almacenamiento térmico.**

Una vez realizado el estudio de la planta y el análisis de las variables del proceso se realiza una representación en varias pantallas de la planta termosolar elegida (basada en CCP) con el objeto de visualizar y evaluar sus aspectos básicos.

Cuando se hace un estudio es conveniente hacer diferentes gráficos, explicar diferentes imágenes, realizar activación y desactivación de I/O (Inputs/Outputs) y exponerlo de manera animada utilizando pantallas, leds, gráficos e imágenes para así poder observar el funcionamiento de lo estudiado y expuesto con el fin de un diseño conceptual y una estructura operacional fundamental de este sistema para el presente proyecto.



5.4 Descripción general de las plantas termosolares CCP

HISTORIA

Las primeras muestras de la utilización de concentradores del calor en espejos parabólicos fue en el siglo III a.c. Entonces, griegos y romanos utilizaban un tipo de recipientes de forma parabólica con el interior reflejante llamados SKAPHIA que concentraban el calor absorbido de los rayos del sol sobre un punto de las antorchas que prendían para celebraciones con fines religiosos.

En 1767 Horace de Saussure inventó el primer colector solar con su CAJA CALIENTE, era una caja negra con todas las caras impregnadas con un material aislante y solamente una cara era acristalada por donde se absorbía la radiación solar. Llegó a alcanzar temperaturas de 109 grados Centígrados.

A mediados de los 1800s, Auguste Mouchot (pionero en la conversión de energía solar en vapor a baja presión para hacer funcionar máquinas de vapor) después de varios años investigando sobre las aplicaciones de la energía solar con fines industriales, barata e infinita construyó el primer colector cilindro-parabólico. Su invento consistía en un depósito negro recubierto de vidrio, que era expuesto al sol. Un espejo parabólico reflejaba la radiación solar hacia el lado del cilindro no expuesto al sol, alcanzando así altas temperaturas dentro del recipiente negro. Dio lugar al nacimiento de la primera cocina solar portátil.

Su primer gran invento fue la utilización de receptores solares parabólicos, recubiertos por espejos que concentraban la radiación solar en un solo punto para activar un motor de vapor. Consistía en un reflector acanalado de sección parabólica, concentraba los rayos del sol sobre un tubo de cobre, generando el vapor que a su vez era recogido en un depósito metálico situado en la parte superior. Fue la caldera de la primera máquina de vapor accionada por el sol.

Sus estudios en la aplicación de la energía solar dieron lugar al nacimiento del primer frigorífico.

Abel Pife, alumno de Mouchot, basándose en una técnica de captación solar similar a la de su maestro (en este caso utilizando un colector parabólico de estaño) inventó la primera imprenta accionada con energía solar. Imprimía 500 copias por hora. Dio lugar al nacimiento del periódico Le Chaleur Solaire, expresamente para la utilización de este invento.

Carles Tellier, ya a finales del 1800 desarrolló los colectores solares de baja temperatura para el impulso de máquinas.

Fue considerado el padre de la refrigeración, fue el primero en acondicionar un barco frigorífico, para el transporte de carga refrigerada.



John Ericsson, patenta el motor de Sol (Stirling Dish) inventa los primeros colectores cilindro-parabólicos que concentraban la luz solar que reflejada en calderas tubulares pintadas de negro eran capaces de producir vapor.

El avance en las técnicas de extracción y utilización más eficiente del carbón para producir vapor, relegó durante muchos años el desarrollo de nuevas técnicas de la utilización de la energía solar.

Fue hasta principios de 1900 que el americano Frank Shuman fundó la primera Empresa dedicada al diseño y construcción de plantas solares de utilización industrial.

En 1912 se construyó la primera planta de canal parabólico. Fue contratada la empresa Sun Power Co. de Frank Shuman para construir esta primera gran planta de energía termosolar en Egipto, utilizando espejos parabólicos, dispuestos en estructuras semicirculares que permitían el seguimiento de la trayectoria del sol. Esta planta generaba una potencia de 55 caballos. El vapor producido accionaba máquinas de baja presión con una potencia equivalente a 41 KW que bombeaban 22.000 litros/minuto del agua del Nilo a los campos de labranza.

En 1915, durante la Primera Guerra Mundial fue destruida y nunca más reconstruida.

Hasta 1976, año en el cual Edenburn reportó el análisis teórico del rendimiento de un CCP considerando las posibles orientaciones del colector y lo comparó con resultados experimentales.

En 1981, la IEA (Agencia Internacional de Energía) y nueve países más (España, Alemania, Austria, Bélgica, Grecia, Italia, Suecia, Suiza y USA) financiaron el estudio, diseño y construcción de dos grandes proyectos en Almería, SSPS (Small Solar Power System), el objeto de este proyecto era demostrar la viabilidad técnica de la energía solar como fuente de generación de Energía eléctrica. Se construyó con la utilización de dos sistemas de colectores de la radiación solar. Uno con un sistema de torre central y otro de colectores cilindros parabólicos de 500 KW de potencia cada uno.



MISIÓN DE ESTA ENERGÍA

- ❖ La demanda de Energía Eléctrica
- ❖ Comportamiento y reservas de combustibles fósiles
- ❖ Impacto medioambiental mundial

Estos tres factores han llevado a la necesidad mundial por el desarrollo de las técnicas de explotación de recursos naturales inagotables en la generación de energía eléctrica.

Este conjunto de técnicas diferentes de generación, utilizando los recursos naturales forman el grupo de Energías Renovables, de gran popularidad hoy en el panorama energético mundial.

En este estudio nos limitamos a la Energía Termosolar.

Se han considerado varios de los estudios publicados y realizados con subvenciones de empresas generadoras de electricidad, subvenciones regionales, nacionales e inversiones internacionales con el diseño y construcción de plantas piloto experimentales, implementando diferentes tecnologías desarrolladas por empresas especializadas en varios de los sistemas que forman parte de una planta solar

De gran importancia en la proliferación de estudios en el ámbito de la energía solar ha sido la situación actual mundial de protección del medioambiente, de un impacto social, económico y político sin precedentes. Grandes campañas políticas llevan dentro de sus ofrecimientos, la protección del medio ambiente de los contaminantes generados en parte por la generación convencional de energía eléctrica. Dentro de estos ofrecimientos está la aprobación de subvenciones económicas para el desarrollo de las energías renovables a nivel industrial y de reformas en viviendas y/o pequeñas industrias de autónomos.

Según la tecnología utilizada para la absorción de la radiación solar existen varios tipos de centrales solares térmicas.

- 1.- La de platos Stirling (Discos parabólicos)
- 2.- Tecnología de torre
- 3.- Tecnología de Colectores Cilindros Parabólicos
- 4.- Tecnología Fresnel
- 5.- Tecnología de energía solar combinado con un ciclo de utilización de combustibles Fósiles llamada Integrated Solar Combined Cycle (ISCCS) o Central híbrida de ciclo combinado solar.



5.4.1 **TECNOLOGÍA STIRLING**



FIGURA 3<DISCOS PARABÓLICOS CON MOTORES STIRLING >

La tecnología de discos parabólicos está formada por un concentrador solar de alta reflectividad y un receptor solar de cavidad. El primero de ellos, concentrador solar, se refiere a un espejo parabólico de gran diámetro y el receptor se refiere al motor de combustión externa tipo Stirling localizado en el área focal de dicho disco parabólico (Ver FIGURA 3).

Un motor de combustión externa, emplea el ciclo termodinámico. El motor utiliza una fuente de calor (siendo la fuente lo que refleja el concentrador solar) para calentar aire en su cilindro. Se le considera motor de combustión externa y proceso adiabático, porque no requiere quemar combustible en su interior y al operar, no transfiere calor al entorno. Su mecanismo consiste en dos pistones, uno para disipar calor y desplazar aire caliente a la sección fría y otro es viceversa. Por tanto se concluye que su movimiento es ocasionado por las diferencias de presión de aire, entre la parte más caliente y la fría.

Tiene las siguientes ventajas e inconvenientes:



➤ Ventajas:

- - Es posible usar una gran variedad de fuentes energéticas: energía solar térmica, combustibles, biomasa, energía geotérmica, etc.
- - Altas eficiencias (hasta el 30%), ya que el concentrador se encuentra próximo al absorbedor con temperaturas entre 500°C y 650°C.
- - Debido a un proceso de combustión continua, se reduce la mayor parte de emisión de NOx, hidrocarburos...
- - El fluido en estas centrales, tiene una única fase manteniendo las presiones cercanas a la presión de diseño. Por tanto se reducen los riesgos de explosión.

En cambio, cuando aparecen cambios de estado de un fluido se encuentran válvulas entre cada cambio, por lo que un fallo de una válvula puede provocar una explosión peligrosa.

- - Motor silencioso, sin necesidad de lubricación.

➤ Inconvenientes:

- - Elevado coste. Se requieren intercambiadores de calor de entrada y salida.
- - Los pequeños diferenciales térmicos requieren grandes motores.
- - No arranca instantáneamente un motor Stirling, primero se tiene que calentar.
- - Fluido a emplear. El hidrógeno cumple los requisitos al tener baja viscosidad, alto calor específico y conductividad térmica pero es inflamable. Otra opción es el aire comprimido, tiene presencia de oxígeno por tanto tiene riesgo de explosión. Generalmente se usa el helio, con propiedades similares de hidrógeno y es más seguro al ser inerte.
- - Complicada estructura de soporte, y un complejo sistema de seguimiento de dos ejes. Por tanto un mayor requerimiento de mantenimiento.



5.4.2 TECNOLOGÍA DE TORRE

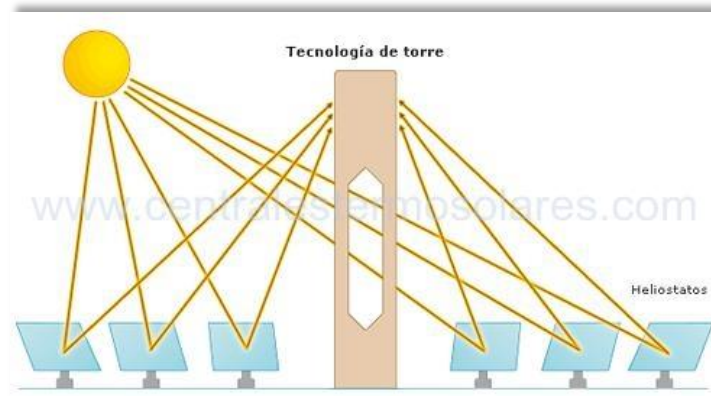


FIGURA 4 <TECNOLOGÍA DE TORRE CENTRAL>

Las centrales de torre central se basan en la utilización de un receptor único para recibir luz solar concentrada, una torre ubicada en el centro de la planta, y disponen de un conjunto de espejos direccionales de grandes dimensiones que concentran la radiación solar en dicha torre que funciona como receptor.

El funcionamiento se basa en reflejar la radiación solar, captada por los espejos, en un receptor situado en la parte superior de la torre, por el que circulan sales fundidas. Estas sales se impulsan desde un tanque frío hasta el receptor, y una vez se calientan llegando a una temperatura crítica, bajan al intercambiador de calor para generar vapor de agua. Este vapor es expandido hacia la turbina para generar electricidad.

Por tanto el sistema basado en torre central consta de estos elementos:

- Campo de heliostatos, seguidores solares en dos ejes con una superficie de reflexión variable. La potencia del sistema depende del número de éstos, de la altura de la torre y el tamaño de los receptores.
- Torre, el receptor solar es el más importante dentro de los elementos que la forman.
- Receptor Solar, los más conocidos son los de vapor saturado. Depende de ello la eficiencia del sistema. En la actualidad se experimenta con un Receptor Central con un gran sistema de almacenamiento utilizando sales fundidas como fluido caloportador y como sistema de almacenamiento.



Tiene las siguientes ventajas e inconvenientes:

➤ **Ventajas:**

- El diseño de las torres centrales posibilita alcanzar a temperaturas más altas.
- No es necesario un suelo plano, por tanto se utiliza cualquier tipo de terreno.
- El mismo fluido de transferencia de calor en el receptor es el usado para el almacenamiento.
- Las tuberías drenan por gravedad cuando la planta no está en operación, sin necesidad de equipos adicionales.

➤ **Inconvenientes:**

- Cada uno de los espejos tiene un control de eje propio.
- La instalación de esta tecnología tiene un alto coste inicial.
- La poca experiencia del fluido utilizado, sales fundidas.

5.4.3 TECNOLOGÍA CILINDRO-PARABÓLICO

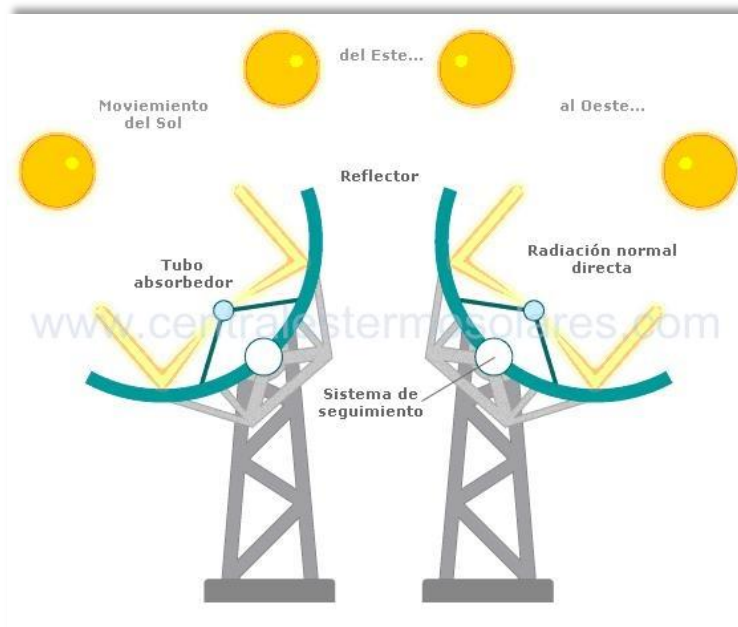


FIGURA 5 < CONCENTRADOR (REFLECTOR), TUBO ABSORBEDOR Y SISTEMA DE SEGUIMIENTO >



Estas centrales tienen mayor grado de madurez técnica y una mayor viabilidad económica. Esta central está formada por espejos parabólicos que tienen unas dimensiones de $16 \times 8 \text{ m}^2$, que se agrupan en módulos de 12 espejos cada uno con un control de seguimiento. Están ubicados a lo largo de un eje Norte-Sur estando paralelamente al eje Este-Oeste.

En la línea focal se encuentra el tubo absorbente, donde se concentra la máxima radiación procedente de los concentradores. Los espejos concentradores captan la energía proveniente del sol. A lo largo del tubo absorbente circula aceite sintético. El aceite caliente, cuando alcanza cierta temperatura, se envía a un intercambiador de calor donde se genera el vapor sobrecalentado requerido para accionar una turbina, y después pasa por un alternador para generar electricidad.

5.4.4 **TECNOLOGÍA FRESNEL**



FIGURA 6 < TECNOLOGÍA FRESNEL >

Está basada en el concepto básico de la tecnología de colectores cilindro-parabólicos, la energía se concentra de forma lineal, y también consta de receptor y tubo absorbente. La diferencia es que los concentradores son notablemente planos en vez de cilindros parabólicos y tanto el concentrador como el tubo absorbente, en este caso, están fijos.



➤ Ventajas:

- - Al ser plano el cuerpo primario de espejos, su costo es menor.
- - Al generar directamente el vapor, hay un ahorro considerable en el costo asociado de equipos.
- - Mayor rendimiento al no haber intercambiadores intermedios.
- - Aprovechamiento del terreno, hasta un 70%.

➤ Inconvenientes:

- - Se tienen temperaturas menores y por tanto la eficiencia es menor.
- - Pérdida de generación eléctrica en algunas horas. Aparecen sombras en las primeras y últimas horas del día debido a la proximidad entre las filas de la planta.

5.4.5 COMPARACIÓN DE LAS PLANTAS TERMOSOLARES

Cada tecnología tiene sus propias características, ventajas y desventajas, algunas de las cuales se muestran en la TABLA 1.

	Colectores Cilindros Parabólicos	Receptor Central	Disco Parabólico	Concentrador lineal Fresnel
Tipo de foco	Foco lineal ¹	Foco puntual ²	Foco puntual ²	Foco lineal ¹
Tipo de receptor	Receptor móvil ³	Receptor fijo ⁴	Receptor móvil ³	Receptor fijo ⁴
Rango de capacidad	10-200 MW	10-200MW	0,1-1 MW	10-200 MW
Máxima capacidad instalada	80 MW	20 MW	1,5 MW	5 MW
Eficiencia (%)	10-25 %	10-25 %	16-29 %	9-17 %
Temperatura (°C)	350-400°C	250-565°C	750-800°C	270-500°C



Factor concentración (Kw/m²)	50-90 Kw/m ²	600-1000 Kw/m ²	Aprox. 3000 Kw/m ²	25-50 Kw/m ²
Requerimiento de espacio (m²/Kw)	15-30 m ² /Kw	20-35 m ² /Kw	20-35 m ² /Kw	25-50 m ² /Kw
Coste de inversión (€/Kw)	3000-6500 €/Kw	4000-6000 €/Kw	4000-10000 €/Kw	2500-5500 €/Kw
Ventajas	<ul style="list-style-type: none">1- La más probada comercialmente2- Alta fiabilidad del sistema3- Poca necesidad de materiales4- Capacidad de almacenamiento (operación 24h)	<ul style="list-style-type: none">1-Alta temperatura2- Alta eficiencia3-Posibilidad de almacenamiento (operación de 24h)	<ul style="list-style-type: none">1-Potencial de inversión2-Alta eficiencia3- Se reduce los riesgos de explosión	<ul style="list-style-type: none">1.Bajo coste de componentes2.Fiabilidad demostrada3.Posibilidad de almacenamiento (operación 24h)4- Ahorro de intercambiadores
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none">1-Baja temperatura que provoca poca eficiencia2-Bajo potencial de eficiencia	<ul style="list-style-type: none">1-Poco probado comercialmente2-Coste de equipos y mantenimiento altos3-Poca experiencia en el fluido	<ul style="list-style-type: none">1-Muy poco probado comercialmente2-Alta complejidad3- Sin capacidad de almacenamiento4-Requerimiento de mantenimiento5-Fluido a emplear6-Alto coste	<ul style="list-style-type: none">1-Baja eficiencia2-Baja temperatura3- Pérdida de generación eléctrica (aparición de sombras)

TABLA 1 < COMPARACIÓN DE LAS PLANTAS TERMOSOLARES >



- 1 Se concentra la radiación a lo largo de una línea
- 2 Se concentra la radiación en un punto
- 3 Los receptores son sistemas independientes del enfoque de la planta
- 4 Los receptores se mueven junto con el sistema de enfoque, concentrando mayor energía en el foco

ESTUDIOS DE VIABILIDAD DE UNA PLANTA TERMOSOLAR

El objetivo principal en la construcción de una planta de generación de electricidad utilizando la tecnología solar es la aportación (eficiente, con el máximo rendimiento posible) de potencia a una comunidad lo más cercana posible o para inyectar este incremento de potencia a la red de distribución eléctrica nacional.

Por tanto, es de gran importancia el punto geográfico elegido.

En los estudios de viabilidad para justificar la inversión de los costos de construcción se consideran:

- ❖ Área geográfica de situación de la planta, días de máxima aportación de energía solar, condiciones de los terrenos, proximidad a una fuente natural de agua, proximidad al punto de utilización de la potencia generada.
- ❖ Retorno económico de la inversión.
- ❖ Tecnología a utilizar.
- ❖ Aportación de subvenciones y origen de éstas.
- ❖ Partnership, posibilidad de asociación con la ingeniería de diseño y/o de construcción, con los poseedores de las patentes de la tecnología utilizada, con las compañías de suministro de energía en la región elegida, titulares catastrales de los terrenos elegidos, etc.

En general, la diferencia principal entre la elección de una tecnología u otra en la construcción de una planta solar es el sistema de captación de la energía solar. El resto de los sistemas que forman la planta solar son unidades que no conllevan restricciones de "ownership". Esto condiciona la decisión a las ventajas económicas globales que puedan obtenerse reflejadas en los estudios de viabilidad.



5.4.6 PLANTAS TERMOSOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA

MISIÓN DE ESTA ENERGÍA COMPONENTES DE UNA PLANTA TERMOSOLAR IDEAL

La idealidad de una planta solar en operación es la generación de una potencia eléctrica de salida lo más próxima a su valor de diseño, independientemente de la tecnología solar utilizada.

Se sigue reflejando predilección por las plantas basadas en CCP, porque la relación Rendimiento-Potencia (15%-50MW) analizada en cada planta, interesa a diferencia de las otras tecnologías, y por su gran experiencia en el mercado de energías renovables de las plantas termosolares construidas y en operación, (Véase TABLA 2, TABLA 2.1, TABLA 2.2, TABLA 2.3 y TABLA 2.4 de Plantas Termosolares construidas en España).

La idealidad de una Planta Solar está en el comportamiento de sus Sistemas (explicados en detalle posteriormente, apartado 5.6):

- ❖ Tecnología de absorción de la energía solar.
- ❖ Comportamiento físico-químico del fluido caloportador (definido en el punto 5.1.1.2 D) durante el proceso de absorción de calor.
- ❖ Unidad de almacenamiento de calor para su utilización en horas de no radiación o mínima radiación.
- ❖ Tanque de expansión.
- ❖ Generador de Vapor
- ❖ Unidad de Potencia, formado por:
 - - Turbina
 - - Condensador
 - - Desgasificador
 - - Generador
 - - Transformador de Potencia



Planta Termosolar	Tecnología	Potencia Nominal (MW)	Emplazamiento	Compañía
PS 10	Torre y heliostatos con vapor	11	Sanlúcar La Mayor (Sevilla)	Abengoa
ANDASOL 1	CCP	50	Aldeire (Granada)	ACS-Cobra
PS 20	Torre y Heliostatos con vapor	20	Sevilla	Abengoa
PUERTOLLANO IBERSOL	CCP	50	Puertollano (Ciudad Real)	Iberdrola
PUERTO ERRADO I	Fresnel	1,4	Calasparra (Murcia)	Novatec Biosol
LA RISCA	CCP	50	Alvarado (Badajoz)	Acciona
ANDASOL 2	CCP	50	Aldeire (Granada)	ACS-Cobra
EXTRESOL 1	CCP	50	Torre de San Miguel Sesmero (Badajoz)	ACS-Cobra
SOLNOVA 1	CCP	50	Sanlúcar La Mayor (Sevilla)	Abengoa
SOLNOVA 3	CCP	50	Sanlúcar La Mayor (Sevilla)	Abengoa
SOLNOVA 4	CCP	50	Sanlúcar La Mayor (Sevilla)	Abengoa

TABLA 2 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >



Planta Termosolar	Tecnología	Potencia Nominal (MW)	Emplazamiento	Compañía
LA FLORIDA	CCP	50	Alvarado (Badajoz)	SAMCA
PST MAJADAS	CCP	50	Majadas (Cáceres)	Acciona
PALMA DEL RÍO 1	CCP	50	Palma del Río (Córdoba)	Acciona
LA DEHESA	CCP	50	La Garrovilla (Badajoz)	SAMCA
ANDASOL 3	CCP	50	Aldeire (Granada)	ACS-Cobra
PUERTO ERRADO 2	Fresnel	30	Calasparra (Murcia)	Novatec Biosol
MANCHASOL 1	CCP	50	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)	ACS-Cobra
EXTRESOL 2	CCP	50	Torre de San Miguel Sesmero (Badajoz)	ACS-Cobra
PALMA DEL RÍO II	CCP	50	Palma del Río (Córdoba)	Acciona
CASABLANCA	CCP	50	Telarubías (Cáceres)	COBRA Sistemas y Redes (ACS)

TABLA 2.1 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >



Planta Termosolar	Tecnología	Potencia Nominal (MW)	Emplazamiento
GEMASOLAR	Torre y Heliostados con sales fundidas	17	Fuentes de Andalucía
HELIOENERGY	CCP	50	Ecija (Sevilla)
HELIOENERGY 2	CCP	50	Ecija (Sevilla)
LEBRIJA 1	CCP	50	Lebrija (Sevilla)
TERMOSOL-50	CCP	50	San José del Valle (Cádiz)
ARCOSOL-50	CCP	50	San José del Valle (Cádiz)
CASAS DE LOS PINOS	Discos Parabólicos	1	Villarrobledo (Albacete)
ARENALES	CCP	50	Morón de la Frontera (Sevilla)
PST BORGES	CCP	22	Algues Blanques (Lérida)
PST ESPEJO	CCP	50	Espejo (Córdoba)
PST LA AFRICANA	CCP	50	Fuente Palmera (Córdoba)
PST DE CONSOL ORELLANA	CCP	50	Orellana (Badajoz)
HELIOS 1	CCP	50	Puente Lápice (Ciudad Real)

TABLA 2.2 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >



Planta Termosolar	Tecnología	Potencia Nominal (MW)	Emplazamiento
HELIOS 2	CCP	50	Puente Lápice (Ciudad Real)
ASTE 1-A	CCP	50	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)
SOLACOR 1	CCP	50	El Carpio (Córdoba)
SOLACOR 2	CCP	50	El Carpio (Córdoba)
PST MORON	CCP	50	Morón de la Frontera (Sevilla)
MANCHASOL 2	CCP	50	Alcázar de San Juan (Ciudad Real)
OLIVENZA 1	CCP	17	Olivenza (Badajoz)
EXTRESOL 3	CCP	50	Torre de San Miguel Sesmero (Badajoz)
AXTESOL 2	CCP	50	Badajoz
SOLABEN 1	CCP	50	Logrosan (Cáceres)
SOLABEN 2	CCP	50	Logrosan (Cáceres)
SOLABEN 3	CCP	50	Logrosan (Cáceres)
SOLABEN 6	CCP	50	Logrosan (Cáceres)

TABLA 2.3 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >



Planta Termosolar	Tecnología	Potencia Nominal (MW)	Emplazamiento
TERMOSOL 1	CCP	50	Navalvillar de Pela (Badajoz)
TERMOSOL 2	CCP	50	Navalvillar de la Pela (Badajoz)
EXTREMASOL	CCP	50	Villanueva de la Serena (Badajoz)
CST CÁCERES	CCP	50	Galisteo (Cáceres)
CST ENESTAR VILLENA	CCP	50	Villena (Alicante)
P.T.8 MW PUERTOLLANO	Discos Parabólicos	8	Puertollano (Ciudad Real)
P.T.10 MW PUERTOLLANO	Discos Parabólicos	8	Puertollano (Ciudad Real)
P.T.10 MW PUERTOLLANO	Discos Parabólicos	8	Puertollano (Ciudad Real)
P.T.10 MW PUERTOLLANO	Discos Parabólicos	8	Puertollano (Ciudad Real)
P.T.10 MW PUERTOLLANO	Discos Parabólicos	8	Puertollano (Ciudad Real)
P.T.10 MW PUERTOLLANO	Discos Parabólicos	8	Puertollano (Ciudad Real)

TABLA 2.4 < PLANTAS SOLARES CONSTRUIDAS EN ESPAÑA >

Viendo las tablas anteriores (TABLA 2, TABLA 2.1, TABLA 2.2, TABLA 2.3 y TABLA 2.4) se concluye que la parte Sur de España, por su mayor radiación, es el área de mayor demanda para la construcción y asentamiento de plantas de generación eléctrica por su aprovechamiento de la energía solar.

Las empresas más competentes en este sector de actividades, son Abengoa y ACS-Cobra, que son empresas que diseñan y construyen centrales energéticas.



5.5 Descripción de las plantas termosolares basadas en la simulación de este proyecto

En el estudio y desarrollo de este trabajo se han tomado como referencia los principios básicos de diseño, construcción y funcionamiento de una planta Termosolar.

Se tiene en cuenta, que una planta termosolar es una instalación industrial necesaria para generar electricidad por medio del calentamiento de un fluido. Para poder calentar el fluido, se necesita la radiación solar.

La simulación de este proyecto utiliza, para su elaboración, el estudio de proyectos de plantas termosolares. Los colectores están conectados en serie a través de las tuberías por donde circula el fluido HTF (Heat Transfer Fluid). Ver FIGURA 7.



FIGURA 7 < CILINDROS CONECTADOS EN SERIE EN UNA PLANTA TERMOSOLAR >

La planta se compone principalmente de una distribución de los distintos colectores del campo solar por módulos llamados SCE (Solar Collector Element) concretamente de cuatro. Los captadores solares son los Colectores Cilindro Parabólicos, que tienen la forma de un cilindro parabólico. Al ser tubos ideales, no tienen ninguna pérdida y la temperatura que reciben de la radiación solar es tal cual la temperatura que tiene el aceite en su interior, ya que su objetivo es captar la energía solar transmitiéndola al fluido térmico que hay en el interior de ellos.



En nuestra hipótesis se parte que los cilindros se encuentran de forma paralela al eje Norte-Sur, para así situarse de forma perpendicular al eje Este-Oeste (FIGURA 8). La orientación, por el contrario, podría ser Este-Oeste, con un seguimiento solar de Norte a Sur, pero esta orientación recoge mucha energía en verano y muy poca en invierno. Mientras que el seguimiento Este-Oeste, como nuestra hipótesis, tiene un valor más constante a lo largo del año.

La elección anterior, nos da un valor medio de la temperatura sin demasiada variación entre las diferentes estaciones del año. Por tanto según que estación del año estemos en la simulación, no se apreciará notablemente la diferencia de temperatura del fluido sea verano, invierno, otoño o primavera.

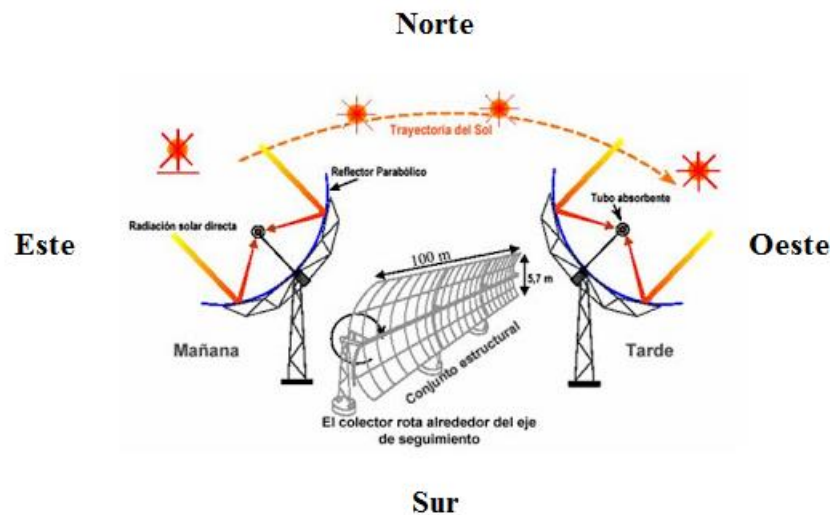


FIGURA 8 < SEGUIMIENTO SOLAR DE LOS COLECTORES ESTE-OESTE >

Una vez explicada la diferencia de temperatura en las estaciones del año. También se tiene que tener en cuenta la variación de temperatura en el interior de estos cilindros. Al estar conectados en serie, funciona como un gradiente térmico donde la temperatura es inferior en el extremo de empiece (primer cilindro simulando éste a un colector) y su temperatura va aumentando a medida que la radiación solar aumenta, llegando a una temperatura superior en el último extremo del SCA (cuarto cilindro simulando éste el cuarto colector).

A su vez el funcionamiento del campo solar depende de varios factores estudiados anteriormente (Véase apartado 4, página 14). Pero en este caso depende de lo fundamental, es decir si se está en horario diurno, u horario nocturno o si hay día nublado, lluvioso u otra incidencia meteorológica. Se podrían dividir los casos en dos grupos: horario diurno (radiación suficiente para que el campo solar esté en funcionamiento) y horario nocturno/día nublado/lluvioso (radiación insuficiente para que el campo solar esté en funcionamiento).



Cuando no hay calor suficiente proveniente del sol (nocturno, lluvioso, nuboso) entonces la aportación del calor del campo solar es sustituida por la aportación del calor procedente del almacenamiento térmico (las sales). Estas sales aparecen en dos tanques diferentes con distintas temperaturas, unas se encuentran a 40°C y otras se encuentran a 260°C.

El fin de este proyecto, además de exponer el funcionamiento de una planta Termosolar basada en unos principios básicos, es ofrecer la mayor eficiencia a la planta. Por ello se realiza una simulación con almacenamiento (utilización de sales), que nos permite operar las 24 horas al día, dando como resultado un mejor rendimiento.

Para describir esta planta aparecen sistemas contribuyentes como el generador de vapor, la bomba, la turbina, y el generador, pues para poder representar la generación de electricidad, que es su principal objetivo, es necesario visualizar en pantallas en Visu+ qué sistemas son necesarios para la transformación de la energía solar a energía eléctrica.

5.6 *Funcionamiento de los diferentes sistemas de las plantas termosolares de Colectores Cilindros Parabólicos*

El sol como ya se ha dicho anteriormente, es una fuente inagotable que no emite gases contaminantes a la atmósfera.

Por ese motivo la energía solar está tomando relevancia y no sólo se requiere para calentar agua a temperaturas menores de 80°C, sino además se están tomando en consideración aplicaciones industriales.

5.6.1 El campo solar

Para la obtención de elevadas temperaturas es necesario recurrir a colectores especiales, ya que con los colectores solares planos la temperatura es mucho más inferior. Estos colectores son los de concentración, cuya técnica consiste en aumentar la radiación por unidad de superficie. Ésto se puede lograr disminuyendo el área por donde ocurren las pérdidas de calor, e interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación, es decir el sol y la superficie absorbente, que debe ser pequeña comparada con la del dispositivo óptico.

De esta manera en el absorbedor, donde se refleja la radiación captada de los colectores, puede tener densidades de energía que van desde 1.5 hasta varios miles de veces la radiación solar que llega al sistema óptico. Esta radiación que llega al sistema óptico permite tener una temperatura en el fluido entre 150°C y 400°C.



5.6.1.1 *Elementos fundamentales de un Colector Cilíndrico Parabólico Solar (CCP)*

Para el diseño de un concentrador cilíndrico parabólico se tienen 5 elementos fundamentales en el concentrador solar:

El Reflector, el absorbedor, la estructura del concentrador, el sistema de seguimiento solar y el fluido caloportador.

A). Reflector o CPC (*Compound Parabolic Concentrator*)

El reflector (Ver FIGURA 7 ó Ver FIGURA 14) consiste en un espejo con una forma geométrica de una parábola cuya finalidad es reflejar la radiación solar que incide sobre él y la redirige sobre el tubo absorbedor definido posteriormente que está colocado en la línea focal del espejo.

El diseño del reflector de los concentradores solares cilíndrico parabólico, se puede realizar desde los siguientes puntos de vista en orden prioritario:

- Aspecto económico, donde se toma en cuenta el costo de producción en base a los materiales que se pueden ver en el mercado.
- El análisis de eficiencia seleccionando el tamaño y materiales según su eficiencia.
- Por último se calculará la energía aportada en función de los ángulos.

Para conseguir una alta reflexión, los materiales deben presentar alta reflectancia y a su vez alta durabilidad con la finalidad de mantener limpia y por largo tiempo la estructura evitando el deterioro por el polvo, la lluvia y el medio ambiente, donde generalmente existen componentes oxidantes y corrosivos. Se hace una comparación de los tres materiales más utilizados la chapa metálica, el vidrio y el plástico, diríjese a la TABLA 3.



Chapa metálico (aluminio pulido de alta reflectividad)	Plástico (plancha plana obtenida por extrusión)	Vidrio
Bajo coste	Bajo coste	Medio coste
Durabilidad baja (deterioro de superficie)	Añadido de material para poder dar forma parabólica	Estabilidad
Baja reflectividad	Baja durabilidad	Rigidez
Alteraciones ópticas (debido a las diferencias de temperatura)	Erosión directa a la superficie	Alta reflectividad
NO ES RECOMENDABLE para plantas industriales de larga duración		Añadido de dos materiales: cobre y epoxi

TABLA 3< COMPARACIÓN DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL COLECTOR>

El de mayor durabilidad es el vidrio, que se asemeja a un espejo convencional. Necesita un recubrimiento de plata para dar alta durabilidad, alta absorbidad y baja emisividad. Para hacer la curvatura, existen dos tipos de espesor según el recubrimiento de plata :

- Cuando el espesor es menor a 3mm. Se trabaja en frío, al no ser rígido y tener una flexibilidad suficiente como fijar la estructura directamente.
- Cuando el espesor es mayor o igual a 3 mm. Es preferible trabajarlo en caliente para darle una flexibilidad suficiente, y realizar una curvatura con el espejo.

B). **El absorbedor**

Su función es convertir en energía térmica, la energía solar que se concentra en el fluido caloportador también llamado fluido térmico o HTF (Heat Transfer Fluid) procedente del concentrador. El absorbedor consta de dos tubos concéntricos: el interno, donde el fluido se calienta, es metálico y el externo es de cristal.

El tubo interno debe tener una alta absorción de luz solar y a su vez una emisividad de cociente bajo ya que queremos concentrar la radiación pero no emitirla. El problema de este requisito es la consecuencia de degradación de materiales, por ello se utiliza recubrimientos que puedan soportar estas



condiciones. Y una vez conseguido este material, su principal problema es que al superar unas ciertas temperaturas en contacto con el aire se degradan, por lo que es necesario un alto vacío entre el tubo interior y el exterior.

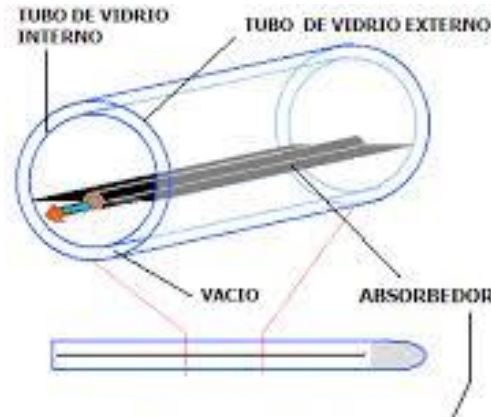


FIGURA 9 < TUBO ABSORBEDOR, TUBO DE VIDRIO INTERNO Y TUBO DE VIDRIO EXTERNO >

B.1) **El sistema HTF (fluido interno de los tubos absorbedores)**

Para conseguir temperaturas elevadas es muy complicado, y se han necesitado estudios previos. Ya que si hay fugas de este fluido a estas temperaturas pueden generar problemas muy grandes con respecto al medioambiente, explosiones, degradación, etc. Con el estudio del HTF, se ha investigado que este es el fluido más adaptable para nuestras necesidades por el momento. Consigue altas temperaturas, a su vez es un fluido viscoso y esto ayuda a evitar el uso del agua. El agua es un fluido mucho más peligroso, el cual no puede llegar a estas temperaturas, pero si se utilizase se prescindiría de tuberías más grandes y de una facilidad mayor para obtener fugas, por su punto de ebullición.

C). **Estructura del concentrador**

Es necesario mover el colector y poder conseguir que aproveche la máxima radiación a lo largo del día conforme el sol hace su trayectoria diaria en el cielo.

La base que sostiene el concentrador solar, tiene una inclinación de 15° para conseguir de esta manera el máximo aprovechamiento de radiación recibida pues el ángulo del sol puede tener una variación de unos $\pm 15^\circ$ (ángulo dado en el análisis del algoritmo solar, este ángulo es una variación definida que tiene el sol con respecto a la tierra). Es lo necesario para mantener la radiación reflejada en el absorbedor.

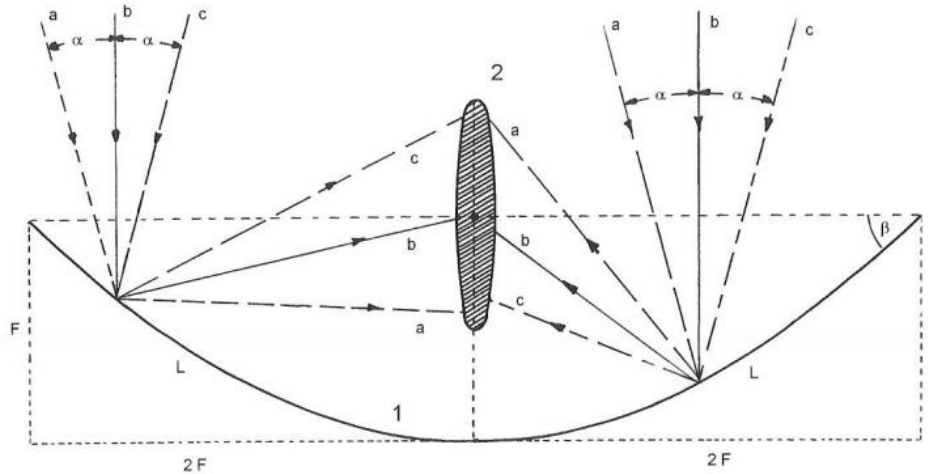


FIGURA 10 < ESTRUCTURA DE LOS ESPEJOS >

La FIGURA 10 representa la estructura de los espejos cuando captan la energía solar desde diferentes puntos sabiendo que el número 1, es el espejo y el número 2 es el tubo absorbedor.

Cuando el espejo está perpendicular a los rayos del sol, la radiación solar es máxima y es representada por el rayo "b". Que ésta es dirigida al centro del tubo absorbedor, incrementando el fluido térmico interno muy rápidamente.

Generalmente, cualquier incidencia solar proveniente del sol a, b, c es captada por el espejo curvo, con una longitud L, y dirigida la incidencia a la línea focal situada en el centro habiendo una distancia 2F a la izquierda y 2F a la derecha, siendo el doble de la altura del espejo.

La decisión de estas distancias depende de la elección para obtener el mayor rendimiento del espejo a la hora de captar la radiación solar.

D). **El sistema de seguimiento solar**

La luz se concentra en una zona lineal cerca del punto focal de la parábola. El hecho de que el ángulo del sol respecto a la tierra varía, los espejos requieren un motor de seguimiento para mantenerse enfocando al tubo cilíndrico.

El seguimiento más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilindros parabólicos, y dicho seguimiento lo realiza un control electrónico de



manera que el colector esté siempre enfocando hacia el sol hasta conseguir su objetivo.

El objetivo de este movimiento, es un buen enfoque sobre el tubo absorbedor que se encuentra a lo largo del foco de la parábola, consiguiendo unas temperaturas entre 150°C y 350°C. Por ello si la temperatura que recibe el reflector es inferior a la mínima, el colector estará enfocando pero una vez que la temperatura conseguida llega a su máxima entonces el colector debería desenfocar.

E). **El fluido caloportador**

El fluido HTF es el problema más destacado en estas plantas termosolares.

La función principal del sistema HTF es transportar el calor captado por los concentradores cilindro parabólicos hasta el ciclo agua-vapor, para que este pueda generar vapor con el que se acciona la turbina.

El aceite térmico llamado HTF o fluido caloportador absorbe en forma de energía térmica la energía procedente del sol. Debido a su gran concentración y la temperatura a la que alcanza, si no se tienen en cuenta las pérdidas de calor, los materiales, la radiación solar y otros factores se podrían originar fugas en las tuberías originando incendios y a su vez contaminación.

Los fluidos utilizados son aceites sintéticos que se degradan rápidamente al superar los 400°C, de este modo el fluido es llamado HTF(Heat Transfer Fluid), que trabaja entre los 150°C y los 400°C. Y debido a los cambios de temperatura , su densidad y su posibilidad de solidificar o degradar como se ha comentado anteriormente es el tema más complejo en estas plantas termosolares.

La eficiencia energética en este concentrador solar es la relación en la energía recibida y la aprovechada por el fluido caloportador. Ésta se basa en la energía recibida, el área de captación y el factor de concentración definidas como:

⇒ **La energía recibida**

El sol emite energía, y atraviesa con bastante eficacia la atmósfera, pero cuando hay nubes o masas de polvo parte de ella es absorbida o reflejada.

Así la energía recibida varía según una cantidad de factores: momento del día, condiciones atmosféricas y la latitud.



⇒ El área de captación

El área de captación es la multiplicación del ancho de la parábola y la longitud de la misma.

Esta área de captación tiene una entrada de energía y una salida de energía.

- La entrada de energía, se considera la irradiancia que llega a la superficie útil de captación de la planta. Siendo superficie útil, el área total de captación de la planta afectada por un factor coseno que depende de la posición del sol.
- La salida de energía, es la radiación solar que tiene la superficie una vez se eliminan las pérdidas.

En el área de captación; cuando la radiación solar incide sobre el espejo parabólico, se generan un gran cantidad de pérdidas, debido a diferentes factores. Las principales pérdidas que afectan a la energía solar que recibe el colector son:

- Pérdidas ópticas:

Son debidas a que los propios elementos de los colectores tienen imperfecciones que provocan que sólo parte de la radiación solar sea captada por el reflector, calentando así el fluido que circula por el tubo absorbedor. Sos afectador por:

- Reflectividad: Según aumente la suciedad del colector, la reflectividad disminuye.
- Factor de interceptación: Los errores del seguimiento solar provoca que no todos los rayos sean dirigidos hacia el tubo absorbedor.
- Transmisividad: Parte de la radiación solar dirigida hacia el tubo absorbedor no es capaz de atravesarlo. De esta manera, la transmisividad es la relación entre la radiación solar dirigida hacia el tubo absorbedor y la que pasa através de él.
- Absortividad: Cuantifica la cantidad de radiación incidente que la superficie puede absorber.



- Pérdidas geométricas:

Se originan pérdidas que dependen de la posición de los colectores, ya que los CCP pueden darse sombra entre ellos, y tienen un diferente ángulo de incidencia, cada uno de ellos, que depende de su posición con respecto al sol.

- Pérdidas térmicas:

Asociadas al tubo absorbedor y a las tuberías de fluido térmico. Éstas relacionan las pérdidas originadas por convección, por conducción y por radiación.

- Por conducción: Al transferir calor entre el tubo absorbedor y las tuberías que se encuentran a diferente temperatura, aparecen éstas pérdidas.
- Por radiación: No existe contacto entre ambos componentes, pero se produce una transferencia de calor entre ambos al tener diferente temperatura, originando pérdidas de radiación.
- Por convección: Las pérdidas por convección se originan cuando interviene un fluido en movimiento que transporta la energía térmica entre las dos zonas de diferente temperatura.

⇒ **El Factor de Concentración**

Los colectores de concentración solar concentran la energía en un punto o en una línea. Así queda definido como la relación entre el área de apertura del colector y el área del receptor.



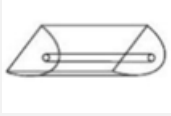



Tipo de absorbedor	Planta termosolar	Croquis	Relación de concentración
Absorbedor Tubular	CCP		$15 < C < 40$
Absorbedor Tubular	Fresnel		$1 < C < 15$
Absorbedor puntual	Torre Central		$100 < C < 1000$
Absorbedor puntual	Disco Parabólico		$100 < C < 1500$

TABLA 4 < CONCENTRACIÓN SOLAR >

5.6.2 Sistema de potencia

El objetivo principal de las CETS es convertir una energía en forma de calor a otra en forma eléctrica. Para esta conversión se necesita un proceso siendo éste un ciclo de vapor. Se tiene que transferir la energía desde el campo solar o desde las sales fundidas, dependiendo si la planta está operando de noche o de día, a un flujo de agua que es evaporado y expandido en una turbina.

5.6.2.1 El sistema de bombeo



Tiene como objeto elevar la presión del fluido térmico, siempre consiguiendo que el fluido permanezca en estado líquido y que no haya vaporización.

5.6.2.2 Los tanques de expansión

El fin de los tanques de expansión es absorber las diferencias de volumen cuando el fluido se calienta, se sitúan en los puntos más altos de la planta.

Son inertizados con Nitrógeno para evitar la degradación del aceite térmico por oxidación y cracking en los tanques. Se presurizan con Nitrógeno a una presión superior a la del vapor, 11 bars de presión relativa.

Se tiene como objeto la absorción del aumento de volumen que se produce al expandirse, por calentamiento, el aceite sintético. Debido al cambio de temperatura que presenta el HTF en estas plantas termosolares, de 40°C a 400°C, aparece un cambio brusco de densidad provocando, así mismo, una variación del volumen.

5.6.2.3 Los trenes de generación de vapor

La turbina está conectada al generador de electricidad, a los intercambiadores de calor, a un condensador y a un degasificador. Ésta se encuentra dividida en dos etapas: alta presión y baja presión para que el agua pueda seguir un proceso:

- En principio se obtiene un vapor recalentado saliente del generador de vapor, que es enviado a la turbina de alta presión.
- Después en la propia turbina de alta presión, se sobrecaliente el vapor aumentándose su temperatura para así poder llevarlo a la turbina de baja presión.
- Así mismo, en la turbina de baja presión el vapor es expandido hacia el condensador obteniendo líquido saturado.
- Una vez se tenga líquido saturado, se envía al intercambiador para eliminar cualquier posible partícula gaseosa.

Por último se vuelve a enviar el líquido al generador de vapor



5.6.2.3.1 Turbina

Su objeto es transformar la energía del vapor en energía mecánica a través del intercambio del movimiento entre dicho vapor y los álabes de la turbina.

A su vez aparecen diferentes etapas en una turbina, divididas por diferentes tamaños en la propia turbina. el vapor cuando atraviesa los diferentes cuerpos de la turbina pierde presión, por ello de una etapa a otra el cuerpo de la turbina aumenta teniendo como objeto el aprovechamiento de la máxima fuerza del vapor.

5.6.2.3.2 Generador

Debe ser capaz de convertir la energía mecánica de la turbina de vapor en energía eléctrica. Dicha energía mecánica proviene del movimiento de la turbina, accionada dependiendo del tipo de central. En este caso al ser una planta termosolar de CCP, requiere vapor de agua para mover los álabes.

En la FIGURA 11, se representa gráficamente el sistema de generación de energía eléctrica, accionando la turbina por vapor de agua.

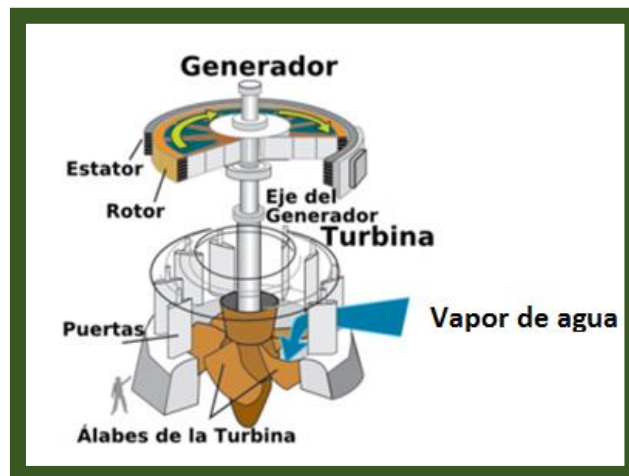


FIGURA 11 < UNIDAD DE POTENCIA: TURBINA Y GENERADOR >



Los álabes de la turbina y las puertas verticales regulan el vapor que entra. A su vez, el generador que se ve en la FIGURA 11 consta de:

- Estátor: Parte estática del generador.
- Rotor: Parte móvil conectada al eje de la turbina.

En el rotor se hace circular una corriente que produce un campo magnético. Mientras que el estátor está constituido por bobinas por las que circula la corriente. De este modo, el rotor gira provocando que el flujo del campo magnético a través del estátor varíe con el tiempo, y así se genera la electricidad.

5.6.2.3.3 Intercambiador de calor

Los intercambiadores de calor se pueden especializar en el calentamiento del agua, generación de vapor, sobrecalentamiento de éste y recalentamiento después de atravesar la turbina.

El objeto del intercambiador de calor es generar el vapor necesario partiendo de energía térmica, para así alimentar un ciclo Rankine.

5.6.2.3.4 Ciclo Rankine

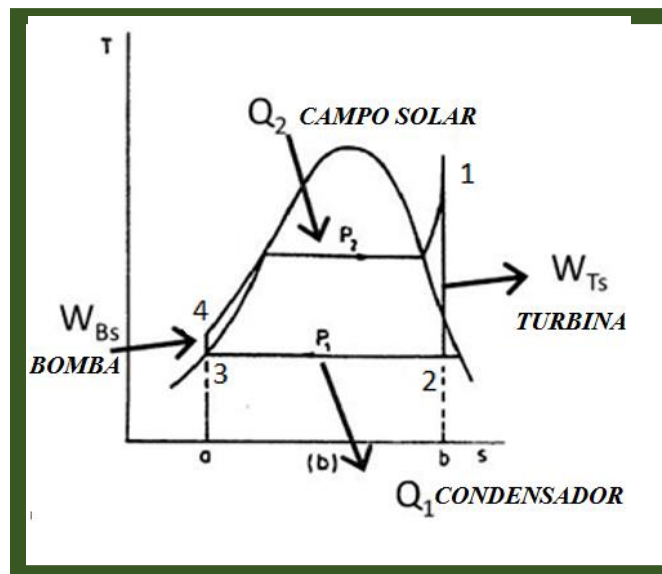


FIGURA 12 < CICLO RANKINE >



La FIGURA 12 representa un diagrama T-s de un ciclo Rankine ideal formado por dos procesos:

- Isoentrópico: La bomba y la turbina se encuentran en este proceso al ser adiabáticos. Estos sistemas muestran una entropía constante al no experimentar intercambio de calor.
- Isobárico: El condensador y el campo solar (en vez de una caldera), son isobáricos porque operan sin pérdidas de carga y sin caídas de presión, es decir la presión de estos sistemas es constante.

Además viendo la FIGURA 12, se tienen diferentes procesos en este ciclo Rankine con relación T-s (Temperatura-Entropía):

PROCESO 1-2 (TURBINA): Se produce una expansión del refrigerante a través de la turbina, generando potencia en la misma, y disminuyendo la presión de dicho refrigerante.

PROCESO 2-3 (CONDENSADOR): El fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado gracias al condensador.

PROCESO 3-4 (BOMBA): Se produce un consumo de potencia mediante una bomba, siendo un propósito de aumento de presión del fluido de trabajo hasta conseguir la misma presión que tiene el campo solar.

PROCESO 4-1 (CAMPO SOLAR): Gracias al empleo del campo solar, se obtiene una adición de calor para así evaporar la sustancia refrigerante obteniendo de este modo vapor sobrecalentado.

Es importante tener en cuenta, que durante la expansión del vapor en la turbina de alta presión se alcanzan condiciones de saturación, apareciendo unas gotas de agua en el vapor. Éstas se comportan como unas piedras que golpean a los álabes, por ello se debe extraer el vapor, se vuelve a calentar y se vuelve a expandir en una turbina de baja presión.



5.6.3 Sistema de almacenamiento térmico (TES)

El almacenamiento consiste en reservar parte de la energía producida, siendo este almacenamiento con sales inorgánicas fundidas.

Gracias a la experiencia con este tipo de almacenamiento, se está permitiendo avanzar hacia plantas termosolares más eficientes.

Este almacenamiento con sales fundidas es importante ya que se puede obtener energía en uso nocturno o incluso cualquier día donde los captadores no perciban suficiente radiación solar, siempre que se haya almacenado previamente esta energía en los tanques de sales.

Se tienen dos tanques a diferentes temperaturas, tanque de sales calientes y tanque de sales frías que aparecen en dos ciclos:

- Ciclo de carga. Durante este ciclo, las sales intercambian calor en el horario diurno, cuando la radiación captado por los colectores es mayor a la necesaria. Las sales, que están frías se van calentando y una vez que aumentan su temperatura, a una de diseño, van a almacenarse al llamado "tanque caliente".
- Ciclo de descarga. Durante este ciclo, las sales que están calientes son utilizadas para calentar el fluido caloportador, en el horario diurno cuando la radiación captado por los colectores es pequeña o en el horario nocturno. Las sales procedentes del tanque caliente se van enfriando, y una vez que la temperatura de ellas desciende, van a almacenarse dichas sales fundidas al llamado "tanque frío".

5.6.4 Sistema de Control para el seguimiento solar

5.6.4.1 Sistema de seguimiento solar en el mercado

El Sistema de seguimiento solar que demanda el mercado actual es preciso, por el conocimiento de la ubicación de la posición de la planta solar con coordenadas GPS y el algoritmo solar.



Este algoritmo es un conjunto de operaciones para hallar la posición del sol con respecto a la tierra, teniendo un punto como referencia, la ubicación de la planta termosolar. Éste permite obtener el ángulo de incidencia y la posición de cada uno de los colectores respecto al sol durante las 24 horas de operación de la planta.

Se han hecho estudios previos del cálculo de estos datos y gracias al avance tecnológico, este punto ya no es una complicación.

Respecto al algoritmo solar y la radiación solar. El cálculo de la posición del sol se realiza con un modelo matemático que dada una latitud, devuelve los datos de altura solar y acimut solar a cualquier hora y día del año. A partir de los datos de la radiación solar extraterrestre de la ubicación de la planta termosolar de CCP y la determinación de la orientación e inclinación de los colectores, se implementa el cálculo de la radiación en superficie inclinada en esa posición. Mediante el algoritmo solar NREL SPA, se analizan los cálculos básicos generalizados para cualquier planta.

Para el cálculo de la trayectoria solar se calcula la radiación en superficie inclinada que se realiza un algoritmo para el cálculo de la trayectoria solar para los doce meses del año, representativos, a partir de la latitud de la ubicación de la instalación: ángulo phi “ Φ ”.

Los parámetros que se necesitan para calcular la trayectoria del sol son su altura solar y ángulo acimut, calculados a partir de la declinación, ángulo de salida del sol y ángulo cenit.

- Declinación

$$\delta [^\circ] = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \frac{284 + N}{365} \right)$$

Siendo N el número de día del año, $1 < N < 365$

- Ángulo de salida del sol

$$\omega = a \cdot \cos(-\tan\Phi \cdot \tan \delta)$$

- Ángulo cenit

$$\theta = a \cdot \cos(\cos\Phi \cdot \cos\delta \cdot \cos \omega + \text{sen} \Phi \cdot \text{sen}\delta)$$

Cálculo de la trayectoria del sol

- Altura solar

$$\alpha = 90 - \theta$$



- Ángulo cenit

$$\zeta = \text{signo de } \omega \cdot \left| a \cdot \cos\left(\frac{\cos \theta \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta \cdot \cos \phi}\right) \right|$$

Una vez obtenidos los cálculos básicos que ayudan a comprender el funcionamiento del algoritmo solar, se controlan los colectores por medio de PLC's (Programmer Logic Controllers). Los PLC se instalan en los llamados LOC (Logic Control Unit), que están colocados en cada uno de los colectores para controlar y monitorizar la posición del colector.

El LOC es el dispositivo encargado de gestionar el movimiento de los espejos del campo solar de manera autónoma. Para ello, éste calcula el ángulo teórico de posición del sol en base a la fecha, hora y posición del colector y lanza las órdenes a los actuadores a través de válvulas solenoide.

La demanda en el mercado actual, pone en hora y sincronización de los diferentes LOCs utilizando el protocolo NPT generado en dicho sistema de sincronización del DCS (Sistema de Control Distribuido).

El DCS dispone de un receptor GPS y de un servidor NPT integrado que generará la señal de sincronización para el propio DCS y para todos aquellos equipos. Estos equipos disponen de un cliente NPT para sincronizarse mediante dicho protocolo.

En el caso de los LOCs, ofertados por ABB, incluyen un cliente NPT que les permite sincronizarse con el GPS/servidor NPT del DCS.

5.6.4.2 Seguimiento solar aplicado a nuestro proyecto

El principal objeto del sistema de control es asegurar que el sistema de actuador eléctrico haga que los cilindros parabólicos sigan y mantengan el ángulo óptimo con el fin de aprovechar al máximo los rayos del sol, ver FIGURA 5 <CONCENTRADOR (REFLECTOR), TUBO ABSORBEDOR Y SISTEMA DE SEGUIMIENTO >.

Para obtener este ángulo óptimo, se debe conseguir que el plano de la parábola esté perpendicularmente a la dirección de la radiación.

Hay tres tipos de seguidores solares:



1. Sistema conducido sin equipos electrónicos. Según la diferencia de presiones de un respectivo gas, cambia la posición.
2. Sistema de seguimiento cronológico. Su propósito es contrarrestar la rotación de la tierra girando a su misma velocidad, pero en dirección opuesta.
3. Sistema de seguimiento activo. Este último es el que está basado este proyecto, ya que es el de mayor simplicidad. Utiliza un dispositivo de detección solar alcanzando la orientación del sol rápida y eficientemente. La simulación lo hace de forma general, sin un movimiento de los colectores, sino un display de la temperatura que tiene cada uno de ellos según el seguimiento solar que el usuario decida.

Los colectores pueden estar en dos posiciones según el control:

- Enfocar. Un espejo es perfectamente enfocado cuando los rayos solares se reciben en dirección perpendicular.
- Desenfocar. Un espejo no está bien enfocando cuando está perdiendo superficie de captación de la radiación solar.

El enfoque de los espejos no suele ser el propósito de los CCP. Su propósito es controlar, ya que no solamente tienen que seguir de forma eficiente al sol, sino que se debe controlar tanto el enfoque como el desenfoco para evitar que el fluido se encuentre a ciertas temperaturas mayores o menores según la temperatura mínima y máxima de diseño.

5.6.5 Explicación breve del funcionamiento de todo el conjunto de sistemas.

Véase la FIGURA 13 posterior, para tener una explicación de una planta termosolar formada básicamente por estos sistemas:

1.- **CAMPO SOLAR.** El sistema de captación de la energía irradiada por el sol, para calentar el fluido HTF y ayudar a generar electricidad.



2.- **HTF (Heat Transfer Fluid)**. El fluido de aceite térmico transfiere la energía de los captadores cilindro parabólicos a los intercambiadores de calor (Generador de calor, Precalentador solar, Supercalentador solar, Recalentador solar) para generar vapor y para mantener las sales fundidas almacenadas en los tanques de Frio y Caliente a una temperatura de operación en horas de mínima o no radiación solar.

3.- **TURBINA DE VAPOR**. El vapor producido se utiliza en la turbina de vapor para generar energía mecánica.

4.- **GENERADOR ELÉCTRICO**. Éste transforma en energía eléctrica la energía mecánica de la turbina.

5.- **TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE SALES**. En este caso particular la planta solar cuenta con un sistema de almacenamiento de energía térmica. Éste consiste en dos tanques, uno para las sales frías y otro para las sales calientes. Llevan un sistema de inertización para evitar la presencia de agua y/o sistemas que minimice las pérdidas de calor, pues deben mantenerse a una temperatura por encima del punto de solidificación.

6.- **RECIPIENTE EXPANSOR**. Éste absorbe las variaciones de volumen del fluido térmico con la temperatura, permitiendo así un comportamiento estable a la hora de bombearlo. Es bombeado al sistema de colectores solares donde incrementa su temperatura y después es conducido al sistema de generación de vapor, donde transfiere la energía térmica al agua, produciendo dicho vapor.

7.- **CONDENSADOR**. Éste recoge las condensaciones producidas en la turbina al enfriamiento del vapor al expandirse en la turbina de vapor.

8.- **DESAIREADOR**. Recoge los sólidos producidos de los condensados, procedentes de la turbina de vapor.

9.- **TRANSFORMADOR DE POTENCIA** (no indicado en el FIGURA 13). Recoge del Generador Eléctrico el voltaje generado en el primario de sus devanados y eleva



esta tensión en el devanado secundario a la tensión requerida por la red de distribución regional y/o nacional.

10.- **SISTEMAS AUXILIARES** (no se indican en la FIGURA 13). Son una serie de sistemas que permiten la operación y control de la planta solar. Entre ellos el sistema de alimentación eléctrica no relacionada con la generación, los sistemas de bombeo, de filtrado, anti congelación, Instrumentación y Control (medición de las variables de presión, temperatura, nivel, etc., sistemas de adquisición de datos locales, PLCs, un sistema general de seguimiento del estado total de la planta Sistema de Control Distribuido), sistemas de alimentación ininterrumpida, sistemas de emergencia, sistemas de suministro y tratamiento de aguas, sistemas de vertidos, sistema contra incendios, sistema de inertización para evitar la oxidación del fluido térmico y de las sales fundidas en los tanques frío y caliente y recipiente expansor, sistema de suministro de aire en general y para instrumentos (aire limpio).

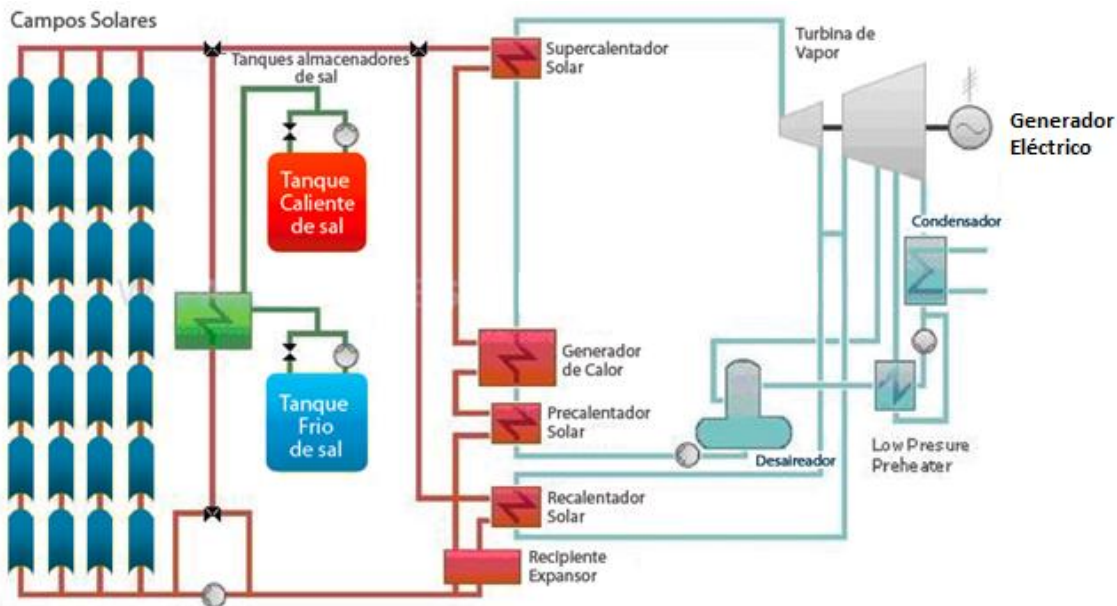


FIGURA 13 < REPRESENTACIÓN DE LOS DIFERENTES SISTEMAS QUE ESTÁN DESCRITOS ANTERIORMENTE:
CAMPO SOLAR, TRENES DE GENERADOR DE VAPOR, TURBINA, GENERADOR, ALMACENAMIENTO
TÉRMICO, TANQUE DE EXPANSIÓN/RECIPIENTE EXPANSOR >



5.7 Funcionamiento general de las plantas termosolares en CCP

Las plantas termosolares de CCP (Colectores Cilindro Parabólico) consisten en la generación de electricidad aprovechando la energía solar por unos colectores cilindro parabólico para así reflejar la energía captada proveniente del sol, mediante los espejos, y calentar el fluido mediante los tubos absorbedores llamados PTC (Parabolic Through Collectors) que atraviesan cada uno de los reflectores en serie. Estas plantas estudiadas incluyen un sistema de almacenamiento térmico siendo unas sales fundidas que permiten extender el tiempo de operación y a su vez la generación de potencia eléctrica durante la escasez de radiación solar. De esta manera el fluido que atraviesa el interior de los tubos absorbedores, se calienta.



FIGURA 14 < COLECTOR FORMADO POR EL ESPEJO LLAMADO REFLECTOR Y EL TUBO ABSORBEDOR, CON HTF EN SU INTERIOR QUE ATRAVIESAN LOS CCP UBICADO EN LA ZONA FOCAL DEL ESPEJO >

La energía térmica almacenada en este fluido es transferida a otro fluido, en este caso agua. Sucede en el generador de vapor, puesto que la energía térmica transferida al agua, cambia su estado a vapor.

Mediante la expansión del vapor en la turbina, la energía térmica del vapor se transforma en energía mecánica. Finalmente, mediante un alternador la energía mecánica suministrada por la turbina se transforma en energía eléctrica.

La misión de este almacenamiento, es acumular calor gracias a la radiación solar teniendo como objetivo generar electricidad y así poder sustituir al campo solar cuando la radiación solar es escasa ya sea porque es de noche, día nublado, o cualquier situación en periodo de baja radiación.



Teniendo de referencia una temperatura de diseño entre 150°C y 400°C que es el rango donde el fluido térmico del campo solar capta energía suficiente como para ayudar a la función de generar electricidad, el funcionamiento de la Central Eléctrica Termosolar consta de dos estados en el funcionamiento. El primer estado se basa en qué ocurre si la temperatura es mayor a 150°C y el segundo estado se basa en qué ocurre si la temperatura es inferior a 150°C, ambos están relacionados:

➔ Estado 1:

La radiación solar captada por los tubos absorbedores de los colectores es suficiente, siendo la temperatura del fluido térmico mayor a 150°C.

El campo solar capta la radiación solar. Siendo ésta captada por tubos absorbedores que transmiten el calor al fluido HTF que está circulando a través de ellos.

El fluido recorre las tuberías, que pasan tanto por el almacenaje como por el bloque de potencia. De esta manera el calor del fluido, que pasa por el almacenaje, calienta las sales frías que estaban a 40°C y una vez que alcancen las sales los 260°C, las sales se cambian al tanque caliente mediante el intercambiador de calor. De forma paralela, el calor del fluido térmico, que transmite su calor al bloque de potencia, ayuda a generar electricidad mediante el generador de vapor, el tanque de expansión, la turbina y el generador de electricidad.

➔ Estado 2:

La radiación solar captada por los tubos absorbedores de los colectores no es suficiente, siendo la temperatura del fluido térmico menor a 150°C.

El campo solar no entra en juego. El tanque de sales calientes, debido al almacenamiento de calor explicado en el estado 1 (es decir las sales frías se calientan mediante el calor del fluido térmico proveniente de la radiación solar), hace la función del campo solar. Teniendo en cuenta que aunque el campo solar o alguno de los tanques no participen en la captación de energía y por ello en la generación de electricidad, siempre deben estar estos sistemas en movimiento para evitar en el caso del aceite térmico y de las sales su solidificación.

Todo lo explicado aparece en la FIGURA 15 posterior. Diferenciando su funcionamiento en Colectores Cilindro Parabólicos (campo solar), almacenaje (tanque de sales frías y sales calientes) y bloque de potencia (generador de vapor, turbina y generador de electricidad).

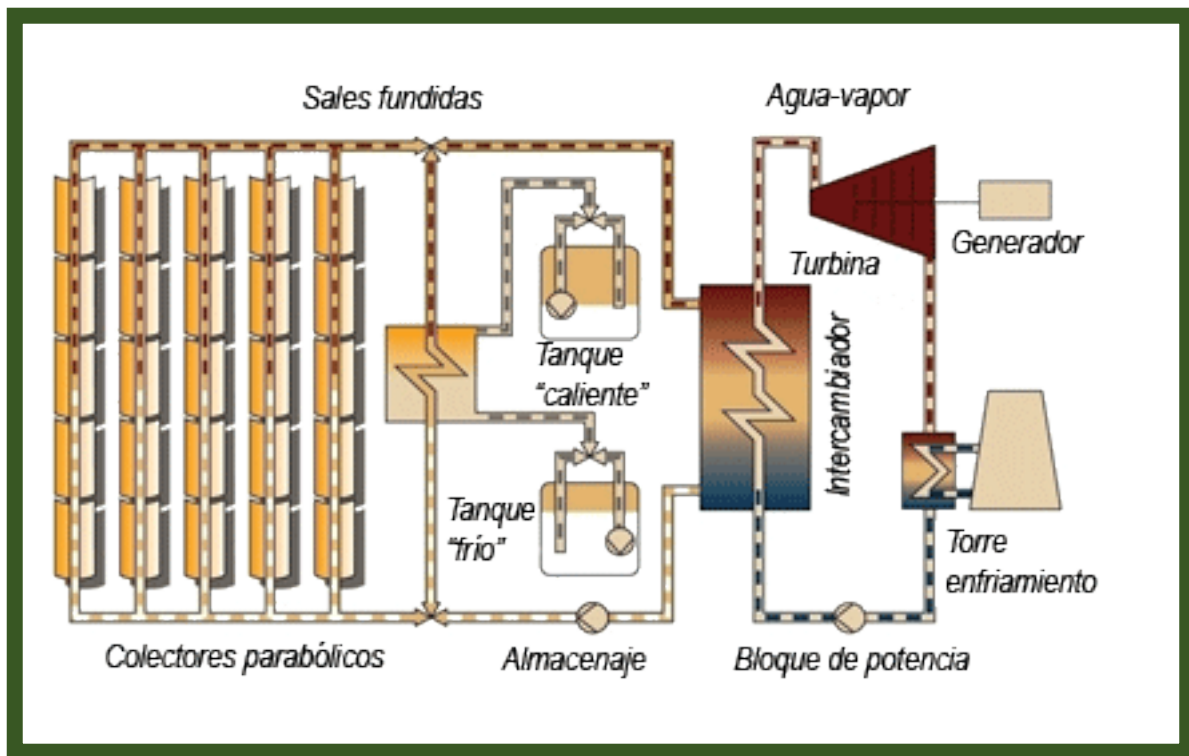


FIGURA 15 <SISTEMAS DE UNA PLANTA TERMOSOLAR>

5.8 Funcionamiento de las plantas termosolares basado en la simulación de este proyecto

Este funcionamiento es exposición de la operación de la planta utilizando SCADAs necesaria para explicar y entender una planta termosolar de forma general.

El programa se basa en unas condiciones de funcionamiento:

1. Arranque o parada. Como cualquier funcionamiento, es imprescindible saber el estado que tiene la instalación industrial para tener en cuenta si estará consumiendo. De esta manera aparecen dos interruptores para elección del estado de ella.
2. Función de la planta. La planta tiene diferentes formas de funcionamiento, dependiendo de si es de día, de noche o un día con poca radiación solar. Están representados tres leds.



- ❖ Led para el horario diurno. En esta representación, se intenta minimizar todos los cálculos para el algoritmo solar, la ubicación del colector y la ubicación del colector según la planta real. Consiguiendo con esta simulación simple una visibilidad entendible para el operador.
 - ❖ Led para el horario nocturno. Cuando el sol desaparece por el Oeste, se sabe que ese momento no hay horas de luz. Se tiene una variable que se activa cuando el usuario simula que es de noche.
 - ❖ Led para un día con poca radiación. Hay días que se tiene una radiación solar pequeña, por cualquier motivo, ya sea invierno, sea un día nublado, lluvioso, etc. Y aparece un gauge, instrumento que mide y si está conectado con una gráfica da visualmente una cantidad.

Si la temperatura, aunque sea de día, que obtiene el fluido térmico es menor a 150 °C, se considera una opción especial "Día con poca radiación".
3. Activación o desactivación de las variables de los diferentes sistemas. La planta termosolar está representada con diferentes sistemas, y se tiene variedad de pantallas representando si están o no en funcionamiento cada uno de ellos.
 4. Funcionamiento de la pantalla de los colectores solares. Se tiene otro gauge relacionado con la temperatura de entrada que introduce el usuario, representando una variación de temperatura y simulando así la radiación solar. Una vez variado el gauge, a mayor o menor temperatura, los cilindros aumentan su temperatura representado por un fluido amarillo, y a mayor temperatura dicho fluido incrementa. La temperatura de entrada es el comienzo, que se transmite a la fila de los demás colectores pudiendo ver la serie de todos ellos en la FIGURA 16. El valor de la variable es mayor en el cuarto y último cilindro.

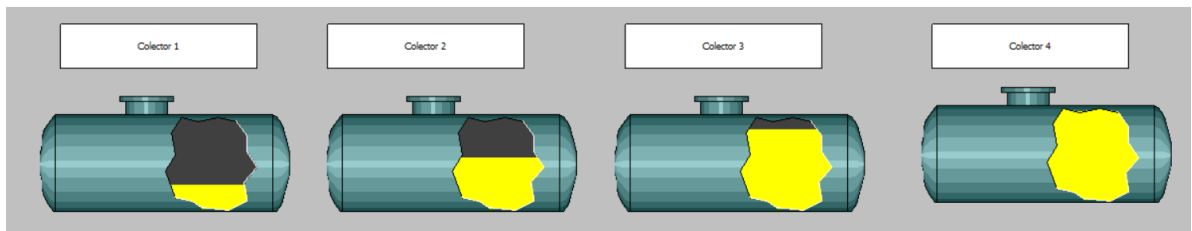


FIGURA 16 < EL GRADIENTE TÉRMICO EN LOS CUATRO COLECTORES >



5. Funcionamiento de la pantalla de almacenamiento térmico que está en funcionamiento una vez que la planta entra en arranque. El almacenamiento térmico se utiliza para explicar el funcionamiento de las sales, que sirven para almacenar calor cuando hay una temperatura suficiente mayor a 150 °C. Y cuando no hay una suficiente radiación, habiendo una temperatura del fluido HTF menor a de 150 °C entonces las sales son las que simulan, que gracias a ellas se genera la electricidad. De esta manera aparecen:
- ❖ Dos leds, Uno de ellos se visualiza cuando la planta está en arranque, apareciendo ambos tanques en funcionamiento. El otro se visualiza cuando las sales son las encargadas de formar parte de la generación de la electricidad, y el campo solar estaría en *stand by*.
 - ❖ Dos tanques. Uno de ellos, es el depósito rojo que representa el tanque lleno de sales calientes. Y otro es el depósito verde que representa el tanque lleno de sales frías.
 - ❖ Un intercambiador que realiza una animación rojo, dependiendo si está intercambiando aportando calor a las sales frías o a la planta para hacer la simulación de generación de electricidad.

Cuando el campo solar es el que participa en la generación de electricidad, entonces las sales no entran en juego y el intercambiador aporta calor procedente del depósito rojo (tanque caliente) hasta el depósito azul (tanque frío).

Cuando el almacenamiento térmico, ambos tanques de sales, es el que participa en la generación de electricidad en vez del campo solar, entonces el intercambiador aporta calor del depósito rojo a la planta simulando que ayuda a generar electricidad.

En la FIGURA 17 se pueden ver los dos tanques, donde hay tuberías entre ambos y también en dirección al sistema de potencia y el campo solar.

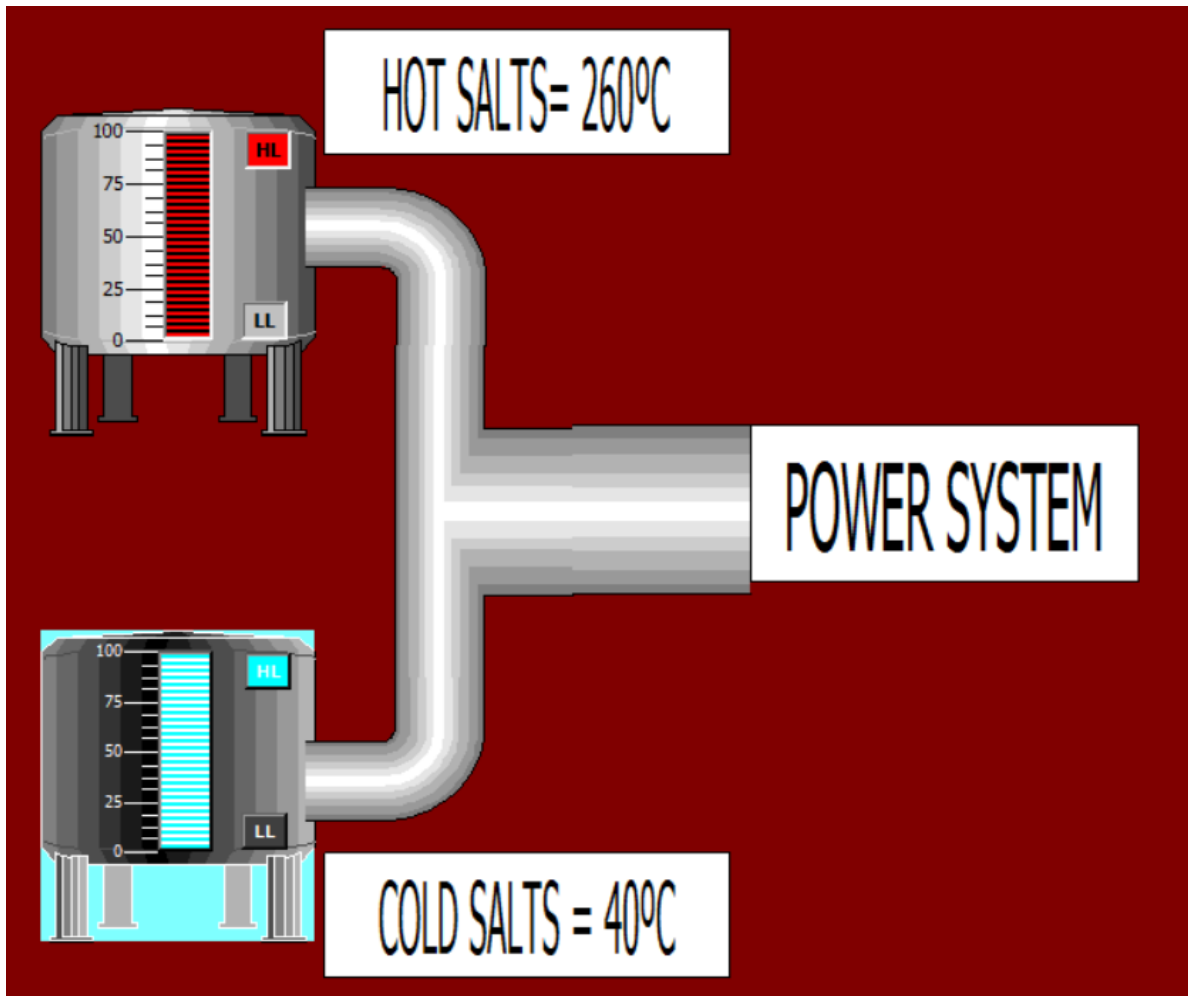


FIGURA 17 < TANQUE DE SALES >

5.9 Problemas en las plantas termosolares de CCP

- ♣ Las pérdidas en un sistema de CCP

Las pérdidas dificultan la obtención de un espejo perfecto, siendo imposible captar la radiación solar total en el reflector.

- ♣ La diferencia de presión de las válvulas en el campo solar

Hay una gran diferencia de presión cuando se produce avería de la instrumentación de control de la presión del vapor generado.



Para ello hay válvulas de alivio, que se activan con la finalidad de que la presión se reduzca en caso de emergencia.

- ♣ El control de la temperatura de los CCP

Si no hay radiación suficiente $T < 150^{\circ}\text{C}$, los colectores no están enfocando, porque no se alcanza la temperatura necesaria para poder calentar al fluido caloportador.

Hay una temperatura mínima, 150°C para empezar a enfocar y una temperatura de consigna, 400°C . Si se alcanza la temperatura de consigna, inmediatamente el colector desenfoca. Véase la TABLA 5.

<150°C	150°C a 400°C	>400°C
Desenfoque (evasión del sol)	Enfoque (seguir el sol)	Desenfoque (evasión del sol)

TABLA 5 < MARGEN DE TEMPERATURA DEL FLUIDO HTF >

El problema es que aunque el colector desenfoca, si hay radiación suficiente para calentar el fluido, la temperatura del fluido sigue incrementando. Esto ocasiona un incremento de la temperatura del fluido, no intencionado, que degrada al HTF.

- ♣ Degradación y solidificación

Es necesario tener un buen control de la temperatura, pues si este supera los 400°C en el fluido térmico, se degrada en compuestos volátiles y pesados. Si supera los 260°C en las sales, se degradan también.

Por el contrario, si la temperatura no alcanza los 150°C en el fluido térmico y los 40°C en las sales, se produce la solidificación de ellos.

- ♣ Rendimiento de la turbina

Se sigue planteando esta cuestión: "¿Merece la pena subir la temperatura del fluido caloportador, HTF?"

A mayores temperaturas, el rendimiento de la turbina es mayor. Pero a mayores temperaturas, las pérdidas son considerables y el rendimiento, por tanto disminuye.



Se siguen investigando, qué fluidos permiten altas temperaturas sin perjudicar el rendimiento de la turbina, pero aún con las respuestas que se tienen, no merece la pena el cambio del fluido HTF.

♣ Fugas

El HTF es peligroso porque sale a la atmósfera con mayor temperatura, pudiendo provocar un incendio.

Las fugas se producen por:

1. Problemas de soldadura en componentes usados para pasar fluido ya sean juntas rotativas o intercambiadores.
2. Problemas de operación del personal o de sistemas antifallo. Puede haber una mala configuración, o un mal mantenimiento provocado por el personal de mantenimiento o los sistemas de alarmas fallen.

5.10 Simulación de una planta Termosolar de SCADA en Visu +

Los SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) son utilizados para visualizar y simular una planta industrial. El control puede ser iniciado por comandos de operador. Los SCADA están relacionados con los PLC's (Programmable Logic Controllers).

Hay mucha variedad de SCADA, en mi caso me he basado en Visu + reconocido por su sencillez y su manejo amigable. Su finalidad es visualizar y analizar los datos con unas características generales:

- **Adquisición de datos.** Control y recopilación de datos operativos.
- **Procedimiento de alarmas.** Al procesar los datos se detectan condiciones de alarma y si una alarma está presente entonces ésta es catalogada y visualizada en listas especiales de alarmas.
- **Visualización.** Los SCADA permiten la supervisión de valores predefinidos.

Su característica fundamental, en el presente proyecto, es la visualización de diferentes sistemas que se representan en pantalla.



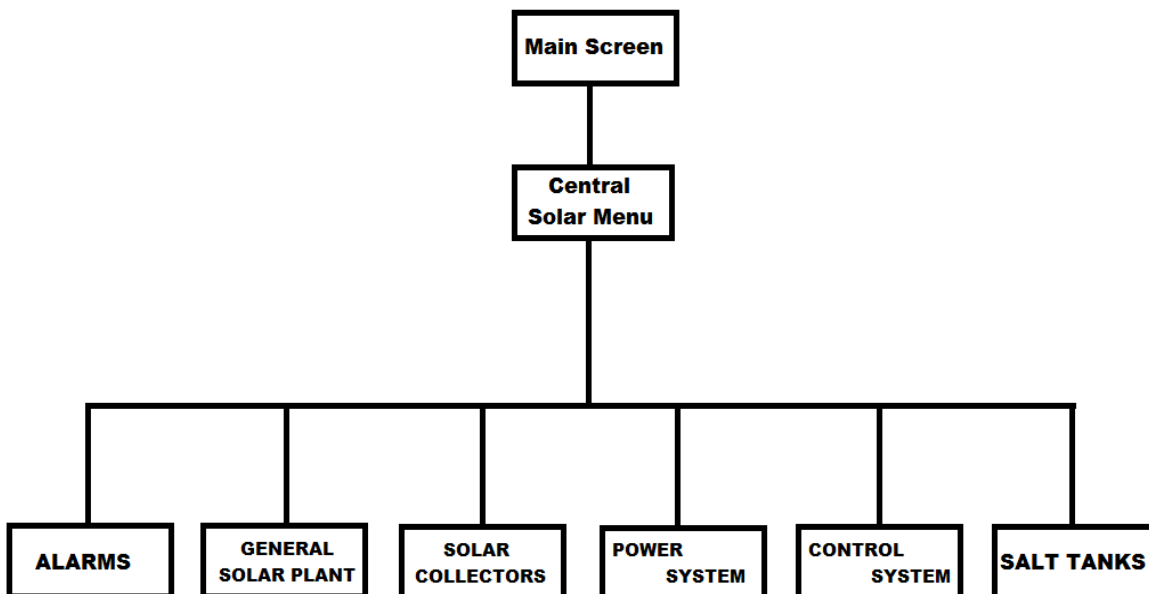
5.10.1 Características generales del Visu +

- Visu + es la herramienta de Phoenix para realizar SCADAs.
- Es una aplicación software y corre en un PC, pantalla táctil, teléfono móvil, etc.
- Sirve para capturar/enviar datos desde/a un PLC.
- Permite comunicar el SCADA con diferentes PLC's (Siemens, Phoenix...)

5.10.2 Simulación de la planta Termosolar en pantallas

En este apartado se explica la estructura del proyecto que se ha hecho con la herramienta Visu+.

En primer lugar se presenta un esquema para poder relacionar cada uno de los sistemas de una planta Termosolar (Ver ESQUEMA 1).



ESQUEMA 1 < ESQUEMA GENERAL DE LA SIMULACIÓN EN VISU + >



1- PANTALLA PRINCIPAL

En primer lugar aparece una pantalla principal, donde nos encontraremos el título de este programa: "Simulación de una planta Termosolar de Colectores Cilindros Parabólicos". Ésta misma tiene dos opciones: "START" o "STOP", siendo arranque o parada, como se ve en la FIGURA 18.



FIGURA 18 < PANTALLA LLAMADA "MAIN SCREEN" >

Si pulsamos "STOP", volvemos a esta pantalla y pone a "0" todas las variables.

Si pulsamos "START", nos dirigimos a la pantalla Menú Solar de la Planta.

2- MENÚ SOLAR DE LA PLANTA

En esta pantalla tenemos opción de dirigirnos a cada uno de los sistemas que participan en una planta Termosolar, incluidas las alarmas que pueden estar encendidas en ese momento.



Los sistemas son:

- ❖ Planta Solar General
- ❖ Colectores Solares
- ❖ Sistema de Potencia
- ❖ Sistema de Control
- ❖ Tanques de Sales

Los pulsadores en color azul, son los sistemas que aparecen en la pantalla indicados en la FIGURA 19, y además con otro pulsador en color rojo llamado alarmas. Cada uno de los pulsadores dirigirá a su pantalla correspondiente.



FIGURA 19 < PANTALLA LLAMADA "CENTRAL SOLAR MENU" >



3- PLANTA SOLAR GENERAL

En esta pantalla el usuario elige la función de la planta. Si está operando de día (suficiente radiación) o noche/ día sin suficiente radiación (cuando no hay suficiente radiación solar).

- Si pulsamos "day". Este pulsador activa aquellos sistemas que están en funcionamiento y participan en la generación de electricidad, iluminando cada uno de sus leds.
 - ❖ El color verde representa que está en funcionamiento el sistema con su correspondiente led.
 - ❖ El color rojo representa que no está en funcionamiento el sistema con su correspondiente led.
- Si pulsamos "night" o "NotEnoughTemp". Se refiere que es de noche por lo tanto no puede haber seguimiento del sol. O la otra alternativa es que no hay suficiente radiación, por lo tanto la temperatura del fluido es menor a 150°C y no puede operar el campo solar.

La diferencia entre los dos puntos anteriores, es que en el primero de ellos opera el campo solar, todos los demás sistemas y las sales frías.

En cambio, en el otro punto no opera el campo solar, los demás sistemas están en funcionamiento y las sales calientes que hacen la función del campo solar.

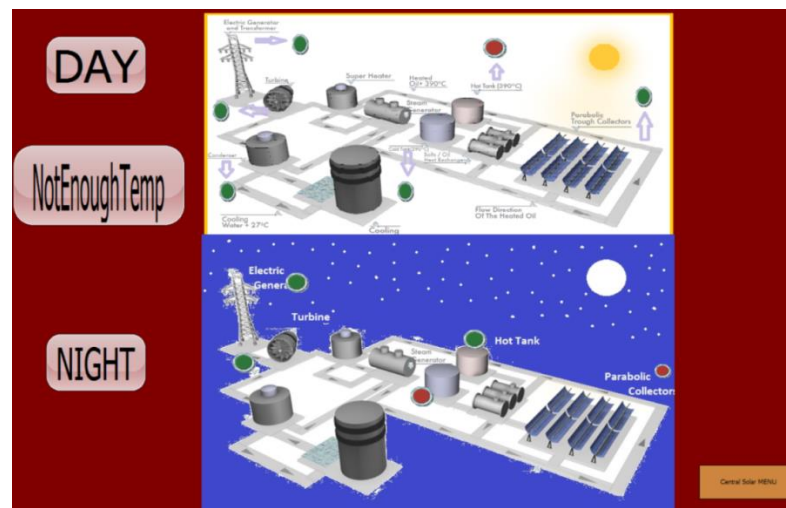


FIGURA 20 < PANTALLA DE LA PLANTA SOLAR GENERAL, REPRESENTA LA ACTIVACIÓN DE LOS SISTEMAS QUE PARTICIPAN EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD >



4- COLECTORES SOLARES



FIGURA 21 < COLECTORES SOLARES >

En esta FIGURA 21 simplemente se muestra una imagen que interpreta los cuatros colectores, en vez de en serie se muestran de forma individual para ver el ángulo de ellos con respecto el sol, y ver el enfoque de ellos.

Esta pantalla de los colectores solares tiene tres pulsadores:

- ❖ "Exit". Lleva a la pantalla llamada : "Main Screen" de la FIGURA 18.
- ❖ "Control System". Lleva a la pantalla del sistema de control, explicada posteriormente.
- ❖ "Central Solar Menu". Lleva a la pantalla del menú de la planta solar que aparece en la FIGURA 19.

5- SISTEMA DEL CONTROL

El sistema del seguimiento solar, al estar simulado, no es complejo. El usuario introduce una temperatura que simula la radiación solar que capta el colector. Y si está entre 150°C y 400°C, entonces el campo solar está en funcionamiento, y los colectores aparecerían con un fluido amarillo, interpretando que este fluido está en el rango de temperatura que tiene como requisito para funcionar.



Los cuatro colectores funcionan en serie, teniendo el "Colector 1" la mínima temperatura, y el último colector "Colector 4" tiene una temperatura mayor a la temperatura de los tres colectores anteriores (Colector 1, Colector 2 y Colector 3). Su temperatura va incrementando, teniendo en cuenta, que el sol continúa irradiando, siempre y cuando los colectores estén enfocando (mirando en dirección al sol). Véase la FIGURA 22.

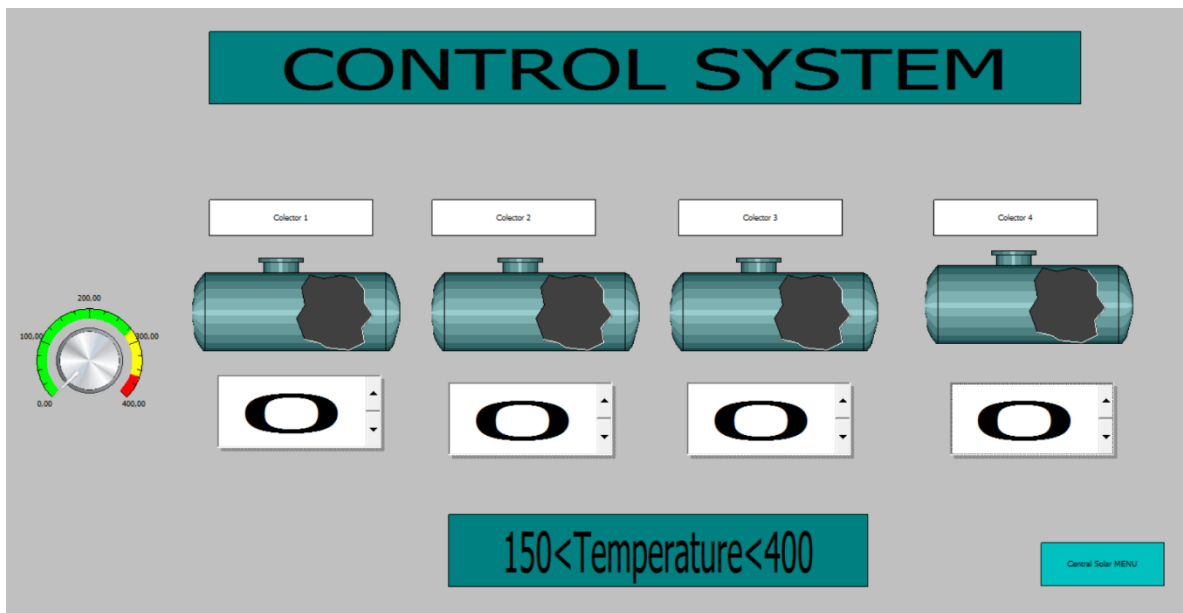


FIGURA 22 < PANTALLA DEL CONTROL DEL SISTEMA QUE REPRESENTA EL CONTROL DE LOS COLECTORES >

Incremento de la temperatura entre cada uno de los colectores:

- Si es verano la diferencia de temperatura de cada uno de los colectores es 50°C.
- Si es invierno la diferencia de temperatura de cada uno de los colectores es 20°C.
- Si es primavera la diferencia de temperatura de cada uno de los colectores es 40°C.
- Si es otoño la diferencia de temperatura de cada uno de los colectores es 30°C.



La explicación anterior del incremento en la temperatura de los colectores, está expuesta en la TABLA 6.

Estación del año	Colector 1 (ver NOTA)	Colector 2	Colector 3	Colector 4
Verano	T1= Temperatura Entrada	T2= TemperaturaEntrada+50°C	T3= T2+50°C	T4=T3+50°C
Invierno	T1= Temperatura Entrada	T2= TemperaturaEntrada+20°C	T3= T2+20°C	T4=T3+20°C
Primavera	T1= Temperatura Entrada	T2= TemperaturaEntrada+40°C	T3= T2+40°C	T4=T3+40°C
Otoño	T1= Temperatura Entrada	T2= TemperaturaEntrada+30°C	T3= T2+30°C	T4=T3+30°C

TABLA 6< DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE LOS COLECTORES SEGÚN LA ESTACIÓN DEL AÑO>

NOTA: T1 es introducida por el usuario.

En verano la radiación es mayor, por ello el incremento de temperatura es mayor por el contrario en invierno la radiación es menor y se produce un incremento de temperatura inferior.

6- SISTEMA DE POTENCIA

El sistema de potencia se basa en el generador de vapor, la turbina, el condensador, bombas y el campo solar.

Se diferencia en:

- Si se pulsa al dibujo que representa el sol. Entonces el campo solar está en funcionamiento y también los demás sistemas para así generar electricidad.



- Si se pulsa la luna, teniendo en cuenta que se refiere a que la radiación solar no es suficiente. El campo solar no se activa, al no estar funcionando pero lo demás estará activo. El almacenamiento térmico sustituye al campo solar, el cual como no pertenece al sistema de potencia en esta pantalla las sales no se ven activas.

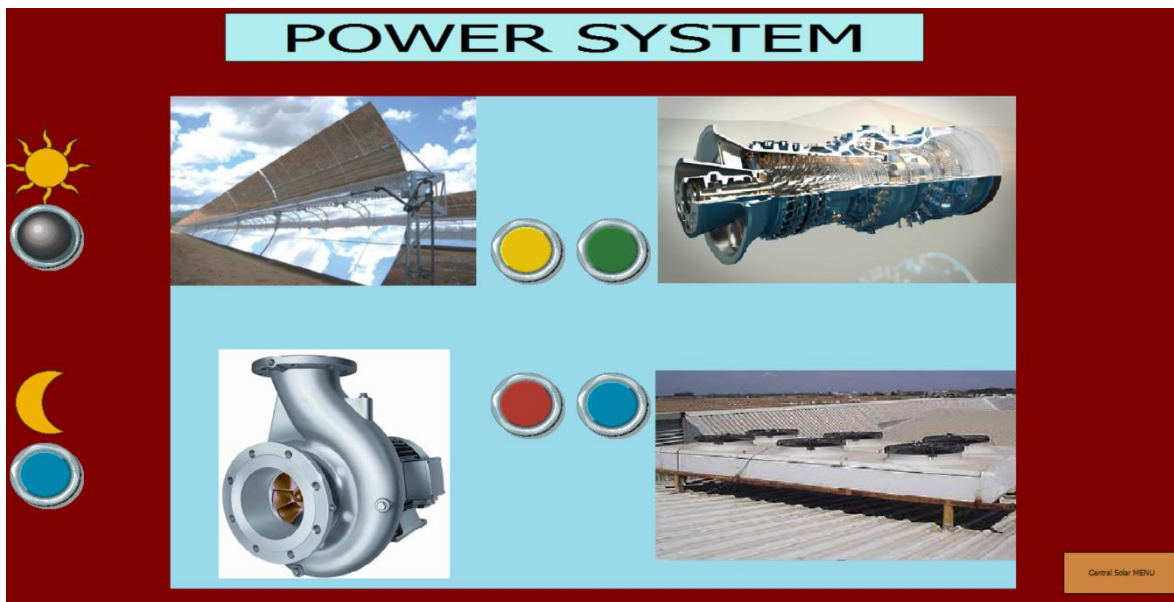


FIGURA 23 < SISTEMA DE POTENCIA EN SIMULACIÓN >

7- TANQUE DE SALES

La siguiente FIGURA 24 muestra la pantalla de funcionamiento de sales, teniendo un tanque de sales frías y un tanque de sales calientes.

En esta simulación tendremos el funcionamiento de los diferentes tanques; cuándo el intercambiador de calor está activo, cuándo hay fluido en las tuberías entre las sales y el campo solar, y cuando hay fluido entre las sales y el bloque de potencia.

- Hacer clic sobre el pulsador "day". Entonces el campo solar está en funcionamiento. De este modo se verá fluido en las tuberías entre el campo solar y el tanque de sales, la radiación solar será transmitida por el intercambiador de calor.



- Hacer clic sobre el pulsador "noche" o "poca radiación". La radiación solar no es suficiente. El campo solar no se activa, por lo tanto no se verá fluido entre las tuberías del campo solar y el tanque de sales. El almacenamiento sustituye al campo solar, se podrá ver fluido entre el tanque de sales y el bloque de potencia para el objeto de generación de electricidad, siendo la temperatura transmitida por el intercambiador de calor.

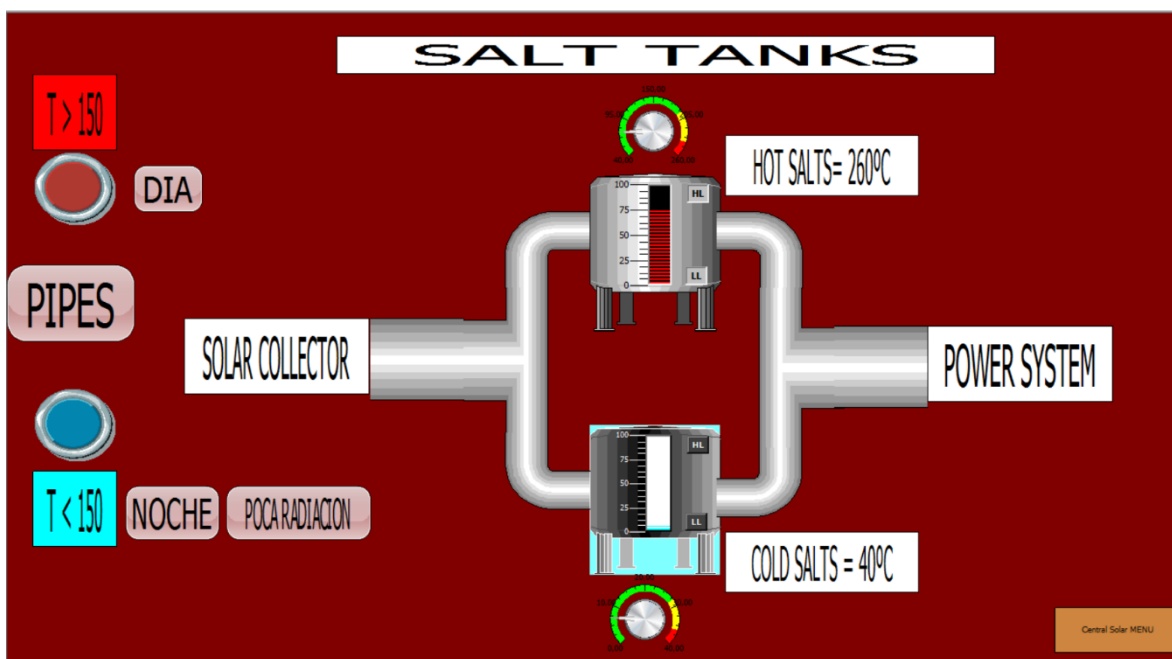


FIGURA 24 < PANTALLA DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO >

8- ALARMAS

Las alarmas son fundamentales en cualquier proyecto de supervisión, para además un control de estadísticas.

Se pueden asociar alarmas a variables:

- Digitales. Por activación y desactivación de variables
- Analógicas. Por nivel ascendente o descendente y por un rango donde puede encontrarse las variables a analizar.

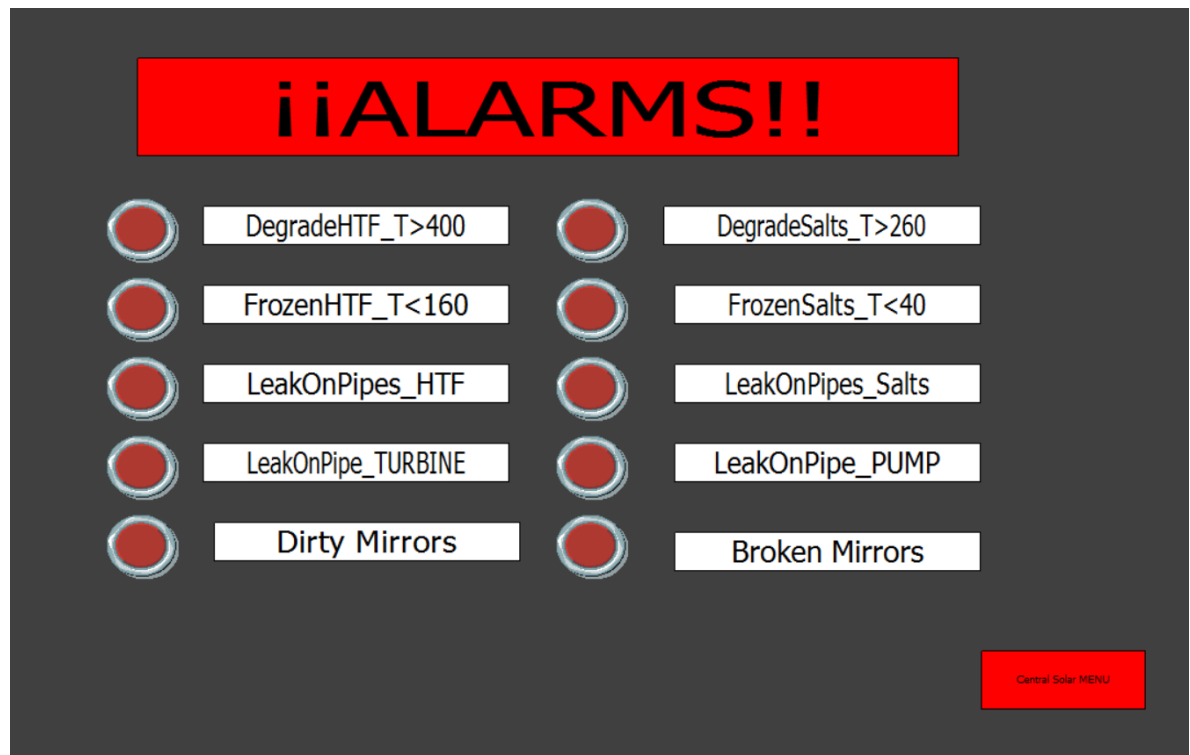


FIGURA 25 <PANTALLA QUE MUESTRA LAS ALARMAS ANALIZADAS EN EL SISTEMA DE SIMULACIÓN >

Siendo:

“*Degrade HTF*”: Salta la alarma cuando el HTF supera los 400°C, pudiendo ocasionarse su degradación.

“*Degrade Salts*”: Salta la alarma cuando las sales podrían llegar a degradar superando los 260 °C.

“*Frozen HTF*”: Salta la alarma cuando el HTF tiene una temperatura inferior a 150°C, ocasionando su solidificación.

“*Frozen Salts*”: Salta la alarma cuando las sales tienen una temperatura inferior a 40°C, ocasionando su solidificación.

“*Leak on pipes HTF*”: Fuga en las tuberías del HTF. En las tuberías que almacenan el HTF, podría haber una fuga por altas temperaturas, altas presiones, raja en las tuberías...ocasionando un incendio.



“Leak on pipes Salts”: Fuga en las tuberías de las sales. En las tuberías que almacenan las sales, podría haber una fuga por altas presiones, raja en tuberías...

“Dirty Mirrors”: Cuando los espejos de los colectores están sucios. La limpieza de los espejos de los colectores es importante, ya que deben siempre encontrarse limpios para tener una reflectancia lo más alta posible. A menor reflectancia, mayor es el porcentaje de error en la captación de radiación solar, pues el colector no capta tanta energía como energía solar hay.

“Broken Mirrors”: Debido a cambios bruscos de temperatura, o uso de los espejos, se podrían producir roturas en los espejos.

Las alarmas originadas por variables analógicas o digitales, nos redirigirán a la pantalla principal de las alarmas como muestra la FIGURA 25. Y se activa la alarma correspondiente con el problema que ha surgido al analizar las diferentes variables a visualizar.

5.11 Problemas y Soluciones

En las alarmas analizadas se han nombrado cada uno de los problemas típicos o más problemáticos de una planta Termosolar.

- Para la degradación se tenía un fluido que permitía menos temperatura, su solución ha sido obtener el HTF con un compuesto que aguantan altas temperatura y si suben a temperaturas inferiores a 400°C no permitírsele poniendo una alarma y producir el desenfoco del colector inmediato.
- Para la degradación de las sales, su solución es encender una alarma y desactivar el intercambiador de calor inmediato.
- Para la solidificación tanto del aceite térmico como de las sales, su solución es mantenerlos en movimiento a ambos sistemas para que la planta no pare y así evitar la solidificación al estar sin un movimiento continuo.
- El aceite mineral es un fluido combustible que genera los riesgos asociados a él y por este motivo proporciona una protección de seguridad contra incendios. Para controlar posible incendio, se tiene que utilizar válvulas para cerrar los sistemas, válvulas para evitar la circulación del fluido, originar la parada de válvulas,



- Para las fugas, las tuberías son bloques de material para evitar las rajaduras de ellas. Por altas presiones podrían aparecer, existen reparaciones utilizando empaquetaduras y sellado en las válvulas. Las empaquetaduras tienen una finalidad de estanqueidad.
- La suciedad en los espejos se produce con el polvo, lluvia, necesita un mantenimiento para evitar una suciedad, que haga que la reflectancia sea pequeña. Nuestro interés es una reflectancia alta para poder reflejar la radiación del sol con unas mínimas pérdidas.

5.12 *Resultados y conclusiones de este proyecto*

Después de largo tiempo trabajando en el desarrollo de este proyecto, llego a entender las expectativas actuales con los sistemas de energías renovables como una de las grandes esperanzas del futuro para afrontar los años venideros con la certeza de cumplir con la demanda energética mundial.

La energía solar toma ventaja dentro de las varias tecnologías de las energías renovable.

En la actualidad hay decenas de proyectos solares en oferta, en construcción y ante todo, varios proyectos experimentales más ambiciosos en la mejora de los sistemas principales que forman parte de una planta de generación eléctrica aprovechando la radiación solar. Se han hecho grandes avances en la captación de la radiación solar, en los fluidos caloportadores y muy especialmente en los sistemas de almacenamiento térmico, lo que permite que estas instalaciones puedan operar las 24 horas del día.

La instrumentación especializada en el conocimiento de las condiciones meteorológicas y la tecnología GPS permiten con gran precisión hacer un seguimiento controlado del ángulo de incidencia en los colectores cilindros parabólicos de la radiación solar.

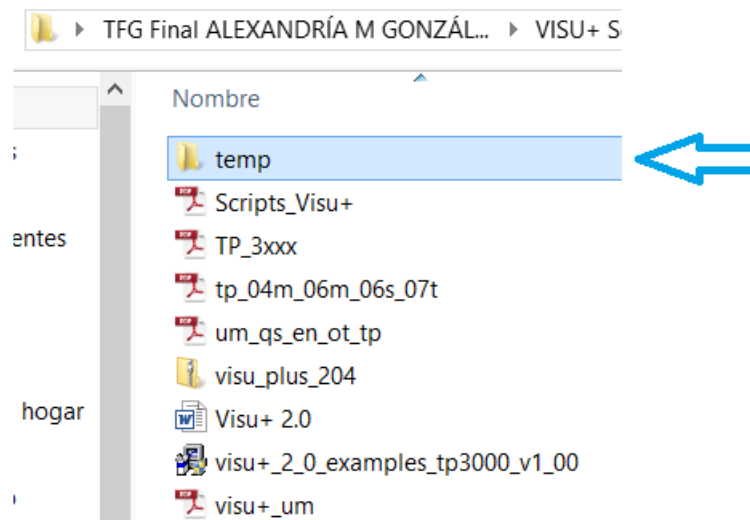
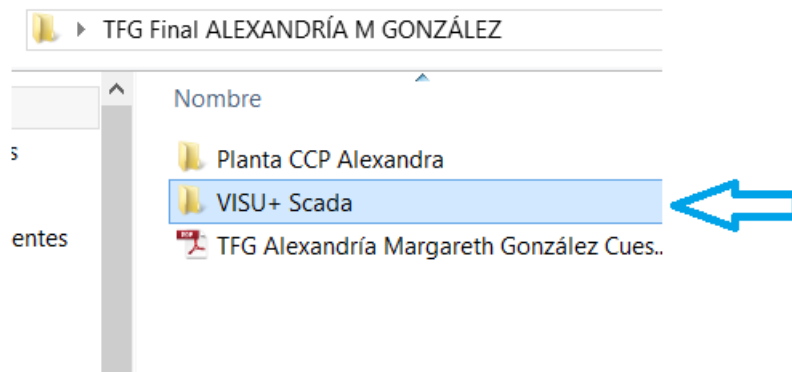


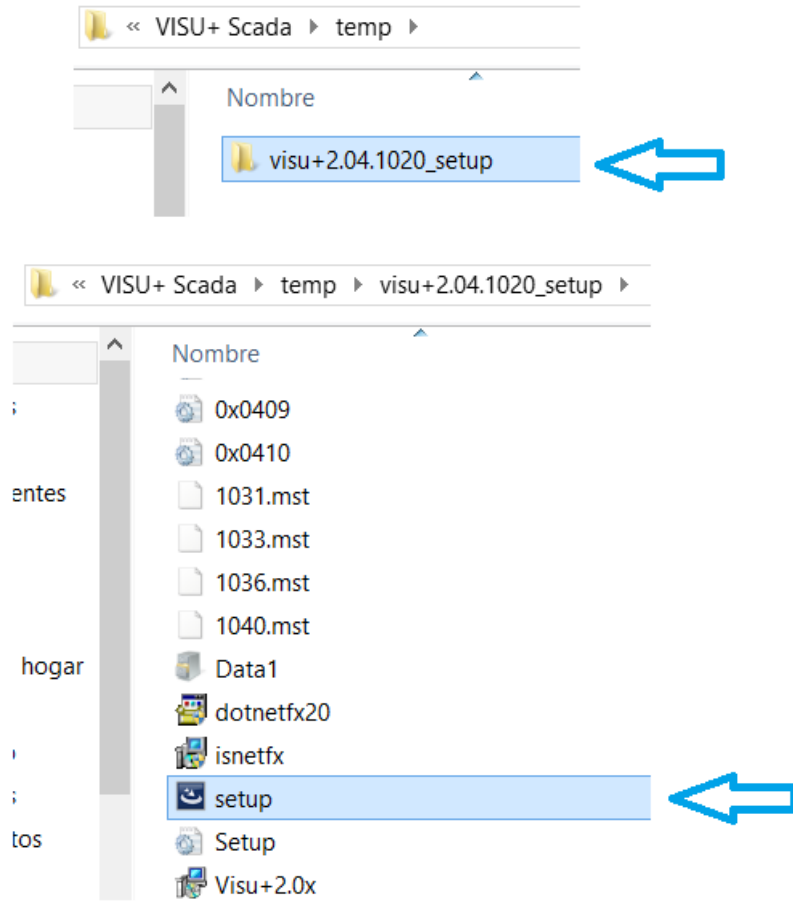
6. MANUAL DE USUARIO


La herramienta utilizada es el software SCADA llamado Visu+.

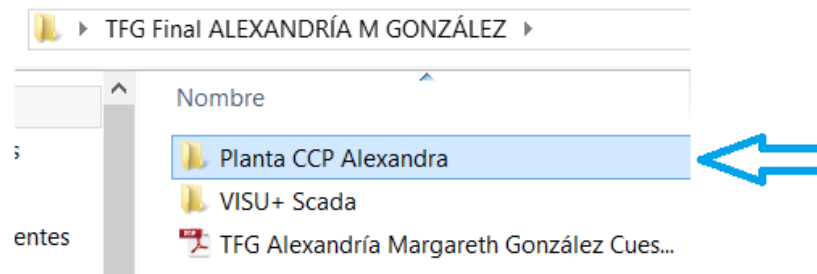
Para poder utilizar este programa se harán los siguientes pasos:

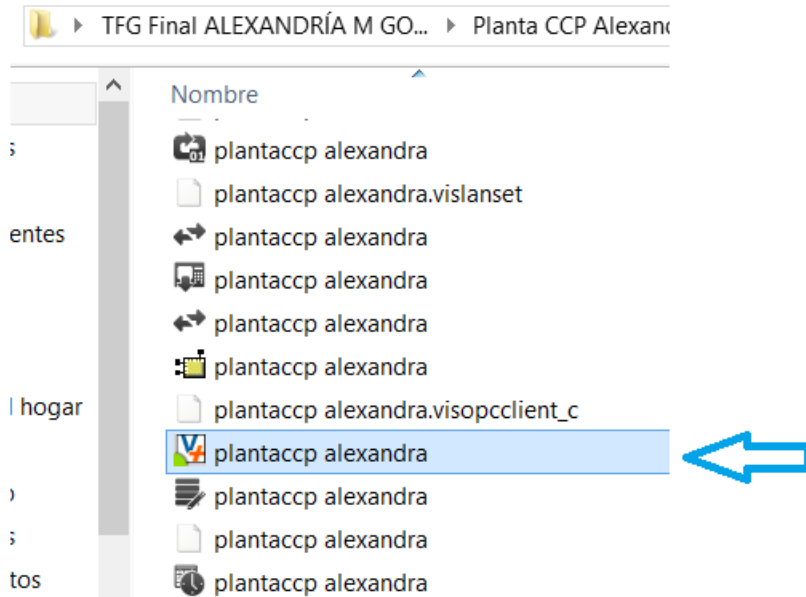
1. Instalar el ejecutable. En primer lugar al introducir el CD en la computadora, nos encontraremos la carpeta llamada "TFG Final ALEXANDRÍA M GONZÁLEZ". Entramos en ella siguiendo estas direcciones TFG Final ALEXANDRÍA M GONZÁLEZ → Visu + SCADA → temp → visu+2.04.1020_setup → setup





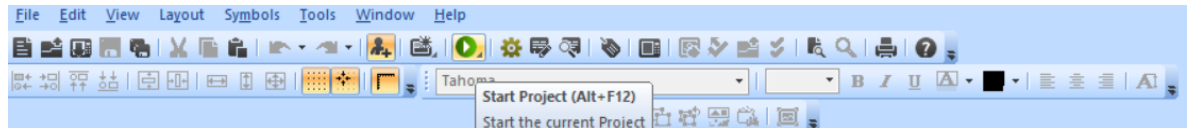
2. Ejecutar el programa. Una vez ejecutado el programa, entraremos en la carpeta llamada "Planta CCP Alexandra", y entramos en ella siguiendo estas direcciones Plantc  plantaccp alexandra





3. Comenzar el proyecto. Para arrancar el proyecto "Start", tendremos que pulsar 

En la barra de herramientas que se ve en la pantalla una vez que se ejecuta el programa, pulsamos al botón "Start Project".



4. Se encuentra la pantalla principal "Main Screen". Teniendo dos opciones:

"STOP" o "START". Clickar donde aparece este símbolo  .



5. En la siguiente pantalla "Central Solar Menu" encontraremos diferentes rectángulos de color azul, que son pulsadores, concretamente los sistemas que componen una planta Termosolar. En este caso pulsamos a :



6. En la pantalla de "General Solar Plant" encontramos tres pulsadores:



Se puede pulsar UNO de los tres. Ya que si se pulsan "day" y "night", actuaría como si funcionasen los sistemas tanto de noche como de día.



- Una vez pulsado uno de los tres pulsadores anteriores, en algunos sistemas que aparecen en la pantalla "Central Solar Menu", si nos metemos en ello podremos ver algunos leds activados.
- Las pantallas tanto "Control System", como "Salt Tanks". Son pantallas en las que se tienen que mover los gauges (Ver FIGURA 26) y ver como varían las variables analizadas con una temperatura de los colectores entre $150 < T < 400$ y la animación de la pantalla de las sales, una vez entendido el sistema.
Además se pueden ver las tuberías interiores en el sistema de sales, que dependen de las tres variables iniciales: "DAY", "NIGHT", "NotEnoughTemp".

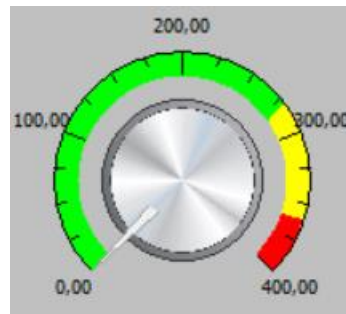
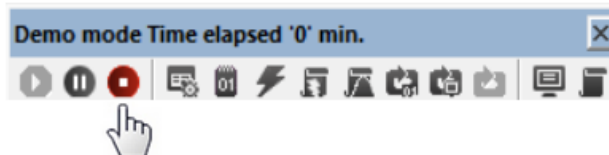


FIGURA 26 < EJEMPLO DE GAUGE >

- Al variar los diferentes gauges, podemos encontrar algunas alarmas. Cuando haya alguna alarma nos dirigirá a la pantalla de alarmas ("ALARMS") y si queremos salir de esa pantalla, entonces pulsar :



- Para salir del programa. Encontramos arriba en la pantalla donde nos encontremos esta barra y se deberá pulsar el símbolo .





7. PRESUPUESTO

Coste de los materiales.



En este apartado se engloba el precio del uso de los diversos equipos empleados para desarrollar el presente trabajo, describiendo tanto el precio de la parte hardware como el de la parte software.

◆ Recursos Hardware

Equipos	Unidades	€/Unidad	TOTAL
Toshiba Satellite S50-B-164 I7-5500U/8GB/1TB/R7M260/15.6" – Portátil 	1	779€	779€
Impresora Canon MG4250 	1	80,50€	80,50€
TOTAL			859,50€



◆ Recursos software

Software	Unidades	€/Unidad	TOTAL
Microsoft Office "Office Hogar y Estudiantes 2013" 	1	119€	119€
Demo Visu + 	1	0€	0€
TOTAL			119€


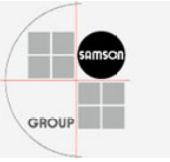



Coste del Personal

Trabajador	Nº (1ects=25horas)	Horas	€/hora	TOTAL
Ingeniero Industrial "junior"		300	10€	3000€
TOTAL				3000€



Coste de Transporte

Costes derivados a traslados para la información de aspectos relacionados con el presente Proyecto.

Viaje	€/viaje	Viajes	TOTAL
SENER (prácticas externas) 	7€	100	700€
SAMSON (prácticas externas extracurriculares) 	4€	75	300€
Reunión RENOVATEC 	10€	2	20€
Reunión SIGEVAL 	8€	2	16€
Reunión Sacyr 	10€	2	20€
TOTAL			1056€



Coste impresión del Proyecto

En este apartado se tiene en cuenta el costo que supone el proyecto impreso en la imprenta de la UAH.

Material	Unidades	€/Unidad	TOTAL
Tomo 	3	45€	135€
Tapa y encuadernación	3	1,60€	4,80€
TOTAL			139,80€

RESUMEN DEL COSTE DEL CONJUNTO

Coste de los materiales	
- Hardware	859,50€
- Software	119€
Coste del personal	3000€
Coste de transporte	1056€
Coste impresión del Proyecto	139,80€
TOTAL	5174,30€



8. BIBLIOGRAFÍA

Proyecto Fin Carrera Javier Pastoriza Redondo

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4951/fichero/MEMORIA+PROYECTO%252F MEMORIA+PROYECTO.pdf> (MARZO 2014)

Máster en Sistemas de Energía Térmica

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70221/fichero/4+Análisis+de+las+Tecnolog %EDas+Termosolares.pdf> (MARZO 2014)

http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xii.-las-centrales-solares (MARZO 2014)

GUIA BASICA DE PLANTAS TERMOSOLARES

<http://www.slideshare.net/joseullan/termosolar-5782625> (ÚLTIMA VISITA ABRIL 2014)

http://www.slideshare.net/SETLAXCALA/iiesenerconacyt?src=related_normal&rel=5782625 (ÚLTIMA VISITA ABRIL 2014)

<http://www.protermosolar.com/boletines/36/a06.html> (ÚLTIMA VISITA ABRIL 2014)

http://www.opex-energy.com/termosolares/centrales_termosolares.html (ÚLTIMA VISITA JULIO 2014)

<http://www.karlrainerbirk.com/SPA.html> (ÚLTIMA VISITA JULIO 2014)

http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es#page5 (ÚLTIMA VISITA JULIO 2014)

http://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/ap03_fuentes_de_energia.php (ÚLTIMA VISITA SEPTIEMBRE 2014)

SITUACIÓN EN EL MUNDO DE LA ENERGÍA SOLAR TERMOELÉCTRICA

<http://www.fundacionenergia.es/pdfs/Solar%20termo%20elctrica%201009/Situaci%C3%B3n%20mundial%20termosolar%20291009.pdf> (ÚLTIMA VISITA DICIEMBRE 2014)



ARTÍCULOS DE PLANTAS TERMOSOLARES

<http://www.centrales termosolares.com/centrales-de-c-cilindro-parabolico> (ÚLTIMA VISITA ENERO 2015)

PROYECTO FIN DE CARRERA DE Hugo Joga López

http://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/16575/PFC_Hugo_Joga_Lopez.pdf?sequence=1 (ÚLTIMA VISITA ENERO 2015)

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR TERMOELÉCTRICA

http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e12_termoelectrica_A fd47d41f.pdf (ÚLTIMA VISITA ENERO 2015)

ENERGÍA TERMOELÉCTRICA

<http://html.rincondelvago.com/energia-solar-termoelectrica.html> (ÚLTIMA VISITA ENERO 2015)

NECESIDAD DE LOS TANQUES DE EXPANSIÓN

<http://www.sistemahtf.com/index.php/los-tanques-de-expansion> (ÚLTIMA VISITA FEBRERO 2015)

ENERGÍA SOLAR INCIDENTE

http://www.academia.edu/7975620/DIMENSIONAMIENTO_DE_COLECTORES_CILINDRICO_PARABOLICOS_DE_UNA_PLANTA_SOLAR_TERMICA Presentado por (JUNIO 2015)

CARACTERÍSTICAS DEL VISU+

<https://www.depeca.uah.es/depeca/docencia/alumnos.php?codigo=201449> (ÚLTIMA VISITA JUNIO 2015)

EL CAMPO SOLAR

http://www.ronda-hightech.com/it?page_id=25&lang=es (JULIO 2015)

ÁNGULOS SOL-CONCENTRADOR

http://www.inapi.cl/portal/institucional/600/articles-992_recurso_1.pdf (JULIO 2015)

