



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UNA PLANTA  
TERMOSOLAR CON  
ALMACENAMIENTO TÉRMICO A TRAVÉS DEL PROGRAMA  
SYSTEM ADVISOR MODEL.**

Autor: D. Miguel Crespo Calvo  
Tutor: D. Miriam Reyes Serrano

Valladolid, septiembre, 2021

Diseño, dimensionamiento y simulación de una planta termosolar con  
almacenamiento térmico a través del programa System Advisor Model.



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO Y SIMULACIÓN DE UNA PLANTA  
TERMOSOLAR CON  
ALMACENAMIENTO TÉRMICO A TRAVÉS DEL PROGRAMA  
SYSTEM ADVISOR MODEL.**

Autor: D. Miguel Crespo Calvo  
Tutor: D. Miriam Reyes Serrano

Valladolid, septiembre, 2021

## RESUMEN

La creciente preocupación por el cuidado del planeta ha llevado a los países del mundo a explorar diferentes vías para reducir las principales fuentes contaminantes. Entre ellas, la fuerte dependencia de los combustibles fósiles para la obtención de energía presenta un problema para el cual se buscan alternativas como las energías renovables que presentan grandes perspectivas de futuro, pero aún cuentan con una amplia capacidad de desarrollo. Dentro del panorama nacional, una de las energías con mayor importancia es la energía solar térmica concentrada que si bien resulta adecuada en aspectos climatológicos presenta desafíos relacionados almacenamiento para satisfacer las demandas de consumo.

En el presente Trabajo de Fin de Máster se ha elaborado una modelización con el software System Advisor Model (SAM) de una central de concentración solar con cilindros parabólicos introduciendo los parámetros disponibles de la planta Andasol 1 para ver la influencia de variables relacionadas con el almacenamiento y el tamaño de la central. Por medio de diferentes simulaciones se determinará el fluido de transferencia de calor óptimo para almacenar la energía. A mayores, se realizará una optimización del tamaño de la planta con el múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento. Estas optimizaciones se han realizado analizando el levelized cost of energy (LCOE) que aporta el coste de producción de energía de la planta diseñada.

*Palabras clave:* Energía solar térmica concentrada, almacenamiento, SAM, fluido de transferencia de calor, múltiplo solar, capacidad de almacenamiento y LCOE.

## ABSTRACT

The growing concern for the care of the planet has led the countries of the world to explore different ways to reduce the main polluting sources. Among them, the strong dependence on fossil fuels for obtaining energy presents a problem for which alternatives are being sought, such as renewable energies, which have great prospects for the future, but still have a wide development capacity. Within the national panorama, one of the most important energies is concentrated solar thermal energy which, although it is suitable for climatic aspects, presents challenges related to storage in order to satisfy consumption demands.

In this Master's Thesis, a modelling of a concentrating solar power plant with parabolic troughs has been developed using SAM software, introducing the available parameters of the Andasol 1 plant to see the influence of variables related to storage and the size of the plant. By means of different simulations, the optimal heat transfer fluid for energy storage will be determined. Furthermore, an optimisation of the plant size with the solar multiple and the storage capacity will be carried out. These optimisations have been carried out by analysing the LCOE (levelized cost of energy) which provides the cost of energy production of the designed plant.

*Keywords:* Concentrated solar thermal energy, storage, SAM, heat transfer fluid, solar multiple, storage capacity and LCOE.



## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Motivación y antecedentes.....	1
1.2.	Objetivos.....	1
1.3.	Estructura.....	2
2.	ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1.	Introducción a la energía solar .....	3
2.1.1.	Energía solar fotovoltaica .....	6
2.1.2.	Energía solar térmica.....	8
2.2.	Energía solar térmica concentrada .....	10
2.2.1.	Cilindro parabólico.....	11
2.2.2.	Fresnel .....	13
2.2.3.	Torre Central.....	14
2.2.4.	Disco parabólico.....	15
2.3.	Aplicaciones.....	16
2.3.1.	Uso doméstico.....	17
2.3.2.	Industria .....	19
2.3.3.	Energía eléctrica.....	21
2.4.	Almacenamiento.....	21
2.4.1.	Introducción .....	22
2.4.2.	Tipos .....	23
3.	MODELADO .....	29
3.1.	Introducción .....	29
3.2.	Ubicación y recursos .....	29
3.3.	Diseño del sistema.....	31
3.4.	Campo solar .....	33
3.5.	Colectores .....	35
3.6.	Receptores.....	37
3.7.	Ciclo de potencia.....	38
3.8.	Almacenamiento térmico.....	39
3.9.	Sistema de costes.....	40
3.10.	Metodología.....	41
3.10.1.	Introducción .....	41
3.10.2.	Fluido de transferencia de calor de almacenamiento .....	41
3.10.3.	Capacidad de almacenamiento.....	42
3.10.4.	Múltiplo Solar .....	42

3.10.5. LCOE.....	43
3.10.6. Procedimiento .....	44
4. RESULTADOS .....	45
4.1. Efecto del fluido caloportador de almacenamiento.....	45
4.2. Optimización de la capacidad de almacenamiento y el múltiplo solar .....	49
4.3. Optimización de la producción y el múltiplo solar .....	51
5. CONCLUSIONES .....	53
5.1. Conclusiones generales.....	53
5.2. Conclusiones específicas .....	54
5.2.1. Selección del fluido de almacenamiento .....	54
5.2.2. Optimización del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento .....	54
5.2.3. Optimización de la producción y el múltiplo solar .....	54
5.3. Líneas futuras .....	55
6. REFERENCIAS .....	57

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Tipos de almacenamiento.....	13
Tabla 2. Beneficios del almacenamiento térmico. ....	23
Tabla 3.Principales características de los materiales de almacenamiento de calor sensible. [43] .....	25
Tabla 4. Características de las potenciales sustancias para almacenamiento de calor latente.[43] .....	25
Tabla 5. Parámetros de los principales colectores cilindro parabólicos [51].....	36
Tabla 6. Propiedades de los HTF de almacenamiento.....	41
Tabla 7. LCOE (€/kWh) para los diferentes fluidos.....	45
Tabla 8. Parámetros de almacenamiento de cada fluido.....	46
Tabla 9. Producción anual.....	47
Tabla 10. Protección del sistema de almacenamiento contra congelación. ....	48
Tabla 11. LCOE (€/kWh) variando Horas de almacenamiento y Múltiplo solar .....	49
Tabla 12. Producción anual (GWh-e).....	50
Tabla 13. Resultados de la planta diseñada. ....	50
Tabla 14. Desglose de costes de la planta.....	51

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Industria .....	3
Figura 2. Formas de conversión de la energía solar [2].....	4
Figura 3. Energía fotovoltaica [4] .....	5
Figura 4. Energía solar térmica [7].....	6
Figura 5. Evolución de la energía solar fotovoltaica [10] .....	7
Figura 6. Partes placa fotovoltaica [11].....	7
Figura 7. Producción energía solar térmica en España [12] .....	9
Figura 8. Esquema instalación solar para agua caliente sanitaria [15].....	9
Figura 9. Distribución de una planta solar térmica con cilindros parabólicos [16] .....	10
Figura 10. Tecnologías CSP [20] .....	11
Figura 11. Cilindros parabólicos [22].....	11
Figura 12. Planta solar térmica de cilindros parabólicos [23] .....	12
Figura 13. Elemento colector de calor [25] .....	12
Figura 14. Tecnología Fresnel [29] .....	14
Figura 15. Tecnología torre central [29].....	15
Figura 16. Tecnología disco parabólico [29] .....	16
Figura 17. Aplicaciones energía solar térmica. Elaboración propia en base a [29] .....	17
Figura 18. Instalación ACS [33] .....	18
Figura 19. Esquema sistema de calefacción [34] .....	18
Figura 20. Esquema climatización de piscina [35] .....	19
Figura 21. Esquema máquina de refrigeración [36] .....	19
Figura 22. Esquema integración de energía solar térmica en un proceso industrial [37].....	20
Figura 23. Evolución de la integración de sistemas TES en centrales [38].....	22
Figura 24. Evolución de la capacidad de almacenamiento [38] .....	22
Figura 25. Funcionamiento del almacenamiento a lo largo del día [19] .....	23
Figura 26. Esquema del almacenamiento de energía térmica mediante reacciones reversibles [43] .....	26
Figura 27. Tipos de almacenamiento. Elaboración propia en base a [45].....	27
Figura 28. Esquema simplificado del sistema de almacenamiento de dos tanques [27] .....	27
Figura 29. Esquema acumulador de vapor [27] .....	28
Figura 30. Ubicación Central solar térmica Andasol 1 [46] .....	29
Figura 31. Mapa de radiación solar de España [47] .....	30
Figura 32. Datos climatológicos ubicación Andasol 1(2019). Elaboración propia con SAM..	31
Figura 33. Diseño del sistema SAM. Elaboración propia con SAM.....	33
Figura 34. Espacio entre hileras [49].....	34
Figura 35. Ficha técnica de las propiedades del fluido Dowtherm A [50].....	34
Figura 36. Entadas y salidas del apartado Campo Solar (SAM).....	35
Figura 37. Colector EuroTrough [52].....	36
Figura 38. Parámetros del colector (SAM).....	37
Figura 39.Receptor Solel UVAC [54] .....	38
Figura 40. Parámetros del colector (SAM).....	38
Figura 41. Parámetros ciclo de potencia (SAM) .....	39
Figura 42. Esquema central solar térmica con almacenamiento [55].....	40
Figura 43. Parámetros almacenamiento térmico (SAM) .....	40
Figura 44. Parámetros sistema de costes (SAM) .....	41
Figura 45. Gráfica múltiplo solar [56].....	43



Figura 46. Gráfico LCOE con y sin almacenamiento .....	45
Figura 47. Gráfico LCOE para cada fluido de almacenamiento .....	46
Figura 48. Comparación de la producción anual de cada fluido con respecto al caso sin almacenamiento.....	47
Figura 49. Comparación de la producción anual de cada fluido .....	47
Ilustración 50. Necesidades de protección frente a congelación de cada fluido .....	48
Figura 51. Variación del LCOE en función del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento.....	49
Figura 52. Variación de la producción anual en función del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento.....	50
Figura 53. Gráfica LCOE y producción anual .....	52

## **NOMECLATURA**

CSP: Concentrating solar power

SAM: System Advisor Model

LCOE: Levelized cost of energy

HTF: Heat transfer fluid

TES: Thermal storage system

LHS: Almacenamiento de calor latente

CT: Torre central

PT: Parabolic trough

SPT: Torre de energía solar

PTC: Colector cilindro-parabólico

LFR: Reflector lineal de Fresnel

PDC: Disco parabólico

SCA: Conjunto de colectores solares

HCE: Colector de calor

DNI: Radiación directa normal

SM: Solar multiple

CdTe: Teluro de Cadmio

ACS: Agua caliente sanitaria

J: Julios

W: Watios

kW: kilowatios

GW: Gigawatios

MW: Megawatios

kWe: kilowatios eléctricos

GWe: Gigawatios eléctricos

MWe: Megawatios eléctricos

kWh: Kilowatios hora

GWh: Gigawatios hora

MWh: Megawatios hora

°C: Celsius

Bar: Bares

h: Horas

t: Tiempo

T: Temperatura

$T_l$ : Temperatura del líquido

$T_m$ : Temperatura de fusión

$T_s$ : Temperatura del sólido

Q: Calor intercambiado

m: Masa

$C_p$ : Calor específico

$C_{p_s}$ : Calor específico medio de la fase sólida

$C_{p_l}$ : Calor específico medio de la fase líquida

$\Delta T$ : Incremento de temperatura

h: Entalpía

w: Apertura del colector

$L_{spacing}$ : Distancia entre colectores

Inv: Inversión inicial

Mt: Mantenimiento previsto para el año t

TIR: Tasa Interna de Retorno o tasa de descuento

$E_t$ : Energía generada durante ese año

n: Vida útil de la planta

€: Euros

M€: Millones de euros



## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Motivación y antecedentes

La evolución del ser humano se ha traducido en un incremento del consumo energético que tradicionalmente se ha cubierto con fuentes de energía consistentes en combustibles fósiles. Con ello, las emisiones de gases contaminantes se han convertido en un problema, entre otras cosas, por el aumento de temperatura en el planeta a causa del efecto invernadero. Por lo tanto, se hace necesario el reducir estos efectos nocivos de los combustibles fósiles y para ello las fuentes de energía renovables ofrecen una alternativa interesante en favor del cuidado del planeta.

La producción de energía eléctrica por medio del aprovechamiento de la radiación solar aparece como una opción con gran futuro para disminuir la dependencia de energías contaminantes. En concreto, la tecnología de aprovechamiento consistente en la concentración solar (CSP) debido a las características climatológicas de España puede aportar una gran cantidad de la energía necesaria para cumplir las exigencias de consumo. A pesar de ello, existe un amplio campo de mejora para lograr que estas tecnologías resulten competitivas en el mercado y de esta manera se aumente su elección como forma de obtención de energía. Entre estas mejoras que se pueden realizar se encuentra la optimización de procesos de fabricación de componentes, rendimiento de planta, disminuir costes de operación, investigación de fluidos de transferencia de calor y por último optimizar el almacenamiento de las plantas.

Con todo ello, este Trabajo Fin de Máster surge como una propuesta para utilizar un modelo de simulación de procesos energéticos, libre, que nunca antes ha sido utilizado en el Dpto. de Ingeniería Energética, incluso valorar su utilidad para realizar trabajos prácticos en la asignatura de TENE del Máster en II, de la Universidad de Valladolid. Para poder realizar estas simulaciones se empleará el programa *System Advisor Model* (SAM) que permite diseñar instalaciones de energía fotovoltaica, eólica, marina, de concentración solar y biomasa entre otras. Este software permite el diseño de plantas de generación de las anteriores energías con las que se pueden obtener datos relacionados con la producción de energía, y, de forma muy eficaz, aspectos relativos a los costes de la planta que permiten discernir las opciones más competitivas.

La modelización y simulación de plantas con diferentes tecnologías aporta una visión tanto de los beneficios como de los inconvenientes de su construcción. Por lo tanto, el saber los problemas que presenta cada tecnología da una idea de cuáles son sus futuras vías de desarrollo para mejorar dicha fuente de energía.

### 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster consiste en diseñar y simular una planta de generación de energía eléctrica por concentración de energía solar, basada en cilindros parabólicos con un sistema de almacenamiento haciendo uso del software SAM.

Para conseguir este objetivo principal, a lo largo del presente trabajo se pretende lograr unos objetivos secundarios que permitan ver la relevancia de diferentes factores en las plantas de concentración solar. A continuación, se pueden ver dichos objetivos:

- Revisar y entender el funcionamiento de una planta solar de concentración con cilindros parabólicos, para posteriormente poder diseñarla.

- Analizar la influencia de los diferentes fluidos de almacenamiento, así como la capacidad almacenamiento y el múltiplo solar de la planta.
- Optimizar las variables descritas anteriormente para obtener un menor coste de producción de la energía en la planta diseñada.

### 1.3. Estructura

A lo largo del presente trabajo se ha seguido una serie de pasos dotando al trabajo de una estructura en la que son fácilmente diferenciables las siguientes partes.

En primer lugar, se ha realizado una revisión bibliográfica de las diferentes formas de aprovechamiento de la energía solar. A continuación, se llevó a cabo una búsqueda más exhaustiva de la tecnología de concentración solar describiendo los sistemas más desarrollados en la actualidad, así como las aplicaciones y el estado del arte del almacenamiento empleado en este tipo de energía.

Después, se ha llevado a cabo la descripción del modelado de la central de concentración de cilindros parabólicos tipo a partir de la cual se realiza el estudio paramétrico de las variables fluido de almacenamiento, múltiplo solar y capacidad de almacenamiento. Una vez modelada la planta se va a presentar la metodología seguida para realizar las simulaciones y recoger los datos de interés.

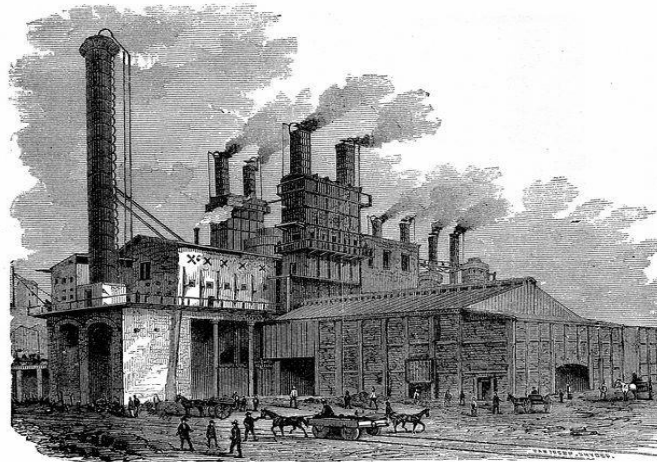
Con todo lo anterior, se procede a exponer los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas. Dichos resultados se van a encuadrar en diferentes apartados relacionados con la influencia del fluido caloportador de almacenamiento y las optimizaciones de la capacidad de almacenamiento, el múltiplo solar y la producción.

Por último, completando los comentarios presentes en el apartado anterior se van a presentar distintas conclusiones obtenidas a partir de los resultados de las simulaciones. A mayores, se facilitarán líneas futuras tanto relacionadas con diferentes alternativas del estudio realizado como las distintas vías de desarrollo para una mayor competitividad de la energía solar térmica de concentración.

## 2. ESTADO DEL ARTE

La capacidad del ser humano para aprovechar la energía se extiende largo tiempo atrás. Si embargo, el desarrollo de este aprovechamiento se ha acrecentado en los últimos años.

A partir de la revolución industrial, y en sintonía con la evolución social, aspectos como la energía cogió fuerza a la hora de ser considerado como un factor a tener en cuenta el nivel de desarrollo de un país. Con ello, las energías no renovables derivadas de los combustibles fósiles adquieren un papel fundamental en la sociedad resultando necesaria una disponibilidad constante de los mismos. A partir de este momento, las exigencias de bienes industriales se incrementan y con ello las demandas de energía.



*Figura 1. Industria*

El agotamiento de estos recursos fósiles y la gran contaminación que estos producen provocó nuevas vías de obtención de energía. Por ello, a inicios de los años sesenta se empiezan a desarrollar las tecnologías solares. Sin embargo, la evolución de estas tecnologías sufrió un parón a inicios del siglo XX causado por un aumento de disponibilidad y una disminución del precio de estos recursos fósiles. No fue hasta 1980 cuando la energía solar recobró protagonismo derivado por una transformación en la gestión energética de la amplia mayoría de países. El crecimiento de la energía eléctrica se vio favorecido por la creación de fuertes programas que fomentaban su desarrollo en países importantes como Estados Unidos o Japón. A continuación, se incrementaron las labores de investigación en este tipo de energía en Alemania, Japón y Estados Unidos, pero volvieron a sufrir un estancamiento al abarataarse el precio del petróleo en 1980. Hoy en día de acuerdo con el protocolo de Kioto y la preocupación del cambio climático la energía solar, y en especial la energía fotovoltaica, ha evolucionado de forma considerable [1].

### 2.1. Introducción a la energía solar

La cantidad de energía que consume el ser humano en todo el mundo a lo largo de un año es de alrededor de  $4.6 * 10^{20} J$  [2]. Esta energía es suministrada por el sol en una hora. En consecuencia, se puede afirmar que el sol es una fuente de energía que puede cumplir las exigencias demandas por los seres humanos.

Esta energía solar se puede aprovechar de diferentes formas. Entre ellas, existen tres formas de conversión que sobresaltan por encima del resto: en calor, en combustibles solares y en electricidad.

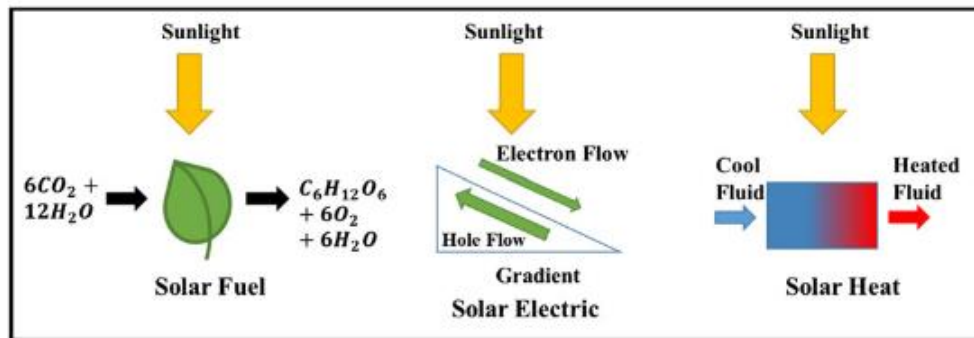


Figura 2. Formas de conversión de la energía solar [2]

### Combustible Solar

En este primer caso, la energía procedente del sol se transforma de manera natural en combustible gracias al proceso de fotosíntesis. En este proceso tanto los protones como los electrones producidos se metabolizan para producir hidrógeno y metano. De esta forma, en torno a un 11% de la energía procedente del sol se emplea para realizar la fotosíntesis natural de la biomasa, constituyendo el mayor uso de la energía solar. En cambio, únicamente 100Twh de esta energía se convierte en fotosíntesis lo cual resulta escaso para las exigencias energéticas de los seres humanos. A pesar de esto existen vías para incrementar la eficiencia de la producción de combustible solar. Entre ellas, cabe destacar:

- La manipulación del crecimiento por medio de la ingeniería genética para aumentar el crecimiento de las plantas y favorecer la producción de biomasa.
- La producción de combustible a partir de agua y dióxido de carbono mediante conjuntos artificiales a nanoescala.

El almacenamiento de esta energía se encuentra en los enlaces químicos y atiende a las leyes de la termodinámica. Por ello, la energía de cada fotón absorbido no se puede aprovechar de forma completa [2].

### Energía solar fotovoltaica

Otra forma de aprovechar la energía solar consiste en convertir esta en electricidad por medio de células fotovoltaicas. Estas células se componen de semiconductores que son capaces de crear corriente continua al ser iluminados por un haz de fotones. Para que la célula genere potencia eléctrica es necesario que sobre esta incida la luz solar [3].





Figura 3. Energía fotovoltaica [4]

Los paneles fotovoltaicos se encuentran en instalaciones con una vida útil de alrededor de 30 años. Estos paneles se fabrican con diferentes materiales que le aportan una eficiencia determinada [5].

- Silicio: tecnología cristalina (monocristalino: 16%-20% de eficiencia y policristalino: 12%-14% de eficiencia) y Capa delgada de silicio (así y  $\mu\text{Si}$ : 8%-12% de eficiencia)
- Capas delgadas de nuevos materiales: telurio de Cadmio (CdTe) y diseleniuro de indio-cobre (eficiencias elevadas ~18%).
- Otros: Células: multiunión (Arseniuros de Indio Galio) y Orgánicas.

#### Energía solar térmica.

Dentro de las formas de aprovechamiento de la energía proveniente del sol, se encuentra la energía solar térmica. Con este tipo de energía se capta la radiación del sol para transformarla en calor y poder emplearla en diferentes aplicaciones. Para poder convertir esta radiación solar en calor se utilizan elementos llamados colectores solares. Estos colectores captan la energía proveniente de la radiación solar y la usan para incrementar la temperatura de un fluido [6]. Estos colectores se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- Colector de baja temperatura ( $35^{\circ}\text{C}$  -  $60^{\circ}\text{C}$ ). Se emplean para proporcionar agua caliente sanitaria (ACS) y para el secado de productos agropecuario.
- Colector de media temperatura (hasta  $300^{\circ}\text{C}$ ). Este tipo de colectores se caracteriza por ser utilizado para secado alimentos y madera.
- Colectores de alta temperatura. Los colectores de alta temperatura son capaces de alcanzar temperaturas de hasta  $2000^{\circ}\text{C}$ .



Figura 4. Energía solar térmica [7]

### 2.1.1. Energía solar fotovoltaica

#### 2.1.1.1. Antecedentes

La transformación de la luz proveniente del sol en energía eléctrica se denomina efecto fotovoltaico y fue descubierto por Edmund Becquerel en 1839 cuando realizaba experimentos con una célula electrolítica. Con ello, este científico puso de manifiesto que determinados materiales producen una corriente eléctrica al estar expuestos a la luz. En este campo, hasta 1900 se produjeron avances como la creación del primer módulo fotoeléctrico consistente en un soporte metálico y una capa de selenio. A continuación, Einstein escribió la teoría del efecto fotoeléctrico que posteriormente fue demostrada por Milikan. Otro hecho fundamental en la energía fotovoltaica surgió en 1954 cuando los Laboratorios Bell fabricaron la primera célula fotovoltaica. Esta célula sustituía el selenio por el silicio como material principal ya que este tenía la capacidad de proporcionar una eficiencia mayor [8].

Una vez construida esta primera célula fotovoltaica fue Estados Unidos quien encontró diferentes usos de la misma ubicándola en satélites y para la señalización marítima y ferroviaria [9].

Hubo que esperar hasta 1990 para que las células fotovoltaicas se instalan en cantidades considerables. Con este proyecto llevado a cabo en Alemania se instalaron cien mil unidades. Más adelante en Japón, se siguió un programa similar donde se construyeron setenta mil placas.

Hoy en día, la energía fotovoltaica se extiende a más de un centenar de países donde se facilitan incentivos económicos por parte de los gobiernos para la utilización de este tipo de energía.

Como se puede observar en la siguiente imagen la energía fotovoltaica ha sufrido un incremento desde apenas 4 GW hasta 177 GW en 2014. Este incremento se ve relacionado con el desarrollo tecnológico en la fabricación que se ha traducido en un menor coste de la energía incrementando su atractivo en el mercado.

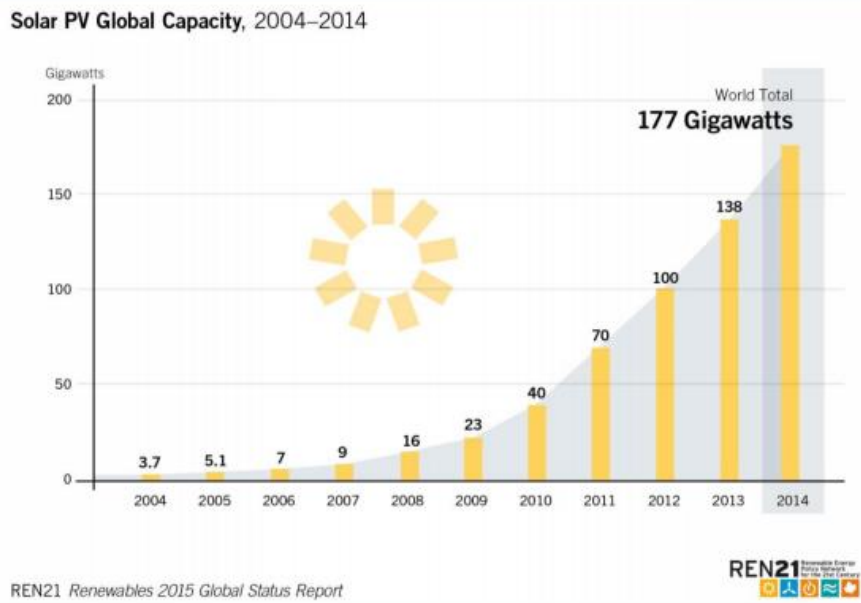


Figura 5. Evolución de la energía solar fotovoltaica [10]

### 2.1.1.2. Funcionamiento

Las células fotovoltaicas son las encargadas de convertir la luz solar en electricidad. Para ello, estas se construyen de un material semiconductor donde se da el efecto fotoeléctrico. La energía de los fotones proveniente de la radiación solar permite romper la energía de enlace de los electrones existentes en el material semiconductor de la célula que en presencia de un campo eléctrico produce corriente eléctrica. Para poder crear el campo eléctrico estas células se disponen para formar dos capas, una tipo p y otra tipo n.

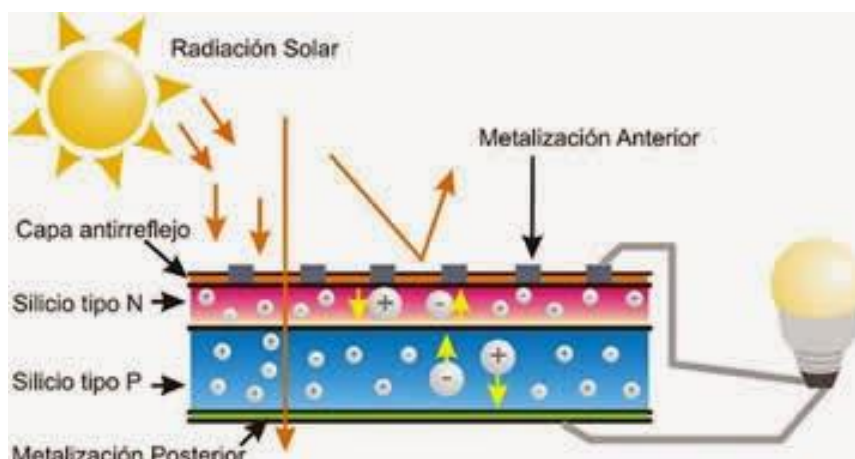


Figura 6. Partes placa fotovoltaica [11]

En las placas fotovoltaicas se añade una capa transparente que actúa como protección frente a las inclemencias meteorológicas. Por otro lado, se suele añadir una capa antirreflejo para incrementar su eficiencia de captación de fotones provenientes de la energía del sol. Cada placa suele proporcionar una tensión de entre doce y cuarenta y ocho voltios por lo que normalmente se suelen disponer un número determinado de estas para poder satisfacer las exigencias preestablecidas. Por último, se convierte esta corriente continua en alterna con un inversor para poder llevarla a la red.

### 2.1.2. Energía solar térmica

#### 2.1.2.1. Antecedentes y situación actual

Uno de los momentos destacados fue en 1911 cuando Frank Schuman creó su empresa Sun Power Co. Con ella construyó su primera planta solar en Tancony, Estados Unidos que producía un total de 20 kW. A continuación, abrió su siguiente planta solar en Maadi, Egipto, en 1912, con reflectores parabólicos que generaban 88 kW [12].

Después de la crisis del petróleo las naciones emprendieron la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles y con ello se produjo el desarrollo de diferentes energías renovables entre las cuales se encuentra la energía solar térmica. Fue también en EE.UU donde las plantas solares térmicas vieron la luz con la construcción de SEGS I y II que después siguieron ampliando. Dichas plantas tenían una potencia que iba desde 29 MWe a 81 MWe.

En España, 45 de las 50 plantas solares construidas utilizan la tecnología del cilindro parabólico (parabolic trough PT), lo que representa el 96,5% de la capacidad instalada en este país. Una de las plantas más representativas en el panorama nacional se encuentra en Guadix (Granada, España) y fue construida por ACS-Cobra. Esta planta incluye un sistema TES indirecto basado en sales fundidas con capacidad para 7,5 h de funcionamiento a plena carga. La empresa estimó una eficiencia del ciclo del 38% y una capacidad de generación de energía neta de 158.000 MWh/año, lo cual implica un factor de capacidad cercano al 36%. Después, entre el 2007 y 2014 el gobierno promueve la energía renovable y con ello haciendo uso del diseño de esta planta se construyen otras 16 (con pequeñas variaciones en términos de capacidad de generación y capacidad de TES), y, además, se proyectan otras 27 que se basaron en el mismo tamaño y configuración, pero sin almacenamiento de energía térmico (thermal energy storage, TES).

Por otro lado, en España también se cuentan con plantas de la tecnología de torre central (CT). El primer proyecto de planta comercial basada en la tecnología CT-CSP (11 MWe) se realizó por la empresa Abengoa Solar en Sanlúcar la Mayor (Sevilla, España) y acarrió un gasto de 35 millones de euros, abriendo sus puertas en 2007. Dicha planta consta de un único receptor que produce vapor saturado a 275 °C, que alimenta a una turbina de vapor para la generación de energía. La baja entalpía del vapor limita la eficiencia del ciclo Rankine al 27%, lo cual influye en la potencia térmica generada. El almacenamiento de la planta tiene una capacidad reducida (1 h) y que consiste en agua sobrecalentada (50 bar y 285 °C) que puede aportar estabilidad en los periodos transitorios, pero resulta escaso para ampliar las horas de funcionamiento equivalentes de la propia planta.

Resultando el almacenamiento de la energía un punto crítico, se buscó la mejora de este haciendo uso de sales fundidas como fluido térmico primario. Empleando por primera vez este fluido nos encontramos la planta comercial Gemasolar de 20 MWe, construida en 2011 por SENER-ACS Cobra en Fuentes de Andalucía (Sevilla, España) con un coste de 230 millones de euros. Las sales fundidas sirven tanto de HTF como de medio de almacenamiento térmico, lo que permite que la planta funcione a temperaturas más altas (565°C) y logre mayores eficiencias del ciclo térmico (40%). Estas características también facilitan la incorporación de un sistema TES directo de gran capacidad (15 h) que permite a la planta alcanzar un factor de capacidad del 63%, excesivamente alto para un lugar con un DNI de sólo 2172 kWh/m<sup>2</sup>/año. Actualmente logran parte de centrales con tecnología CT-CSP usan

agua/vapor como HTF, aunque la utilización de sales fundidas se está abriendo hueco a causa de la eficiencia que estas pueden conseguir [13].

Hoy en día se puede ver como la energía solar térmica está cogiendo fuerza en el panorama nacional contando con numerosas plantas en el sur de España. En el último año el aporte de este tipo de energía ascendió a 4 538 206 MWh como se puede ver en la imagen.

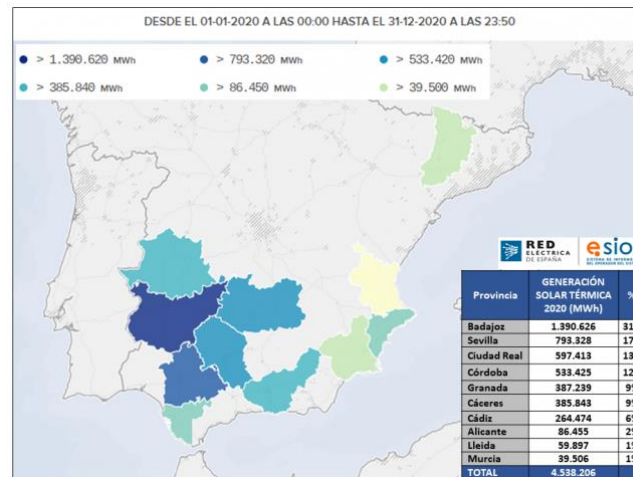


Figura 7. Producción energía solar térmica en España [12]

2.1.2.2. Funcionamiento

La energía proveniente del sol se puede aprovechar de diferentes formas. Entre ellas se encuentra la energía solar térmica. Esta consiste en utilizar la radiación solar para calentar un fluido caloportador (agua, vapor, aceite, sales, etc) y emplearla para consumo doméstico de agua (agua caliente sanitaria, calefacción) o bien para producir energía mecánica y a partir de esta energía eléctrica [14].

En el primero de los casos, se emplea la energía del sol con fines domésticos por medio de captadores que transfieren dicha energía a un sistema de almacenamiento que la suministra cuando es necesario. Este sistema puede emplearse tanto para consumo doméstico como industrial. En la siguiente figura se puede ver un esquema de una instalación solar para agua caliente sanitaria [15].

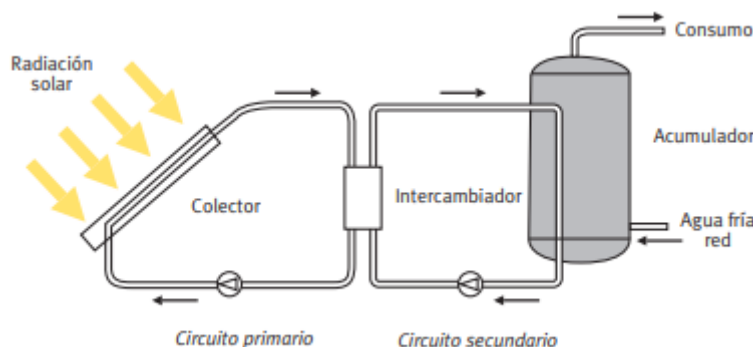


Figura 8. Esquema instalación solar para agua caliente sanitaria [15]

El segundo de los usos lo constituye la energía solar concentrada (CSP) que se basa en la generación de electricidad empleando el calor proporcionado por la irradiación solar concentrada en un área pequeña. La luz solar se refleja por medio de espejos en un receptor

donde el calor es recogido por un portador de energía térmica (circuito primario). Dicho portador utiliza este calor directamente (en el caso del agua/vapor) o a través de un circuito secundario para alimentar una turbina y generar electricidad. El esquema habitual en las centrales de energía solar concentrada tiene el aspecto de la imagen. En este caso se emplean cilindros parabólicos para calentar el fluido:

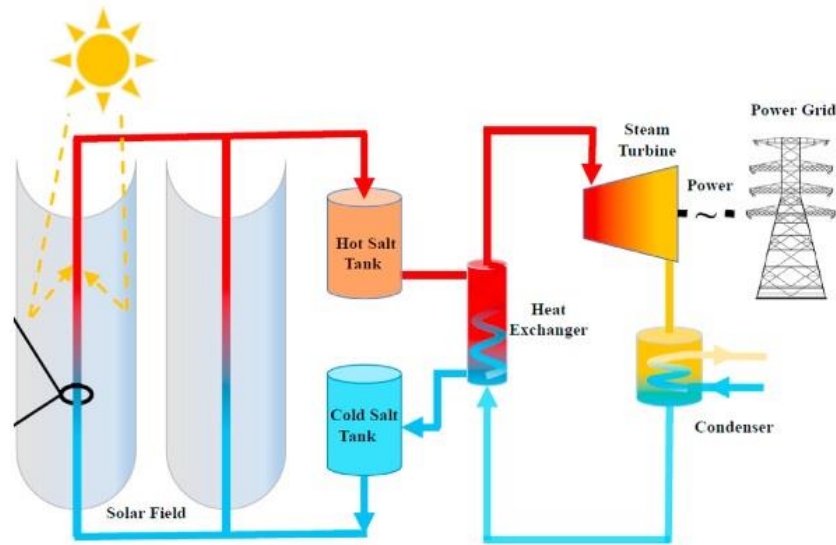


Figura 9. Distribución de una planta solar térmica con cilindros parabólicos [16]

La energía solar concentrada constituye una vía energética interesante en zonas donde hay irradiación normal directa. Este aprovechamiento de la energía puede resultar competitivo en dichas regiones para picos de demanda de energía a corto plazo y como fuente de energía base entre 2025 y 2030.

En la actualidad, hay cuatro tecnologías CSP disponibles: el colector cilindro-parabólico (PTC), la torre de energía solar (SPT), el reflector lineal de Fresnel (LFR) y los sistemas de disco parabólico (PDC). Estas se explicarán con mayor profundidad en el siguiente punto [17].

## 2.2. Energía solar térmica concentrada

Como bien se ha explicado anteriormente, la energía solar concentrada utiliza espejos para concentrar la luz solar sobre una superficie que contiene un fluido (HTF, Heat Transfer Fluid). Con ello se transforma la energía solar en energía térmica y posteriormente se emplea para la generación de electricidad [18].

Las principales tecnologías de energía solar térmica concentrada son:

- Cilindro parabólico.
- Fresnel.
- Torre central.
- Disco parabólico.

Estas tecnologías se podrían dividir en dos grupos atendiendo al receptor utilizado. En el caso de la torre central y el disco parabólico el receptor es puntual, mientras que en los cilindros parabólicos y Fresnel el receptor es lineal [19].

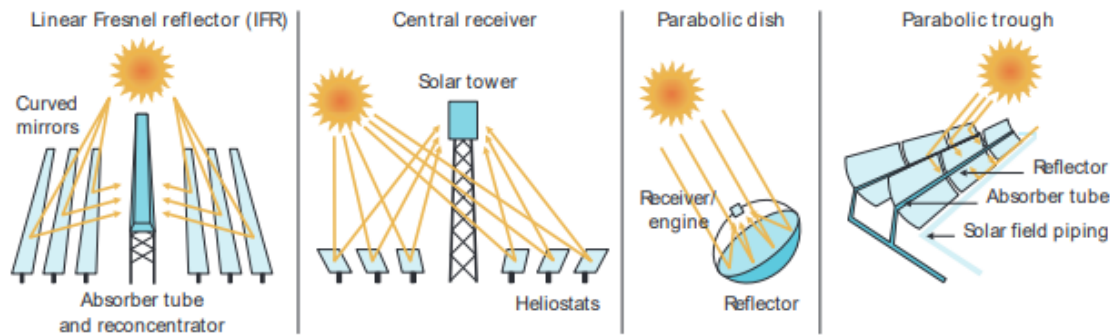


Figura 10. Tecnologías CSP [20]

### 2.2.1. Cilindro parabólico

Este tipo de tecnología se desarrollará de manera más profunda ya que el análisis de los diferentes tipos de almacenamiento se realizará sobre una planta con cilindros parabólicos.

Los sistemas de colectores cilindro parabólicos son una de las tecnologías más desarrolladas para el calentamiento de procesos y la generación de energía. Estos colectores poseen un reflector lineal de forma parabólica que enfoca la radiación solar en un receptor lineal situado en el foco de la parábola. Una de las ventajas que tiene el receptor lineal es que presenta menores caídas de presión. El colector cilindro-parabólico generalmente se encuentra alineado con el eje Norte-Sur y el concentrador sigue la dirección Este-Oeste del sol para enfocar la radiación solar hacia el receptor de forma más eficiente. El concentrador cilindro-parabólico puede enfocar la radiación solar de 30-100 veces su intensidad normal [21].



Figura 11. Cilindros parabólicos [22]

Las plantas solares que cuentan con los colectores de cilindros parabólicos se dividen las diferentes partes que aparecen en la figura 12.

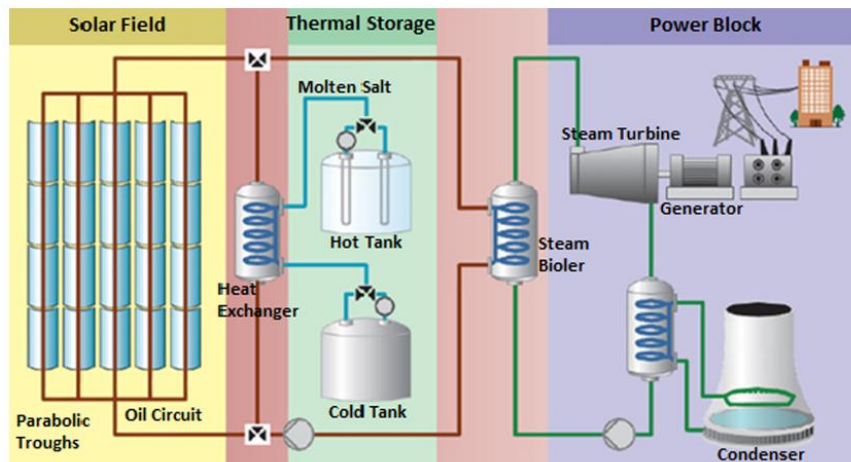


Figura 12. Planta solar térmica de cilindros parabólicos [23]

### 2.2.1.1. Campo solar

El campo solar está formado por un número determinado de colectores dependiendo de la potencia de la planta.

El grupo de reflectores se curvan en una dimensión en forma parabólica orientando la radiación solar en un tubo absorbente que se monta en la línea focal de la parábola. Los reflectores y los tubos absorbentes siguen el sol a lo largo del día. Normalmente, los fluidos térmicos se utilizan como HTF primario, para luego alimentar un circuito de vapor secundario y un ciclo de potencia Rankine.

El tubo absorbedor, también llamado elemento colector de calor (HCE), se compone de un material metálico y una envoltura de vidrio que lo cubre, con aire o vacío entre estos dos para reducir las pérdidas de calor por convección y permitir la expansión térmica. El tubo metálico está revestido con un material selectivo que tiene una alta absorción de la irradiación solar y una baja remisión térmica. El sellado vidrio-metal es crucial para reducir las pérdidas de calor [24].

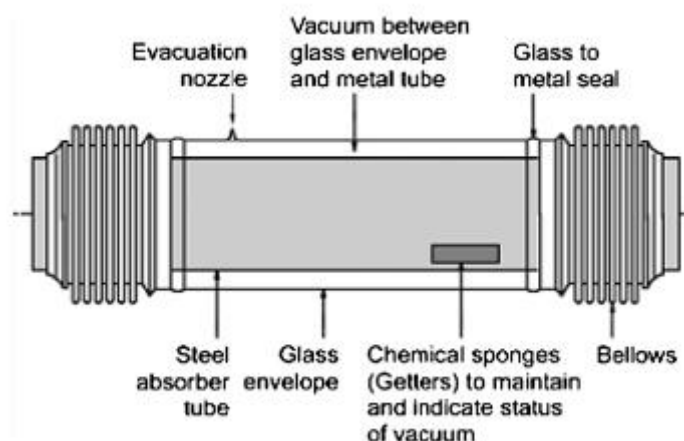


Figura 13. Elemento colector de calor [25]



### 2.2.1.2. Almacenamiento

El sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) posee un sencillo funcionamiento: el calor recogido sobrante en el campo solar se lleva hacia un intercambiador de calor e incrementa la temperatura del fluido de transferencia de calor (HTF) que va del tanque frío al tanque caliente. En el momento que se requiere calor, el tanque caliente eleva la temperatura del HTF y se envía al generador de vapor. Cuando se supera la capacidad de almacenamiento, en las horas de más sol, los operarios desenfocan algunos colectores solares para no sobrecalentar el HTF. El almacenamiento constituye una parte importante ya que evita que se pierda el excedente de energía diurna y prolonga la producción tras la puesta de sol [26].

Tabla 1. Tipos de almacenamiento.

Tipos de almacenamiento		
Dependiendo del plazo	Corto plazo	recoge y almacena el excedente de energía diurna para el consumo nocturno.
	Largo plazo	almacena en primavera y verano para los meses de otoño e invierno.
Dependiendo de la forma	Directa	emplea líquidos como el aceite mineral, el aceite sintético, el aceite de silicona o las sales fundidas para obtener calor sensible. En el caso de las sales fundidas, las características deseadas para el uso del calor sensible son alta densidad, baja presión de vapor, calor específico moderado, baja reactividad química y bajo coste
	Indirecta	el calor circula, recogido en los absorbedores, y luego se bombea al sistema de almacenamiento de energía térmica. El material de almacenamiento (material sólido) absorbe el calor del HTF en intercambiadores de calor, mientras el material sólido y el HTF están en contacto térmico.

Actualmente, sólo se almacena el calor sensible. La mejora significativa mediante el uso de almacenamiento de calor latente (materiales de cambio de fase) o incluso el almacenamiento de calor químico (síntesis endotérmica/exotérmica reversible) está en pleno desarrollo, considerándose el calor químico más adecuado para el almacenamiento de energía térmica a largo plazo.

### 2.2.1.3. Sistema de generación

La energía térmica proporcionada por el campo solar o el sistema de almacenamiento se transforma en electricidad mediante un ciclo Rankine de vapor. Como el bloque de potencia de un sistema cilindro-parabólico es similar al de las centrales eléctricas convencionales el trabajo de mantenimiento necesario también es el mismo o muy similar [27].

### 2.2.2. Fresnel

En 1822 el físico óptico Fresnel descubrió las lentes de vidrio que llevaban su propio nombre (lentes Fresnel) y que tenían aplicaciones marinas. Sin embargo, habría que esperar hasta más adelante cuando Giovanni construyó el primer prototipo de un colector Fresnel [28].

Este sistema se compone de filas de espejos planos o curvos que siguen al sol y enfocan su radiación sobre un receptor fijo. Dicho receptor se ubica a la distancia focal para absorber la máxima radiación solar (entre treinta y sesenta veces la intensidad solar normal). El receptor está formado por un banco de tubos paralelos de alta presión con recubrimiento selectivo y encerrados en una cavidad trapezoidal invertida aislada. La abertura de la cavidad se encuentra cubierta con una protección de vidrio para permitir la radiación solar concentrada y disminuir las pérdidas de calor de la cavidad. La energía solar concentrada se transfiere al fluido de transferencia de calor (HTF). Dicho fluido sufre un aumento de la temperatura que hasta situarse entre los 100°C y 300°C [29].

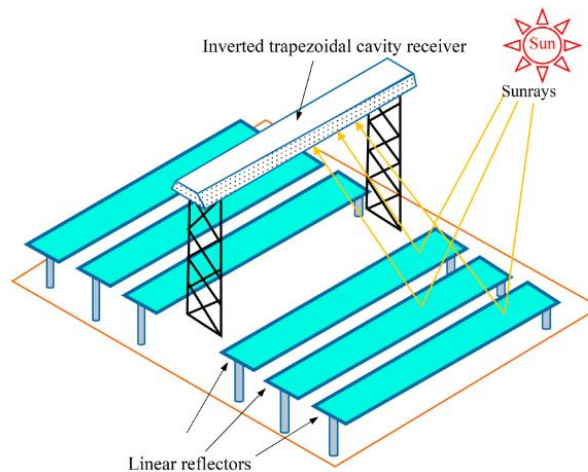


Figura 14. Tecnología Fresnel [29]

### 2.2.3. Torre Central

Esta tecnología consiste en un campo de heliostatos que orientan la luz solar directa hacia una torre. Estos heliostatos tienen la capacidad de seguir al sol de modo para aprovechar la máxima energía posible. Como en las tecnologías anteriores esta energía térmica se emplea para calentar un fluido que posteriormente transmite el calor a un ciclo de potencia (Rankine o Brayton) [1].

Dentro de las partes de una planta solar de torre central se encuentran:

El campo de heliostatos: formado por los reflectores solares y el sistema de seguimiento solar.

Sistema receptor: esta parte está constituida por el receptor y el fluido de transferencia. Este receptor se suele colocar a cierta altura para sombras que puedan aparecer en el campo de heliostatos.

Sistema de almacenamiento (opcional).

Sistema de generación: Bloque de potencia, generador, sistema de conversión a la red, servicios de la planta, etc.

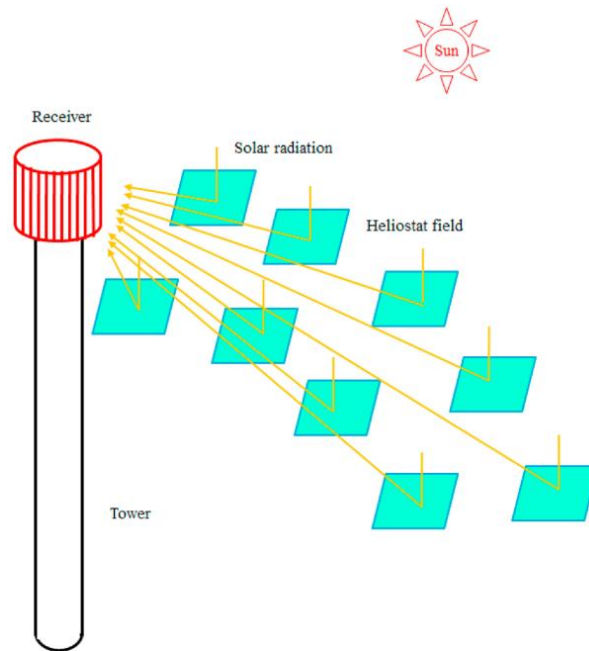


Figura 15. Tecnología torre central [29]

Entre las ventajas que ofrecen este tipo de centrales se encuentran las siguientes:

- Recogen la energía solar de forma óptica y la transfieren a un único receptor disminuyendo los requisitos de transporte de energía térmica.
- Suelen alcanzar ratios de concentración de entre 300 y 1.500 y son muy eficientes tanto en la captación de energía como en su conversión en electricidad.
- Fácil almacenamiento de la energía térmica.
- Son bastante grandes (más de 10 MW) y esto se traduce en beneficios de las economías de escala [30].

#### 2.2.4. Disco parabólico

Otro sistema de concentración de energía solar (CSP) lo constituye el disco parabólico. Este consiste en colectores solares de disco con forma de parábola que siguen al sol y concentran la energía solar en un receptor donde se absorbe y se transfiere a un fluido de transferencia de calor que se transporta a una planta. Esta tecnología de disco parabólico posee las mayores eficiencias ópticas, los mayores ratios de concentración y las mayores eficiencias globales de conversión de todas las tecnologías concentración solar [31].

Los colectores cilindro-parabólicos (PDC) son caros y poseen limitaciones relacionadas con el almacenamiento térmico y la hibridación. La producción en masa podría permitir que los discos sean competitivos con sistemas solares térmicos más grandes. Cada disco parabólico tiene una capacidad de baja potencia (alrededor de decenas de kW o menos), produciendo electricidad de forma independiente, lo cual implica que se necesitan una gran cantidad para instalar una planta a gran escala como la que se construye con otras tecnologías de concentración solar [32].

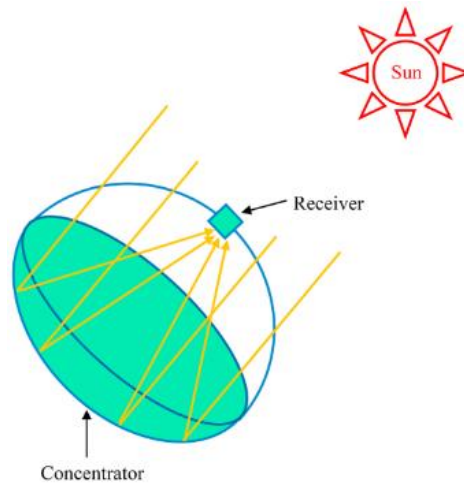


Figura 16. Tecnología disco parabólico [29]

### 2.3. Aplicaciones

La energía solar térmica concentrada posee diferentes aplicaciones por las que es interesante decantarse por este tipo de tecnología. En primer lugar, se puede destacar el uso de esta energía en el entorno doméstico ya que se puede emplear para el agua caliente sanitaria, la calefacción, la climatización de piscinas y en aplicaciones en vía de desarrollo como la refrigeración de edificios. Además, este tipo de tecnología resulta muy beneficiosa para el sector de la industria ya que multitud de procesos requieren un amplio caudal de calor. Por último, y como se ha comentado anteriormente, uno de los usos principales de la energía solar térmica lo constituye la generación de energía eléctrica. En el siguiente esquema se pueden ver los principales usos de esta tecnología.

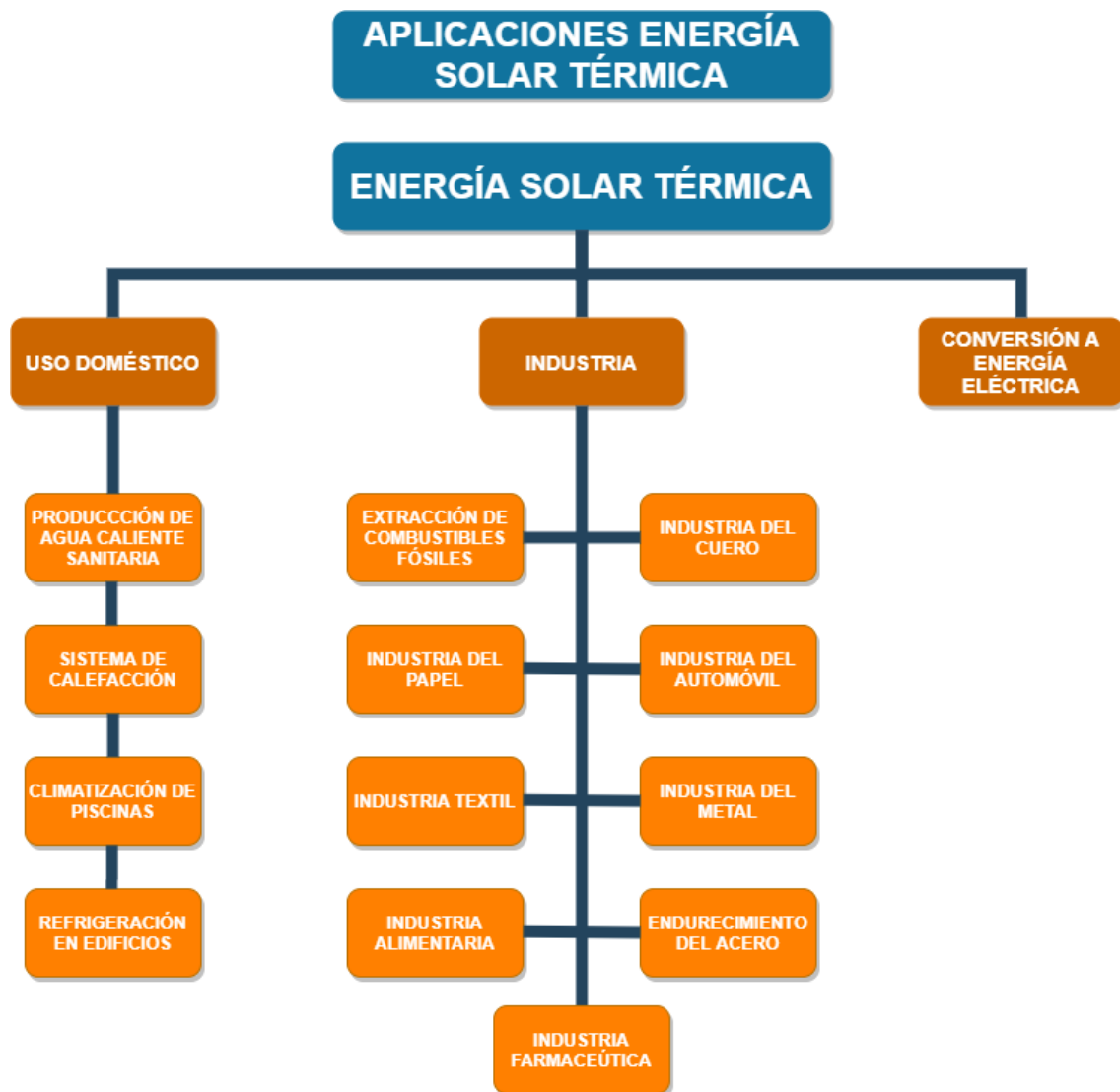


Figura 17. Aplicaciones energía solar térmica. Elaboración propia en base a [29]

### 2.3.1. Uso doméstico

En el esquema anterior se puede ver la amplia variedad de usos que ofrece la tecnología en el aspecto doméstico.

**Producción de agua caliente sanitaria (ACS):** la parte de energía destinada al agua caliente sanitaria es suficientemente importante como para considerar diferentes sistemas para satisfacer las necesidades. Con ello, una tecnología adecuada para hacer frente a esta demanda es la energía solar térmica entre otras cosas porque los niveles de temperatura alcanzados (40-45°C) con esta energía resultan adecuados para ACS. A mayores, al ser un servicio necesario a lo largo de todo el año se rentabiliza con mayor rapidez. La energía solar térmica puede abastecer en verano la totalidad de requerimientos de este servicio y en invierno en torno al 50-80 % dependiendo de la zona.

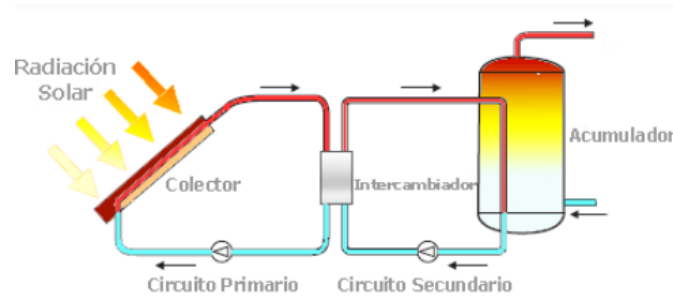


Figura 18. Instalación ACS [33]

Sistema de calefacción: en torno a la aplicación relativa al sistema de calefacción cabe destacar que la energía solar térmica hoy en día aportaría una parte de las necesidades totales de calefacción. Un punto a favor de este uso radica en la posibilidad de compatibilizar el empleo de energía solar térmica para calefacción y ACS.



Figura 19. Esquema sistema de calefacción [34]

Climatización de piscinas: el uso de energía solar térmica en esta aplicación constituye una opción interesante ya que se puede climatizar instalaciones tanto cubiertas como a la intemperie con sistemas sencillos. Dichos sistemas llevan el agua de la piscina por el captador sin necesidad de más dispositivos simplificando la operación. Además, la baja temperatura requerida (alrededor de 30°C) ofrece una ventaja ya que permite prolongar más su uso.

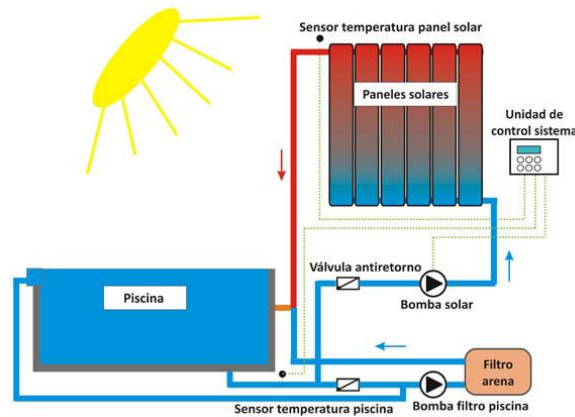


Figura 20. Esquema climatización de piscina [35]

**Refrigeración de edificios:** esta aplicación presenta una de las vías de desarrollo con más futuro y se basa en aprovechar la energía solar para producir frío. A mayores, este uso de la energía tiene un beneficio dual al emplear las instalaciones en verano para producir frío y en invierno para calefacción.

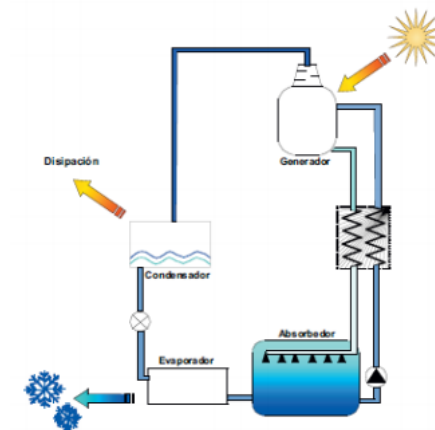


Figura 21. Esquema máquina de refrigeración [36]

### 2.3.2. Industria

Los sistemas de energía solar térmica pueden proporcionar temperaturas de flujo caliente que van desde 40°C a 1000°C dependiendo de los colectores solares. Además, estos sistemas poseen la capacidad de integrarse de forma sencilla en las industrias de proceso existentes para aportar calor en la generación de vapor y precalentamiento del agua. El sistema solar térmico puede integrarse en el sistema central de suministro de vapor/agua caliente de la industria de procesos (Fig. 21) [30].

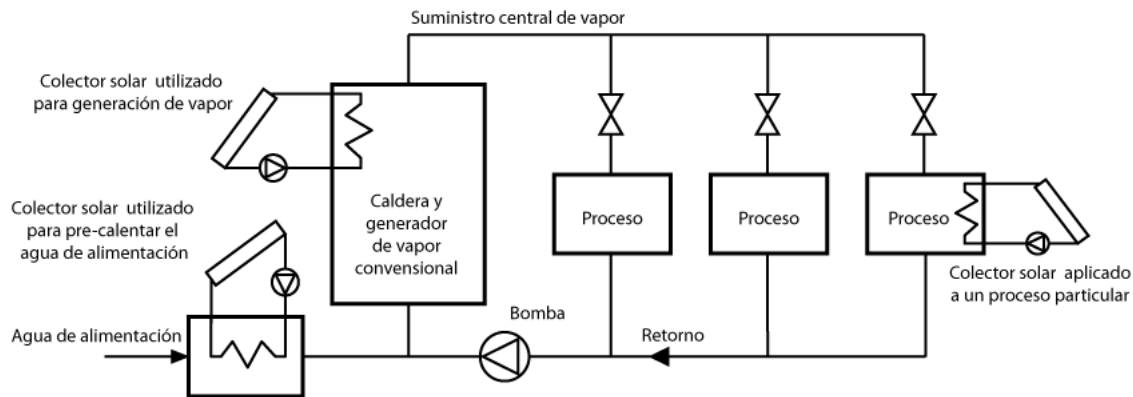


Figura 22. Esquema integración de energía solar térmica en un proceso industrial [37]

Dentro de las industrias donde se puede integrar la energía solar térmica concentrada se encuentran las siguientes:

**Extracción de combustibles fósiles:** en los pozos de extracción existen tres etapas teniendo en cuenta la capacidad de dicho pozo y los niveles de presión de la cabeza (primaria, secundaria y terciaria). La etapa terciaria se conoce como recuperación mejorada del petróleo que consiste en introducir fluidos para reducir la viscosidad y mejorar el flujo. Para ello uno de los métodos más empleados en Estados Unidos consiste en integrar en esa etapa tecnología de energía solar concentrada para producir vapor y mejorar la calidad del flujo.

**Industria del papel:** Dentro de la producción del papel, la recuperación química resulta uno de los pasos de mayor importancia ya que es donde se regeneran los productos químicos empleados en la fabricación. Para cubrir las altas demandas de calor en los procesos de blanqueo, secado de la pasta y lavado resulta conveniente la integración de colectores solares en estos procesos.

**Industrial textil:** La industria textil requiere aporte de calor a temperaturas que oscilan entre los 40°C y los 120°C. Esta demanda de calor para la mayoría de los procesos no supera los 100°C, a la espera del acondicionamiento del hilo. Por ello, la integración de colectores resulta beneficioso para llevar al fluido de trabajo a la temperatura necesaria ( $\approx 100^\circ\text{C}$ ). En esta aplicación, se suelen emplear calentadores auxiliares y/o almacenamiento térmico para reducir el efecto de la fluctuación de los intervalos de tiempo donde existe radiación solar.

**Industria alimentaria:** El sector de la transformación de alimentos engloba una amplia diversidad de segmentos donde en su gran mayoría resultan imprescindibles procesos como el secado, la cocción, la esterilización, el lavado de recipientes y el enfriamiento, requiere calor. Dependiendo del segmento estas necesidades de calor tendrán un carácter más o menos constante haciendo una vía interesante la instalación de colectores solares para hacer frente a estas exigencias.

**Industria farmacéutica:** muchos de los procesos que forman parte de la producción de fármacos necesitan servicios de calefacción (aporte de calor). Para hacer frente a dichas necesidades generalmente se emplean combustibles fósiles que pueden ser total o parcialmente sustituidos en algunos casos por sistemas de energía térmica no concentrados y en otros por colectores solares.



Industria del cuero: La industria del cuero requiere calor para los procesos de precurtido, curtido y postcurtido. Dichas operaciones necesitan temperaturas van entre 40 y 60°C, 60-80°C y 70-100°C respectivamente. Con ello, la tecnología más indicada para llevar a cabo este aumento de calor es el colector solar de tubos de vacío.

Industria del automóvil: si bien es cierto que la mayoría de las operaciones llevadas a cabo en el sector automovilístico requieren energía eléctrica, otras necesitan energía térmica para poder llevarlas a cabo. En este caso se encuentran las operaciones de forja del acero, la fundición de metales, el tratamiento previo a la pintura, el secado, el aire acondicionado, etc. El aporte de energía térmica por medio de colectores reduciría el consumo parcial de combustibles fósiles y en los casos de pretratamiento, evaporación y secado se podría sustituir de forma completa empleando colectores solares de tubo de vacío.

Industria del metal: el uso de la energía solar térmica para estas aplicaciones de tratamiento térmico puede disminuir los costes de operación manteniendo la calidad del producto en comparación con los sistemas de calentamiento convencionales.

Endurecimiento del acero: para endurecer los metales se utilizan sistemas convencionales de calefacción basados en combustibles fósiles, que pueden ser sustituidos por tecnologías de energía solar concentrada. La más adecuada es el horno solar que se compone de un campo de heliostatos enfoca la radiación solar en el concentrador secundario y el receptor. Con este dispositivo se han llegado a conseguir temperaturas de 3500 °C por lo que la temperatura que puede proporcionar no es un problema ya que el endurecimiento necesita temperaturas entre 900 y 1200°C [29].

### 2.3.3. Energía eléctrica

Uno de los principales usos de la energía solar térmica concentrada consiste en la generación de electricidad por medio de plantas de producción. Estas plantas emplean espejos para concentrar los rayos del sol para calentar el vapor o el gas que gira una turbina para producir electricidad como ya se tratado en los apartados 2.1 y 2.2.

## 2.4. Almacenamiento

El almacenamiento de energía ha sufrido una fuerte evolución a causa de la necesidad del mismo para hacer de la energía solar térmica un producto de mercado interesante. Como se puede observar en la figura 22, hoy en día casi la mitad de las plantas en funcionamiento poseen un sistema de almacenamiento de energía térmica. Además, se espera que estos sistemas acaben incorporados en cerca de un 80% de las plantas que están planificadas. La causa de este incremento en los sistemas de almacenamiento de energía térmica puede resumirse en un desarrollo tecnológico de dichos sistemas para poder hacer de la energía solar térmica concentrada una fuente energética económicamente viable.

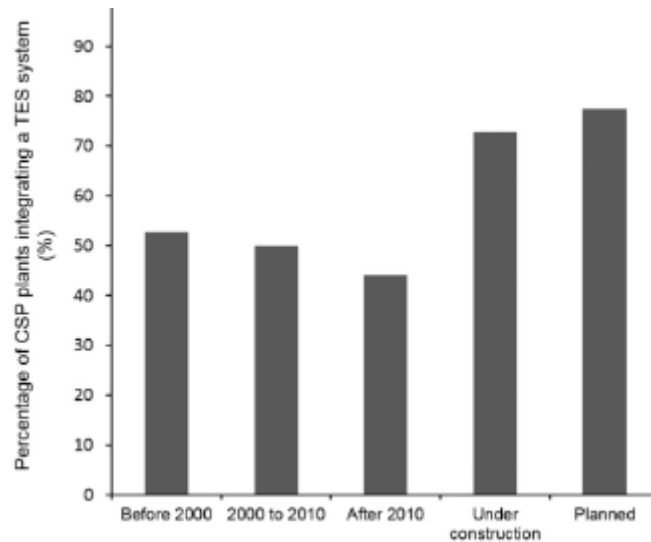


Figura 23. Evolución de la integración de sistemas TES en centrales [38]

La capacidad de almacenamiento de estos sistemas viene dada por el número de horas donde se puede apreciar un sensible aumento desde las tres horas hasta en torno a las ocho que están planificadas. El hecho de que en torno al 2000-2010 las capacidades no fueran significativas radica en el carácter investigación de dichas plantas [38].

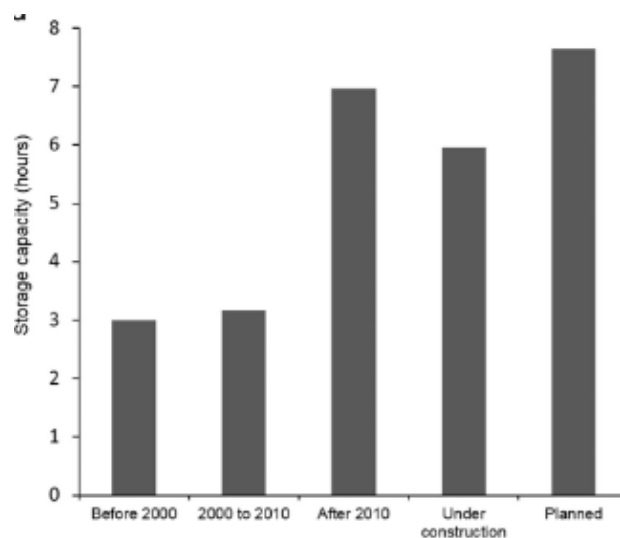


Figura 24. Evolución de la capacidad de almacenamiento [38]

Por otro lado, también resulta pertinente tratar las diferentes vías de desarrollo que actualmente se están explorando en lo que al almacenamiento térmico se refiere. Dichas vías se encuentran enfocadas en, además del calor sensible, poder almacenar la energía correspondiente al cambio de fase (almacenamiento latente). A mayores se está explorando el almacenamiento termoquímico y los medios de almacenamiento pasivo como el hormigón y los ladrillos. Con ello, se espera alcanzar cantidades de energía más elevadas y aumentar así la capacidad de las plantas solares térmicas [13].

#### 2.4.1. Introducción

Las partes correspondientes al almacenamiento térmico de las plantas de concentración solar son componentes separados que tienen como función permitir el suministro de energía eléctrica en función de la demanda. El excedente de energía que no se requiere en un

---

Diseño, dimensionamiento y simulación de una planta termosolar con almacenamiento térmico a través del programa System Advisor Model.

momento dado se carga en las unidades de almacenamiento para hacer funcionar el ciclo térmico de la central CSP cuando las demandas de energía sean más exigentes. En la descarga, la unidad de almacenamiento sustituye total o parcialmente al colector solar como fuente de calor para los ciclos térmicos. La opción de integrar una fuente de almacenamiento local rentable presenta una de las mayores ventajas de la CSP frente a otras energías renovables. Esto se debe a que almacenar la electricidad en instalaciones externas genera costes adicionales para la transferencia de la electricidad, las capacidades de las redes de distribución deben aumentar, la energía eléctrica transferida durante la carga supera la energía eléctrica entregada durante la descarga debido a las pérdidas del proceso de almacenamiento. La CSP puede beneficiarse del almacenamiento de varias maneras que se presenta en la siguiente tabla [39][27].

Tabla 2. Beneficios del almacenamiento térmico.

Beneficios	Descripción
Flexibilidad	Permite trasladar electricidad de periodos de baja demanda a periodos de alta. De esta manera se incrementa la rentabilidad.
Mayor eficiencia	Evita los transitorios y el funcionamiento en carga parcial del ciclo de energía resultante de la insolación variable.
Mayor vida útil	Disminuye el número de arranques de las turbinas.
Menor tiempo de arranque	Se emplea la energía almacenada para precalentar los componentes.
Disminución de sistemas de respaldo	El almacenamiento permite una mayor disponibilidad de energía en momentos de demanda reduciendo el empleo de combustibles fósiles.

En la siguiente imagen se puede apreciar cómo funciona el almacenamiento de energía en una central solar térmica de concentración a lo largo de un día. Se puede apreciar cómo los procedimientos de carga y descarga de la energía van en función de las demandas de energía.

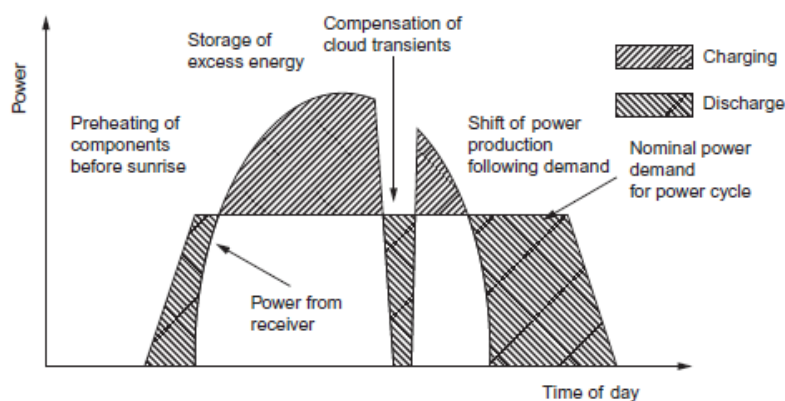


Figura 25. Funcionamiento del almacenamiento a lo largo del día [19]

#### 2.4.2. Tipos

Dentro de los sistemas de almacenamiento se pueden diferenciar tres partes: el medio de almacenamiento donde mantiene la energía, el mecanismo de transferencia de calor que administra la transmisión de calor en función de la demanda y por último el sistema de contención contiene el medio de almacenamiento, así como el equipo de transferencia de energía, y aísla el sistema de su entorno [40].

Para el almacenamiento térmico de una CSP, en primer lugar, se realiza una estrategia de diseño a nivel de planta. A continuación, se selecciona el material de almacenamiento y el diseño de los componentes que incluyen los materiales de almacenamiento. Por último, se diseña el sistema constituido por tanques de almacenamiento, intercambiadores de calor, tuberías y bombas, respectivamente, que cumplen los requisitos de la central. En este diseño global del sistema TES se atienden a requisitos de eficiencia, espacio y coste.

Con ello, en este apartado se verán: diseño a nivel de planta, diseño a nivel de componente y diseño a nivel de sistema [41].

#### 2.4.2.1. Diseño a nivel de planta

El nivel de diseño de planta se encuentra enfocado en cumplir parámetros generales de la misma y la integración del propio sistema de almacenamiento en ella. Los principales aspectos que condicionan el diseño a nivel de planta son:

Tipo de planta: dependiendo de la tecnología que se emplee (torre central, cilindro parabólico, disco o fresnell) la planta tendrá unas características donde en el caso concreto del disco se requiere un diseño especial del almacenamiento [41].

Funciones del almacenamiento: los sistemas de almacenamiento ajustan el suministro de energía a la demanda energética pero dichos sistemas pueden integrarse para cumplir una o más funciones. no todos ellos se integran para cubrir las mismas funciones. Entre estas funciones están: la amortiguación de periodos de nubosidad, suministro en situaciones de máxima demanda y mejorar el factor de capacidad de la central [42].

#### 2.4.2.2. Diseño a nivel de componente

En el diseño a nivel de componente se seleccionan los materiales involucrados en el proceso de almacenamiento. Entre dichos materiales se encuentran el material de almacenamiento, el material de contención y el fluido de transferencia de calor.

La selección del medio de almacenamiento atiende a un conjunto de criterios como propiedades físicas, costes y estabilidad térmica y química tales, que analizados en su conjunto permiten escoger la opción más adecuada. Las propiedades termofísicas de mayor relevancia en un material son la densidad, la capacidad y conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmico y garantizar una estabilidad cíclica, así como la disponibilidad del material, los costes y los métodos de producción.

Para poder elegir los materiales de almacenamientos en la planta solar primero habrá que determinar el tipo de almacenamiento que se va a emplear dentro de los siguientes.

#### Almacenamiento de calor sensible.

Los sistemas de almacenamiento de calor sensible consisten en almacenar o liberar la energía aumentando o disminuyendo la temperatura de un material concreto. Este proceso es puramente físico, sin ningún cambio de fase durante la carga o la descarga, por lo que la cantidad de calor almacenada depende del producto de la masa, el calor específico y la variación de temperatura del material de almacenamiento[38]. Por tanto, la cantidad de energía almacenada se calcula por medio de la siguiente expresión.

$$Q=m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Los sistemas de última generación emplean sales fundidas en un diseño indirecto de dos tanques. El principal beneficio de este diseño es que la transferencia de calor durante la carga y la descarga se produce a través de la convección forzada, con lo cual la transferencia de calor no es un factor muy limitante para el sistema. En la siguiente tabla se pueden observar los materiales más empleados para realizar este tipo de funciones [41].

Tabla 3. Principales características de los materiales de almacenamiento de calor sensible. [43]

Storage medium	Temperature		Average density (kg/m <sup>3</sup> )	Average heat conductivity (W/mK)	Average heat capacity (kJ/kg K)
	Cold (°C)	Hot (°C)			
Sand-rock-mineral oil	200	300	1700	1	1.3
Reinforced concrete	200	400	2200	1.5	0.85
NaCl (solid)	200	500	2160	7	0.85
Cast iron	200	400	7200	37	0.56
Silica fire bricks	200	700	1820	1.5	1
Magnesia fire bricks	200	1200	3000	1	1.15
HITEC solar salt	120	133	1990	0.60	-
Mineral oil	200	300	770	0.12	2.6
Synthetic oil	250	350	900	0.11	2.3
Silicon oil	300	400	900	0.1	2.1
Nitrite salts	250	450	1825	0.57	1.5
Nitrate salts	265	565	1870	0.52	1.6
Carbonate salts	450	850	2100	2	1.8
Liquid sodium	270	53	850	71	1.3
Silicon carbide	200	1400	3210	3.6	1.06
SiO <sub>2</sub> (cristobalite)	200	1200	2350	0.92	1.13

Almacenamiento de calor latente.

El almacenamiento de calor latente (LHS) utiliza el calor absorbido o liberado por el material de almacenamiento cuando experimenta un cambio de fase entre sólido y líquido o líquido y gas [43]. La energía almacenada para una transformación sólido-líquido viene dado por la siguiente expresión:

$$Q=m * [Cp_s(T_m - T_s) + h + Cp_l(T_l - T_m)]$$

donde  $Cp_s$  y  $Cp_l$  son los calores específicos medios en las fases sólida y líquida respectivamente,  $h$  es la entalpía de cambio de fase,  $T_m$  la temperatura de fusión,  $T_s$  la temperatura del sólido y  $T_l$  la temperatura del líquido[41]. En la siguiente tabla se presentan las sustancias inorgánicas que mejores perspectivas de desarrollo poseen para el almacenamiento de calor latente.

Tabla 4. Características de las potenciales sustancias para almacenamiento de calor latente. [43]

Inorganic compounds	Melting point (°C)	Heat of fusion (kJ/kg)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat at the melting point (kJ/kg K)	Thermal conductivity (W/mK)
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	130	275	NA	NA	NA
Hitec XL: 48% Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> -45%KNO <sub>3</sub> -7%NaNO <sub>3</sub>	140	NA	1992	1.44	0.519
Hitec: KNO <sub>3</sub> -NaNO <sub>2</sub> -NaNO <sub>3</sub>	142	84	1990	1.34	0.6
LiNO <sub>3</sub> -NaNO <sub>3</sub>	195	NA	NA	NA	NA
KNO <sub>3</sub> /NaNO <sub>3</sub> eutetic	223	105	NA	NA	NA
NaNO <sub>3</sub>	307/308	74	2260/2257	NA	0.5
65.2%NaOH-20%NaCl-14.8%Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	318	290	2000	1.85	1.0
KNO <sub>3</sub>	333/336	266	2110	NA	0.5
22.9% KCl-60.6% MnCl <sub>2</sub> -16.5% NaCl	350	215	2250	0.96	0.95
KOH	380	150	2044	NA	0.5
MgCl <sub>2</sub> /KCl/NaCl	380	400	1800	0.96	NA
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -BaCO <sub>3</sub> /MgO	500-850	NA	2600	NA	5
Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	618	NA	2091	2.07	NA
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	652	387	5670	0.43	NA
MgCl <sub>2</sub>	714	542	2140	NA	NA
80.5% LiF-19.5% CaF <sub>2</sub> eutetic	767	790	2100/2670	1.97/1.84	1.7/5.9
LiF	850	811	NA	NA	NA
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	854	276	2533	NA	2
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	897	236	2290	NA	2

### Almacenamiento termoquímico.

Una de las alternativas más innovadoras para hacer frente al problema del almacenamiento de energía térmica es el uso de reacciones químicas reversibles [44]. En el caso del almacenamiento de energía térmica sensible o latente, limitado en el tiempo debido a las pérdidas de calor, el almacenamiento de energía química permite salvar períodos de larga duración entre la oferta y la demanda, lo que lo hace especialmente adecuado para la generación de electricidad a gran escala.

En este sistema el exceso de energía el calor de alta calidad se convierte en energía química mediante una reacción endotérmica en la que los productos de la reacción se almacenan para su reutilización en la reacción inversa o se agotan. Cuando hay demanda de energía por parte de la central eléctrica u otros usuarios, el calor de alto grado se regenera a través del ciclo de reacción exotérmica inversa y se convierte en electricidad y calor de bajo grado a través de, por ejemplo, un turboalternador estándar accionado por vapor o a través de un motor Stirling accionado por un portador de calor [43].

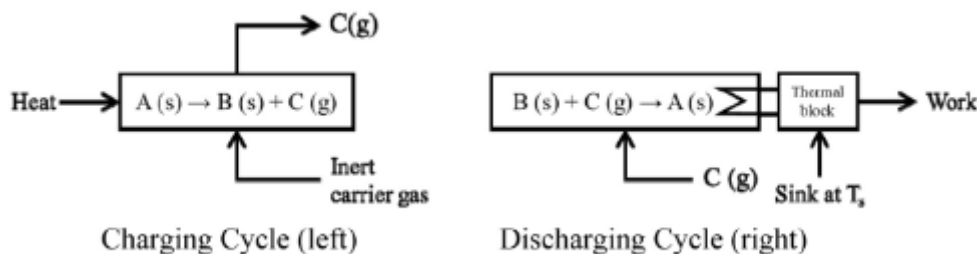


Figura 26. Esquema del almacenamiento de energía térmica mediante reacciones reversibles [43]

#### 2.4.2.3. Diseño a nivel de sistema

El diseño del sistema TES se centra en la integración de los componentes del sistema de almacenamiento como son los tanques de almacenamiento, las bombas y los intercambiadores de calor, y los controles para las operaciones de carga y descarga, de manera que disminuyan las pérdidas a nivel del sistema, mejorando la eficiencia y los costes del sistema.

Dentro del almacenamiento de energía térmica existen los denominados sistemas activos y pasivos, en función de si el medio es fluido o sólido respectivamente. Por su parte, los sistemas activos se dividen en directos si el medio de almacenamiento se emplea como fluido de transferencia o indirectos si ambos fluidos son diferentes. En el siguiente esquema se puede observar la clasificación de estos sistemas.

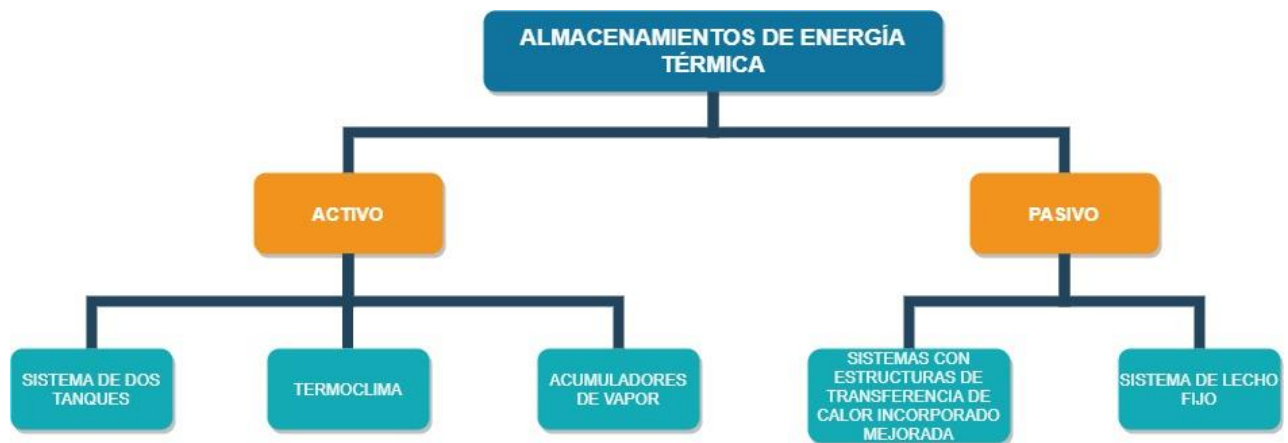


Figura 27. Tipos de almacenamiento. Elaboración propia en base a [45]

### Sistema de dos tanques.

En este sistema de almacenamiento un medio líquido pasa por un tanque caliente y un tanque a una temperatura más baja, que se denomina "tanque frío", a pesar de estar muy por encima de la temperatura ambiente. Los volúmenes de los tanques son tales que todo el medio de almacenamiento líquido puede ser en cualquiera de los dos depósitos. Debido a la menor densidad del medio de almacenamiento, el volumen del tanque caliente es ligeramente mayor [27].

La cantidad de calor almacenada estará en función de la energía suministrada por el campo solar. Por tanto, el tanque de almacenamiento tiene que almacenar la cantidad de líquido necesario y soportar los cambios de volumen asociados a los ciclos. A mayores, resulta crucial una óptima selección del material de almacenamiento para reducir las pérdidas. Factores como la temperatura de operación de la planta y el diseño del intercambiador marcarán la selección del material de almacenamiento [41].

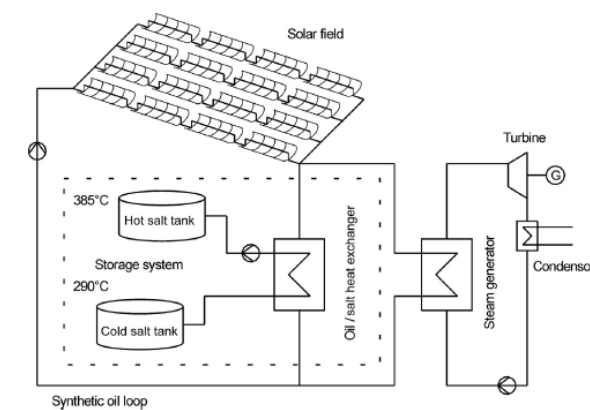


Figura 28. Esquema simplificado del sistema de almacenamiento de dos tanques [27]

### Termoclina.

Este sistema consiste en emplear un único tanque para almacenar el fluido a causa del gradiente térmico que se forma en él. El fluido caliente se asienta en la parte superior y a medida que se enfría se desplaza a la zona inferior.

### Acumuladores de vapor.

Los acumuladores de vapor son recipientes presurizados que pueden proporcionar almacenamiento mediante la acumulación del exceso de vapor producido por el receptor para su posterior liberación para el accionamiento de la turbina [19]. A continuación, se muestra un esquema de un acumulador de vapor independiente con sus diferentes partes.

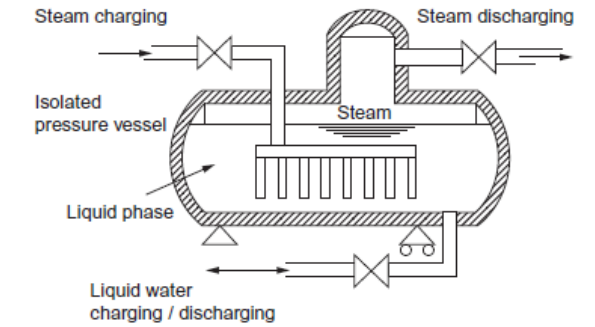


Figura 29. Esquema acumulador de vapor [27]

### Sistemas con estructuras de transferencia de calor incorporadas o mejoradas.

Estos sistemas se pueden emplear para altas y bajas temperaturas. Consiste en el uso del hormigón como medio de almacenamiento con un intercambiador de calor integrado en su interior. En este caso, para cargar el sistema el fluido que sale calentado del campo solar atraviesa el intercambiador transfiriendo su energía al hormigón. Ahora, para la descarga el fluido frío atraviesa dicho intercambiador en el sentido contrario absorbiendo el calor almacenado [41].

### Sistema de lecho fijo.

Los sistemas de lecho fijo se componen de elementos de material de almacenamiento de diversas formas y tamaños y un fluido de transferencia de calor que fluye entre estos elementos para lograr transferir el calor al material de almacenamiento. Al estar en contacto el fluido de transferencia de calor con el material de almacenamiento, los coeficientes de transferencia de calor pueden ser grandes y estos sistemas pueden mantener el gradiente térmico cuando se utilizan materiales muy poco conductores, como las rocas [41].



### 3. MODELADO

#### 3.1. Introducción

En el presente trabajo se va a emplear la herramienta System Advisor Model®, SAM de ahora en adelante, para construir un modelo de una central solar térmica con cilindros parabólicos sobre la cual se pretende realizar un estudio del impacto de ciertas variables. Este software facilita la capacidad de análisis y comparación de los costes y el rendimiento de diferentes sistemas de energías en toda la gama de tecnologías.

El modelado de una central solar térmica con cilindros parabólicos se hará con el objetivo de analizar la influencia de los diferentes fluidos de transferencia de calor de almacenamiento, el tiempo de almacenamiento y el múltiplo solar en la misma. Una vez modelado el sistema se modificarán estos parámetros para determinar el coste nivelado de energía (LCOE) mínimo y con ello obtener una optimización de dicha planta con respecto a estas variables.

Para aportar al trabajo un carácter más práctico, se escogerán los parámetros permanentes de diseño disponibles de la planta solar térmica Andasol 1 situada en Guadix, Granada. Esta central fue construida en 2008 para generar 50MW de potencia neta.

#### 3.2. Ubicación y recursos

De acuerdo con lo comentado en el anterior apartado, la central de concentración solar que se va a modelar se encuentra cercano a Guadix, entre las poblaciones de Alcudia de Guadix y Aldeire, provincia de Granada.



Figura 30. Ubicación Central solar térmica Andasol 1 [46]

En esta zona el promedio de anual de la irradiación global horizontal ronda los  $5.3 \text{ kWh/m}^2$  como se puede ver en el siguiente mapa de radiación.

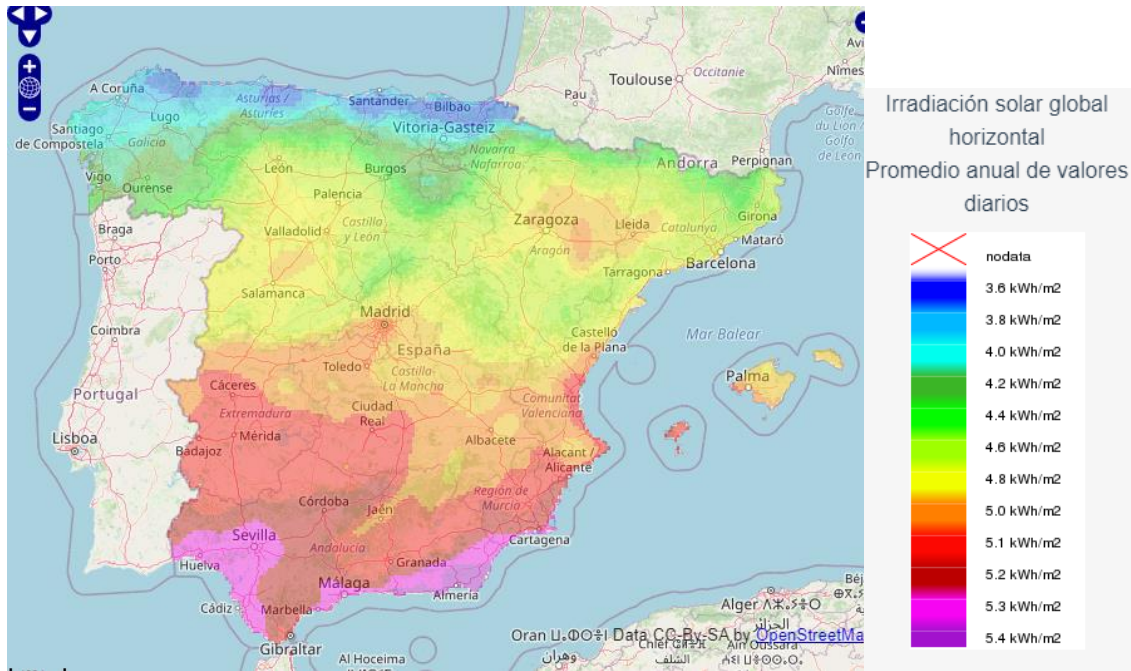


Figura 31. Mapa de radiación solar de España [47]

En esta primera pestaña del SAM, únicamente se cargarán los datos climatológicos de la ubicación de la planta Andasol 1 como se puede ver en la siguiente imagen. Con este fin, se ha puesto la ubicación en NSRBD Data Viewer y se ha descargado un Excel con los datos climatológicos de 2019 para cargarlos en SAM.

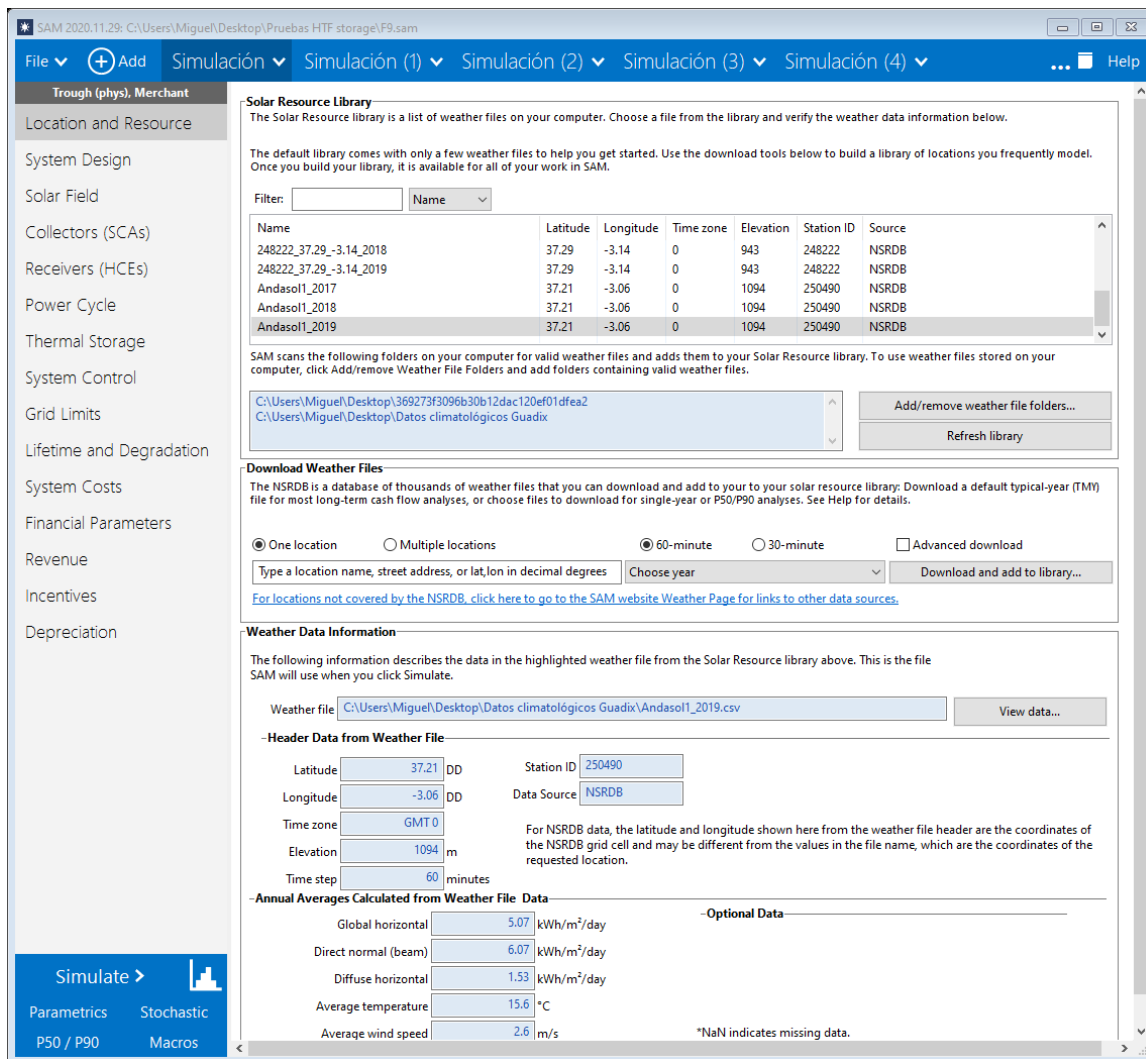


Figura 32. Datos climatológicos ubicación Andasol 1(2019). Elaboración propia con SAM

### 3.3. Diseño del sistema

En la parte del modelado correspondiente al diseño del sistema se ofrecen distintos parámetros que influirán en la capacidad nominal del sistema. En primer lugar, surge la disyuntiva de dimensionar la planta en función del múltiplo solar o bien el área de apertura de campo:

**Primera opción (múltiplo solar):** el programa obtiene los valores del área de la apertura total requerida y el número de bucles en función del múltiplo solar.

**Segunda opción (área de apertura de campo):** el software calcula el múltiplo solar y el número de bucles basándose en el área de apertura de campo.

Al realizar en este trabajo un análisis de influencia de diferentes parámetros, entre los cuales se encuentra el múltiplo solar, la opción que más se utilizará será la primera. Con ello, se modificará esta variable para ver su contribución al valor del LCOE. A pesar de esto, también se va a utilizar la segunda opción introduciendo el área de apertura de campo real de la planta Andasol 1.

A continuación, se van a exponer los valores de los parámetros que se han modificado con respecto a las preestablecidas por SAM.

- **Campo solar.**

Los parámetros de diseño del campo solar definen el tamaño del campo solar. De acuerdo con lo descrito anteriormente, se utilizarán las dos opciones propuestas por el programa donde se mantendrán constantes todas las variables excepto el múltiplo solar. Las variaciones realizadas son las siguientes:

- Múltiplo solar: el valor del múltiplo solar irá entre los valores 1.6-1.9 para obtener el valor óptimo.
- Apertura de campo: las simulaciones realizadas con la opción donde se define la apertura de campo se realizarán con un valor constante de  $510\ 120\ m^2$  [48].
- Punto de diseño DNI: el valor estimado para la radiación directa normal es de  $700\ W / m^2$ .

- **Ciclo de potencia**

En este apartado del diseño del sistema se definen variables que marcarán la capacidad del ciclo de potencia y la capacidad nominal del sistema.

- Potencia bruta de diseño de la turbina (MWe): el valor introducido es de 55MWe para que la producción neta estimada en diseño (nominal) sea de 50MWe [48].
- Eficiencia del ciclo: se ha impuesto para todas las simulaciones un eficiencia de ciclo de 38,1%. [48]

- **Almacenamiento térmico**

La sección correspondiente al almacenamiento térmico hace referencia a las horas de almacenamiento y determinará el tamaño del sistema.

- Horas de almacenamiento en el punto de diseño (horas): esta variable se irá modificando para determinar su influencia y si es correcto el valor 7.5h escogido para la central Andasol 1.

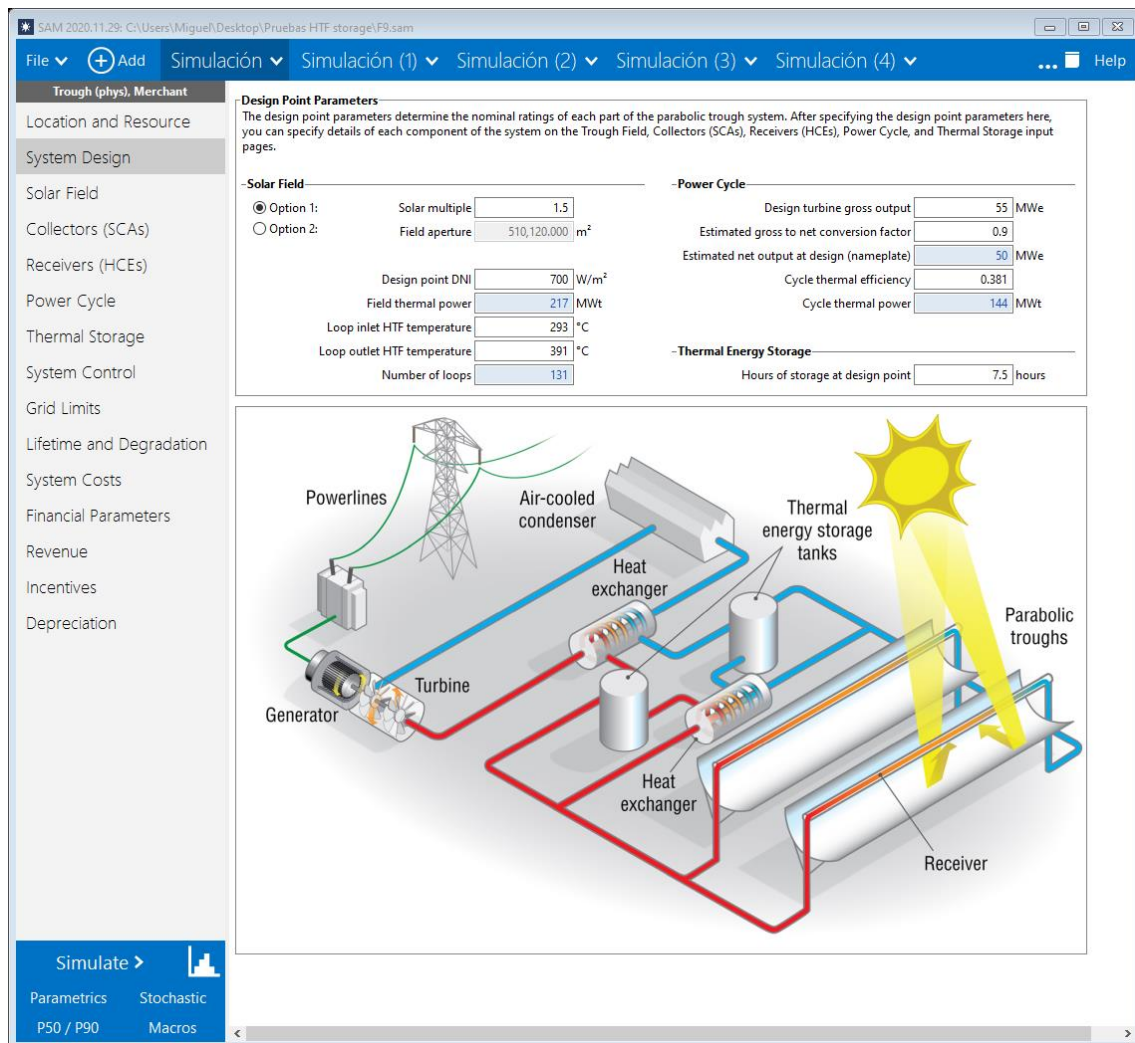


Figura 33. Diseño del sistema SAM. Elaboración propia con SAM

### 3.4. Campo solar

En la parte del campo solar se presentan variables que determinan el tamaño y las propiedades tanto del campo solar estudiado como de las propiedades del fluido caloportador escogido.

Dentro del campo solar se han cambiado variables preestablecidas de las siguientes secciones.

- **Punto de diseño del campo solar**

En el punto de diseño del campo vienen valores de variables de la pestaña diseño del sistema que emplea el programa para hallar la capacidad del sistema y más adelante los costes del mismo. Por lo tanto, estos parámetros los ofrece el programa y no se pueden modificar en esta pestaña.

- **Parámetros del campo solar**

Dentro de estos parámetros se encuentran variables tanto relativas a la disposición de los colectores (espacio entre hileras, número de subsecciones) como a aspectos funcionamiento de colectores y receptores (tiempo y energía de arranque del receptor, energía de arranque del colector, potencia de seguimiento, etc). En este caso se ha modificado el valor predeterminado para el espacio entre hileras.

- Espacio entre hileras ( $L_{spacing}$ ): esta variable representa la distancia existente entre las hileras de colectores como se puede apreciar en la imagen siguiente.

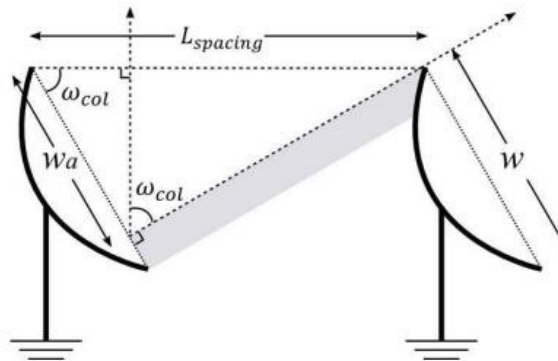


Figura 34. Espacio entre hileras [49]

El valor de este espacio entre hileras se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$w_a = \cos(w_{col}) * L_{spacing}$$

Donde  $w_a$  representa la parte de la longitud de apertura del colector ( $w$ ) que recibe la radiación solar y que en nuestro caso se va tomar igual  $w$  para aprovechar toda la radiación que en el caso del colector Eurotrough ET150 (elegido en el apartado 3.5) tiene un valor de 5.75 m. En cuanto al parámetro  $w_{col}$  irá variando a lo largo del día y tendrá valores más altos al amanecer y anochecer. De esta forma se hallaría el valor a partir del cual se utiliza toda la longitud de apertura. En nuestro caso se modificará el valor predeterminado por el SAM de 15m a 17.5m para asegurarnos un aprovechamiento óptimo de la radiación.

• **Fluido de transferencia de calor**

El fluido de transferencia de calor (HTF) es el fluido que circula los elementos de captación de calor y en los cabezales del campo solar. En este caso el programa ofrece los siguientes: Sal solar, Caloria, Hitec XL, Therminol VP-1, Sal Hitec, Dowtherm Q, Dowtherm RP, Therminol 59 y Therminol 66. A mayores puede definir un HTF propio.

- HTF: en el caso de Andasol 1 se emplea como fluido de transferencia el Dowtherm A del cual no hay datos en SAM. Por lo tanto, se han definido sus propiedades manualmente en el programa empleando los datos de la ficha técnica del fluido facilitados por el fabricante.

**Saturated Liquid Properties of DOWTHERM™ A Fluid (SI Units)**

Temperature °C	Specific Heat kJ/kg K	Density kg/m³	Thermal Conductivity W/mK	Viscosity mPa sec	Vapor Pressure (bar)
15	1.558	1063.5	0.1395	5.00	0.00
65	1.701	1023.7	0.1315	1.58	0.00
105	1.814	990.7	0.1251	0.91	0.01
155	1.954	947.8	0.1171	0.56	0.06
205	2.093	902.5	0.1091	0.38	0.28
255	2.231	854.0	0.1011	0.27	0.97
305	2.373	801.3	0.0931	0.20	2.60
355	2.527	742.3	0.0851	0.16	5.80
405	2.725	672.5	0.0771	0.12	11.32

Figura 35. Ficha técnica de las propiedades del fluido Dowtherm A [50]

• **Configuración de un solo bucle**

Esta parte consiste en definir las características de un bucle. El programa halla el número de bucles en función de los parámetros introducidos.

- Número de colectores por bucle: se ha reducido el valor predeterminado hasta 4 colectores por bucle ya que es la disposición que posee la central de referencia.

En la siguiente imagen se pueden ver todos los valores tanto introducidos como hallados por el programa.

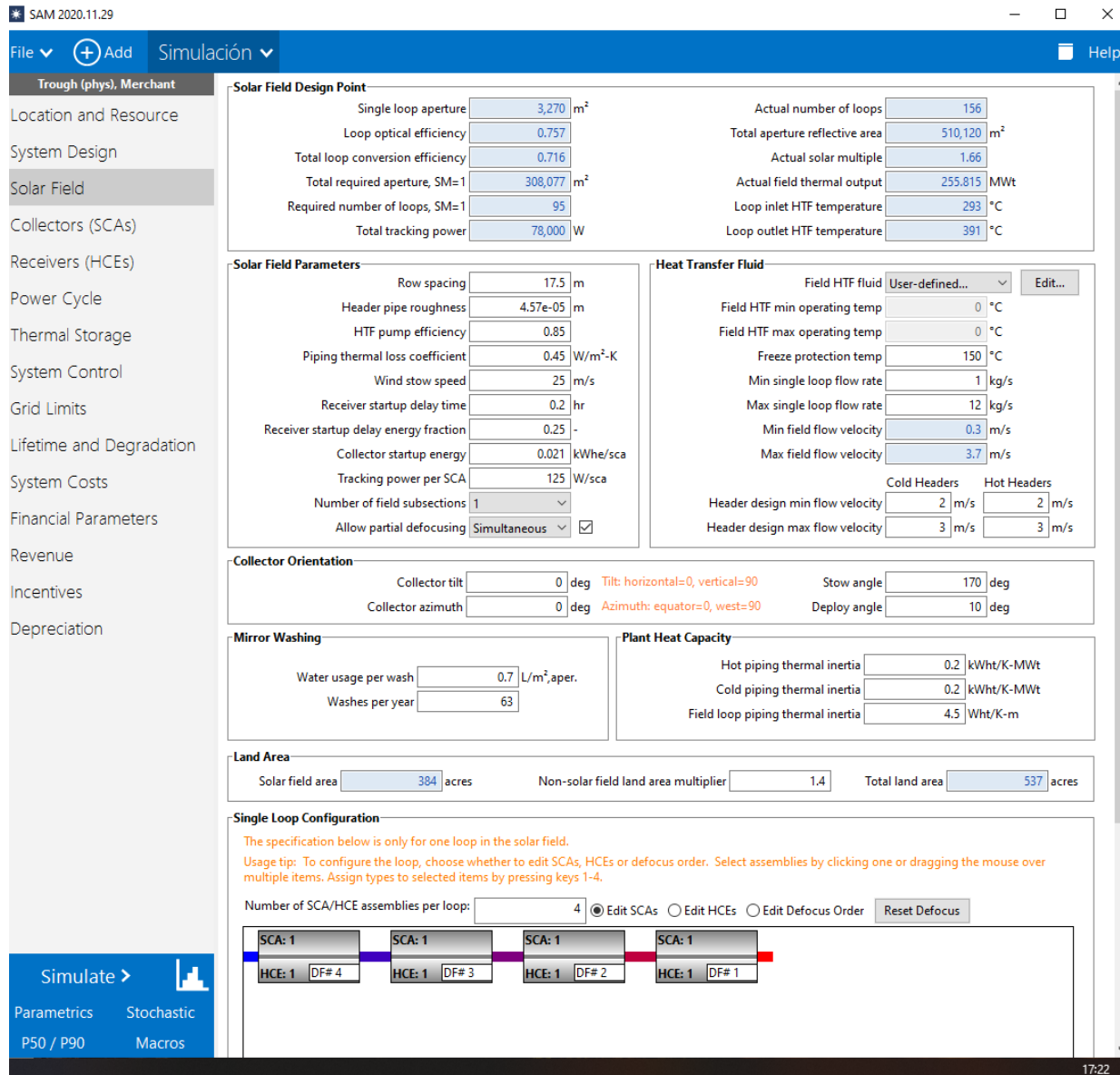


Figura 36. Entradas y salidas del apartado Campo Solar (SAM)

**3.5. Colectores**

Los colectores (SCA, conjunto de colectores solares) son los componentes de seguimiento individual del campo solar que incluye espejos, una estructura de soporte y receptores. Dentro de los tipos que ofrece el programa se encuentra el empleado en Andasol 1. Existe la posibilidad en este apartado de seleccionar diferentes tipos de colectores de los cuales se

presentan las características a continuación, pero en este trabajo sólo se escogerá el instalado en la central objeto de estudio.

Tabla 5. Parámetros de los principales colectores cilindro parabólicos [51]

Colector	LS-1	LS-2	LS-3	Eurotrough	Solargenix
Estructura	Tubo soporte central (torque tube)	Tubo soporte central (torque tube)	Estructura espacial en "V"	Estructura espacial rectangular	Estructura espacial de aluminio
Apertura (m)	2,55	5	5,76	5,75	5
Distancia focal (m)	0,94	1,49	1,71	1,71	1,49
Longitud de un módulo (m)	6,3	8	12	12	8
Longitud de un colector (m)	50,2	49	99	150	49-65
Área de espejo por colector (m <sup>2</sup> )	128	235	545	817	235-313
Diámetro del receptor (m)	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07
Concentración geométrica	61:1	71:1	82:1	82:1	71:1
Mecanismo de accionamiento	Mecánico	Mecánico	Hidráulico	Hidráulico	Mecánico o Hidráulico
Peso (kg/m <sup>2</sup> )	n/a	29	33	29	24
Rendimiento óptico pico	71	76	80	80	80
Referencia	SEGS I y II	SEGS II-VII	SEGS V-IX	Andasol I y II	Nevada Solar One

Dentro de los principales colectores caracterizados anteriormente, el utilizado en la planta Andasol 1 es el EuroTrough ET150 y posee el siguiente aspecto.



Figura 37. Colector EuroTrough [52]



De la librería de colectores se selecciona el EuroTrough ET150 para que se carguen sus características en las entradas correspondientes. En la siguiente imagen se ofrecen los datos de este apartado.

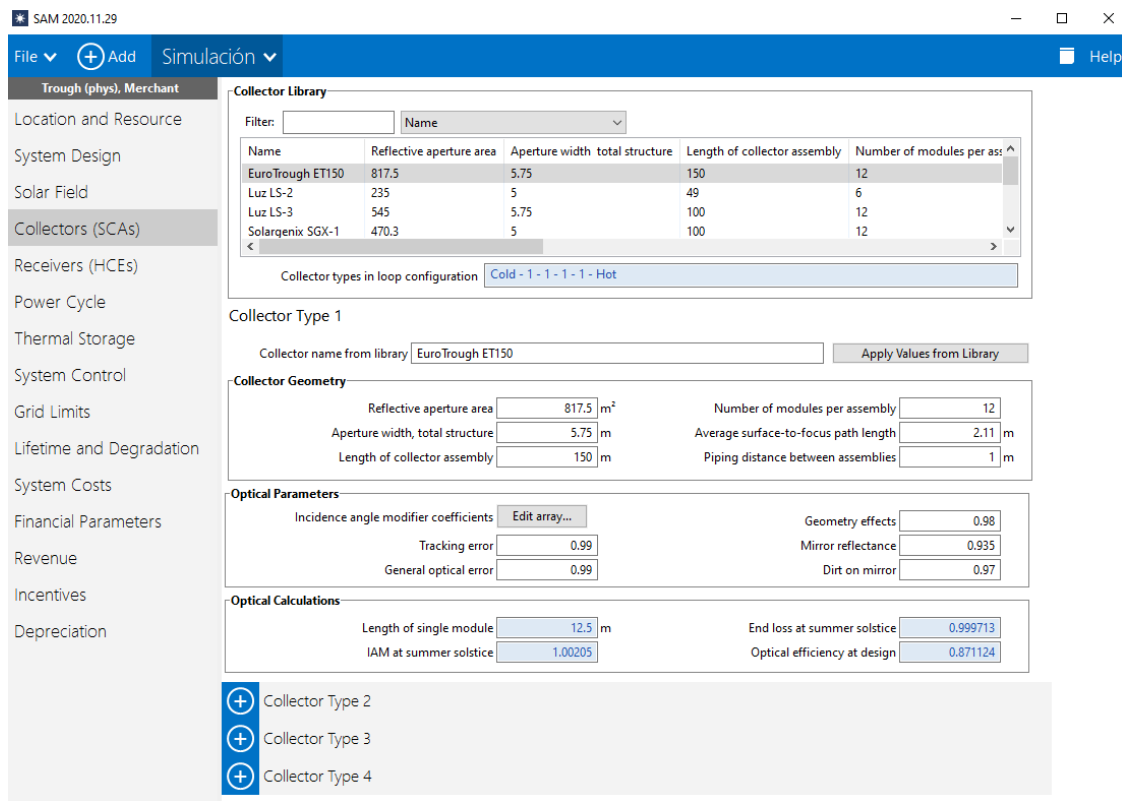


Figura 38. Parámetros del colector (SAM)

### 3.6. Receptores

El receptor (HCE, elemento de captación de calor) consiste en un tubo metálico contenido en un vacío dentro de un tubo de vidrio que recorre la línea focal del colector parabólico en forma de canal. Para mantener el vacío en el interior los receptores poseen juntas y fuelles en cada tubo. Además, estos dispositivos constan de revestimientos antirreflectantes del tubo de vidrio que maximizan la cantidad de radiación solar que entra en el tubo.

De acuerdo con la bibliografía consultada no acaba de quedar claro qué receptor se emplea en Andasol 1[53]. Dependiendo de los diferentes documentos se señala como receptor utilizado el Solel UVAC 3 o Schott PTR70. Por lo tanto, para escoger uno se ha simulado la planta con ambos optando por el receptor que más acerque su resultado a los datos reales disponibles de la central Andasol 1. Después de observar los resultados el receptor escogido es el Solel UVAC 3.



Figura 39. Receptor Solel UVAC [54]

A continuación, se selecciona en SAM el receptor escogido para realizar las simulaciones.

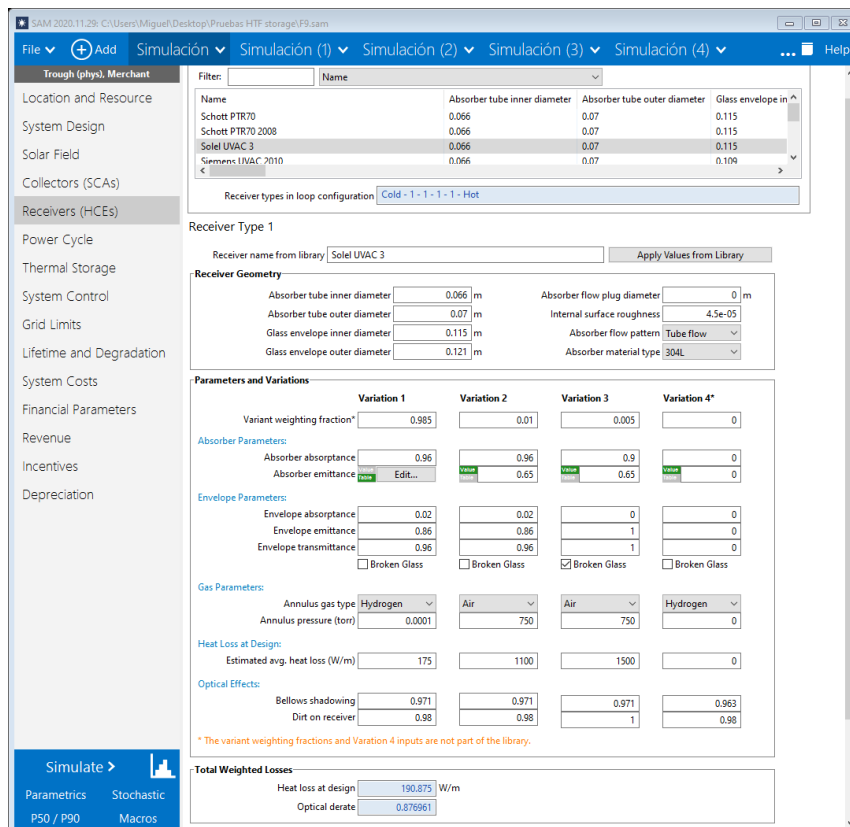


Figura 40. Parámetros del colector (SAM)

### 3.7. Ciclo de potencia

El modelo de ciclo de potencia contiene los equipos necesarios para convertir la energía térmica del del campo solar en energía mecánica o eléctrica útil. En aplicaciones relacionadas con servicio público los sistemas CSP utilizan un ciclo Rankine de vapor convencional y un generador eléctrico de vapor Rankine convencional y un generador eléctrico. Cabe mencionar

que, en casos como la integración de CSP en procesos industriales, simplemente se utiliza este calor para disminuir el consumo de combustibles fósiles.

En este apartado no se han introducido datos concretos ya que en la parte del diseño del sistema ya se concretaron los valores de la eficiencia del ciclo (38.1%) y la potencia de salida del ciclo de potencia (55MWe). Con ello el ciclo de potencia de la planta diseñada presenta los parámetros que aparecen a continuación.

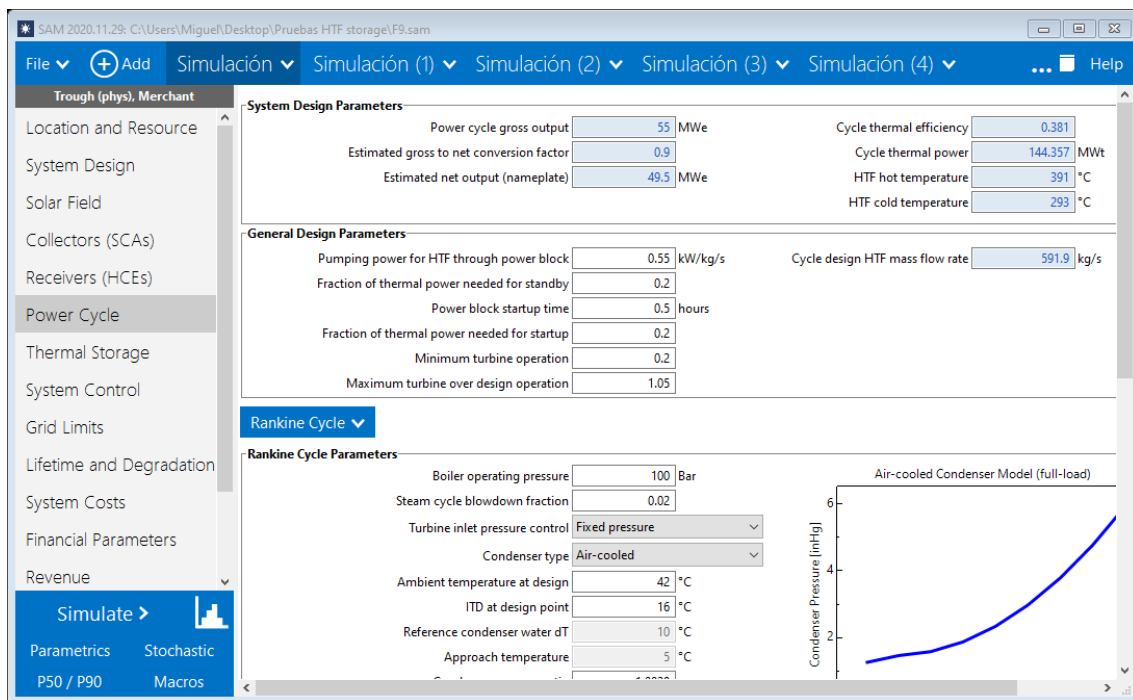


Figura 41. Parámetros ciclo de potencia (SAM)

### 3.8. Almacenamiento térmico

El sistema de almacenamiento de energía térmica (TES) acumula el calor del campo solar en un medio líquido. El calor del sistema de almacenamiento ofrece la posibilidad de impulsar la turbina del bloque de potencia durante los periodos de poca o ninguna luz solar. Este sistema de almacenamiento térmico resulta especialmente interesante en muchos lugares donde la demanda máxima de energía se produce después de la caída del sol. Añadir almacenamiento térmico a un sistema cilindro-parabólico permite separar la captación de energía solar del funcionamiento del bloque de potencia. Por ejemplo, un sistema podría recoger energía por la mañana y utilizarla para generar electricidad hasta últimas horas de la tarde.

El sistema de almacenamiento escogido por el programa consiste en emplear tanques de almacenamiento. Este sistema se encuentra dentro del tipo indirecto ya que el fluido empleado para captar la radiación del sol difiere con el utilizado para realizar las labores de almacenamiento. Los pares de tanques del sistema pueden variar de uno o varios donde por lo menos existirá un tanque caliente para almacenar el calor del campo solar y otro frío para almacenar el medio de almacenamiento enfriado después de que el bloque de potencia haya extraído su energía. Entre los elementos que unidos a los tanques conforman el sistema de almacenamiento se encuentran bombas para hacer circular los líquidos y, según el diseño, intercambiadores de calor.

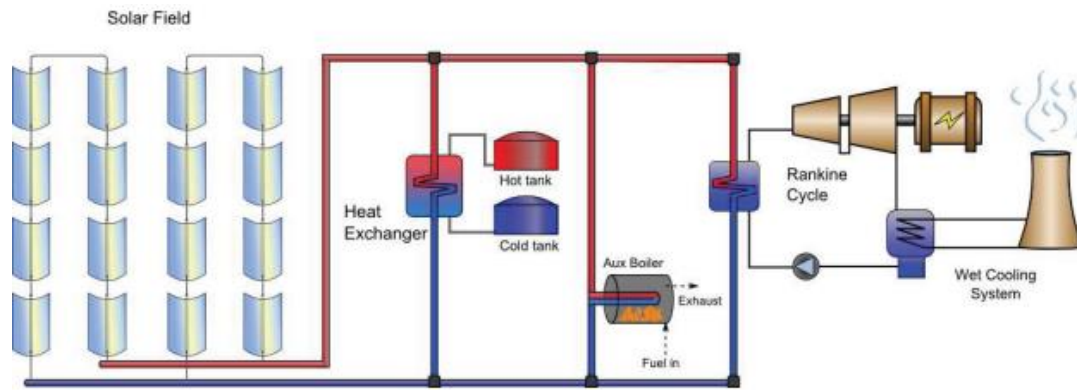


Figura 42. Esquema central solar térmica con almacenamiento [55]

En la misma línea que el apartado anterior, ciclo de potencia, la variable relativa a esta sección se ha definido en el diseño del sistema. Esta variable es las horas de almacenamiento que en un inicio se escogerán 7.5h como en la central Andasol 1. A continuación se modificarán los tipos de fluido empleados para el almacenamiento disponibles en el apartado Storage HTF fluid para determinar cuál es el óptimo. Una vez determinado el fluido más rentable se irán variando las horas de almacenamiento para optimizar esta parte tan relevante de la central.

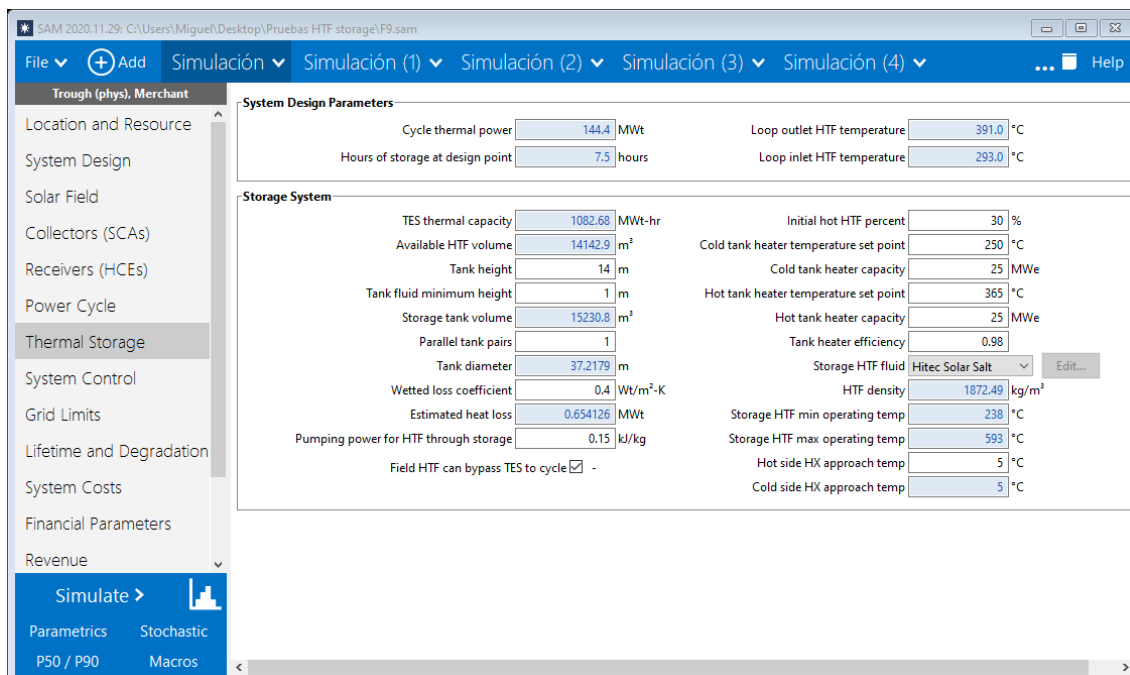


Figura 43. Parámetros almacenamiento térmico (SAM)

### 3.9. Sistema de costes

A pesar de que este apartado resulta complicado de definir SAM ofrece datos predeterminados factibles para los diferentes costes que acarrea la construcción de una central solar térmica. Con ello, se han mantenido gran parte de los costes facilitados a pesar de que se ha tenido que añadir el coste por el combustible fósil ya que la planta solar modelo cuenta con respaldo de combustible fósil. De esta forma los parámetros de esta parte quedan de la siguiente forma.

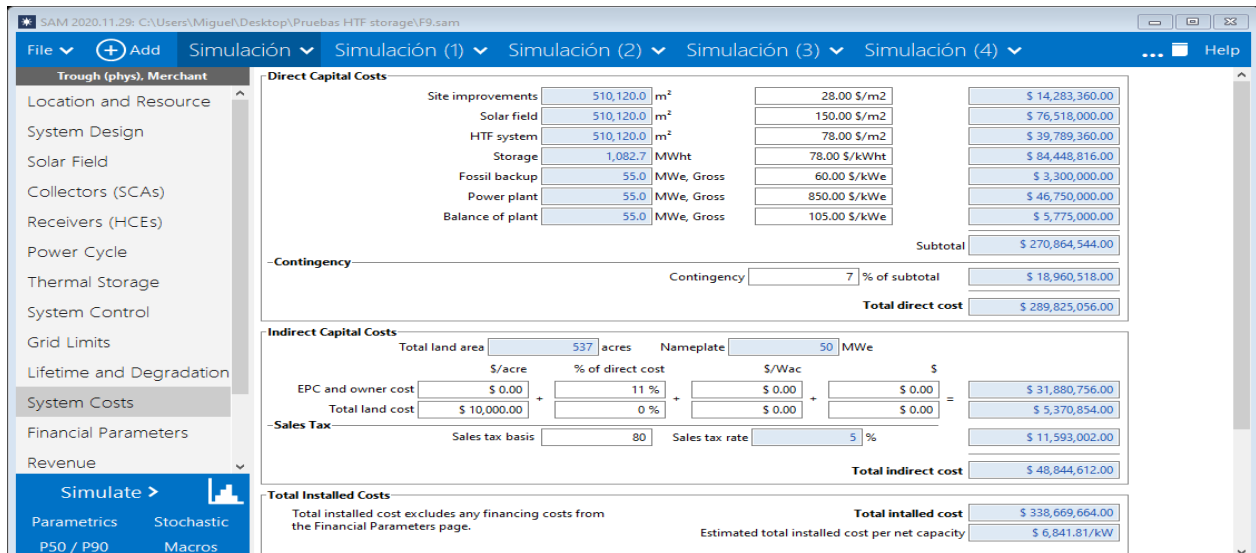


Figura 44. Parámetros sistema de costes (SAM)

### 3.10. Metodología

#### 3.10.1. Introducción

En este capítulo se expondrá la estrategia seguida para optimizar una central solar térmica de cilindros parabólicos con respecto a los parámetros de HTF de almacenamiento escogido, las horas de almacenamiento y el múltiplo solar. Para poder realizar este análisis económico de la influencia de las variables anteriores se van a comparar los costes normalizados de la electricidad (LCOE) obtenidos en cada caso. Con este parámetro económico se expresa el coste de la producción de energía en la planta simulada por lo tanto constituye un indicador importante a la hora de decantarse por unas condiciones concretas de diseño.

En primer lugar, se va a realizar una descripción previa de los parámetros que se van a analizar y su importancia en el diseño de una central solar térmica. Por otro lado, también se justificará la elección del LCOE como parámetro de comparación. Y en última instancia, se expondrán los pasos seguidos en el procedimiento de simulación y obtención de resultados.

#### 3.10.2. Fluido de transferencia de calor de almacenamiento

La parte del almacenamiento de la energía producida presenta un punto crítico de las renovables. Los consumidores requieren electricidad en cualquier instante, pero el sol no siempre está disponible. Para paliar este inconveniente de disponibilidad una de las propuestas de mayor interés determinar el fluido de almacenamiento que se va a emplear.

Las simulaciones con SAM se realizarán cambiando el fluido de almacenamiento dentro de los propuestos por la herramienta. Las características de los mismos se presentan a continuación.

Tabla 6. Propiedades de los HTF de almacenamiento.

Nombre	Tipo	Temperatura mínima de operación óptima (°C)	Temperatura máxima de operación óptima (°C)	Punto de congelación
Hitec Solar Salt	Nitrate Salt	238	593	238
Hitec	Nitrate Salt	142	538	142

Hitec XL	Nitrate Salt	120	500	120
Caloria HT 43	Mineral Hydrocarbon	-12	315	-12 (pour point)
Therminol VP-1	Mixture of Biphenyl and Diphenyl Oxide	12	400	12 (crystallization point)
Therminol 59	Synthetic HTF	-45	315	-68 (pour point)
Therminol 66		0	345	-25 (pour point)
Dowtherm Q	Synthetic Oil	-35	330	n/a
Dowtherm RP	Synthetic Oil	n/a	330	n/a

### 3.10.3. Capacidad de almacenamiento

Otro punto importante en el diseño de una planta lo constituye las horas de almacenamiento que el sistema de almacenamiento puede proporcionar. En este trabajo se analizará esta variable de forma que se puedan obtener los máximos ingresos de la planta generadora eléctrica.

Con todo ello, se irá variando el número de horas de almacenamiento para encontrar el equilibrio entre la capacidad de almacenamiento y los costes generados por dicho sistema. Los valores entre los que oscilará este parámetro serán entre 2-9h y también se verán los resultados para 0h y así ver la influencia del sistema de almacenamiento.

### 3.10.4. Múltiplo Solar

La energía solar térmica presenta un obstáculo en la fase de diseño de cara a asegurar la demanda térmica ya que existe la posibilidad de un sobredimensionamiento en el que se desperdicie la energía. En consecuencia, el múltiplo solar constituye un parámetro crucial a la hora del diseño de la planta.

El múltiplo solar representa la relación entre la potencia solar térmica producida por el campo solar y la potencia requerida por el bloque de alimentación en las condiciones del punto de diseño. Esta última potencia térmica requerida es la que hace funcionar el ciclo a la potencia nominal.

$$SM_{\text{punto de diseño}} = \frac{Q_{\text{térmica campo solar}}}{Q_{\text{térmica bloque de potencia}}}$$

La potencia del bloque de potencia se mantendrá constante a diferencia de la potencia que aportará el campo solar que cambiará en función de la cantidad de bucles de colectores cilindro-parabólicos.

En resumen, el múltiplo solar aporta una idea del sobredimensionamiento del campo solar respecto del bloque de potencia. En la siguiente imagen se presenta una gráfica de la potencia térmica respecto de la hora diaria donde es posible apreciar dicho sobredimensionamiento.

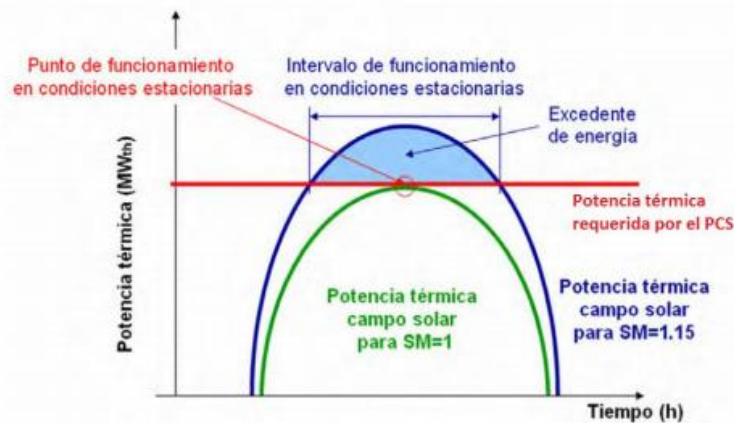


Figura 45. Gráfica múltiplo solar [56]

Teniendo en cuenta que los costes relativos al campo solar constituyen una parte importante de la instalación, determinar un tamaño adecuado de la central resulta un punto importante. El incremento del múltiplo solar aumenta la energía generada por la central (contando con almacenamiento suficiente), pero también provoca una subida de los costes de instalación reduciendo así su competitividad frente a otras tecnologías. La selección del múltiplo solar supondrá entonces una vía de optimización para incrementar la rentabilidad de la planta [57].

### 3.10.5. LCOE

Un indicador de gran utilidad para comparar tanto diferentes tecnologías de producción de energía como alternativas de diseño en una concreta es el coste normalizado de la electricidad (LCOE). Este parámetro representa el coste del kWh producido en la central diseñada.

A pesar de que el valor del LCOE lo aporta la herramienta SAM, la expresión de cálculo del mismo se obtiene despejando el LCOE del valor actual neto de inversión quedando de la siguiente forma:

$$LCOE = \frac{Inv + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1 + TIR)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1 + TIR)^t}} \left( \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right)$$

Donde:

- Inv: se define como la inversión inicial.
- Mt: es el mantenimiento previsto para el año t.
- TIR: Tasa Interna de Retorno o tasa de descuento.
- Et: es la energía generada durante ese año.
- n: vida útil de la planta, 25 años.

Dentro de este parámetro se ofrecen dos valores en el software SAM:

LCOE real: emplea un valor constante del euro ajustado a la inflación. Apropiado a largo plazo.

LCOE nominal: emplea el valor actual del euro. Apropiado a corto plazo.

Los analistas optan por realizar los análisis utilizando el LCOE nominal para los proyectos de colectores cilindro parabólicos[58]. Por ello, en este trabajo, se realizará el estudio en función de dicho parámetro.

#### *3.10.6. Procedimiento*

A la hora de analizar la influencia del fluido de almacenamiento, capacidad de almacenamiento y el múltiplo solar se van a seguir una serie pasos donde se escogerá el fluido más adecuado y los valores óptimos de las horas de almacenamiento y el múltiplo solar. Con ello, el camino seguido es el siguiente:

- Elección del fluido de almacenamiento: en primer lugar, se realizarán simulaciones con los datos disponibles de la central Andasol 1 para determinar el fluido que menor LCOE aporta.
- Combinación horas de almacenamiento y múltiplo solar: el siguiente paso consistirá en realizar simulaciones con el fluido escogido e ir cambiando tanto las horas de almacenamiento como el múltiplo solar para determinar la combinación con menor LCOE.



## 4. RESULTADOS

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones donde se realiza un estudio paramétrico para analizar la influencia de las siguientes variables: fluido de transferencia de calor de almacenamiento, múltiplo solar y capacidad de almacenamiento.

### 4.1. Efecto del fluido caloportador de almacenamiento

El inicio de las simulaciones estará marcado por el objetivo de seleccionar el fluido de transferencia de calor óptimo para el proceso de almacenamiento. Para ello, se han introducido todos los datos disponibles de la central Andasol 1 que se han explicado en el capítulo 3 *Modelado con SAM* para los diferentes fluidos facilitados por la herramienta. Los resultados de dicha simulación se presentan a continuación.

Tabla 7. LCOE (€/kWh) para los diferentes fluidos.

Fluido de almacenamiento	LCOE
Hitec Solar	0,175
Caloria HT 43	0,176
Hitec XL	0,175
Therminol Vp 1	0,176
Hitec	0,175
Dowtherm Q	0,176
Dowtherm RP	0,176
Therminol 59	0,176
Therminol 66	0,176
Sin almacenamiento	0,187

A continuación, para aportar un carácter más visual a los resultados se han graficado por un lado todos los valores de esta tabla y por otro los valores correspondientes a los fluidos. De esta manera se pretenden ver las diferencias con respecto al caso sin almacenamiento y entre los fluidos estudiados.

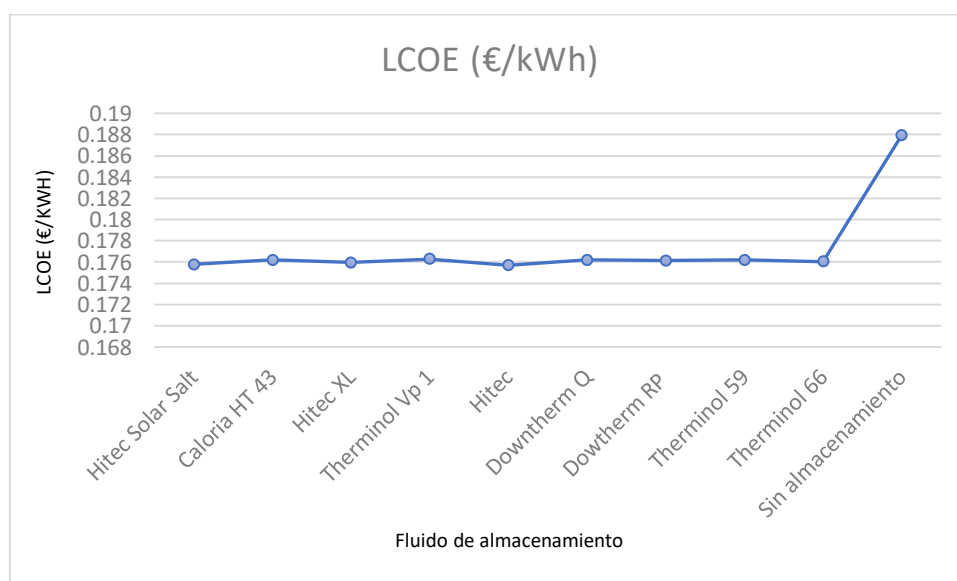


Figura 46. Gráfico LCOE con y sin almacenamiento

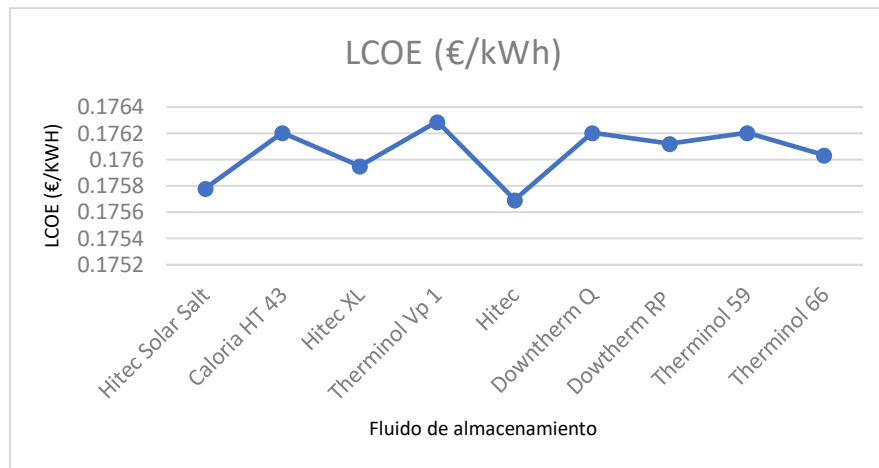


Figura 47. Gráfico LCOE para cada fluido de almacenamiento

En primer lugar, cabe mencionar que los valores obtenidos son razonables con respecto a los que se esperan de plantas de concentración solar 0.15-0.238 €/kWh [59]. Además, se puede observar que las sales fundidas (Hitec Solar Salt, Hitec XL y Hitec) ofrecen los mejores valores de LCOE siendo el Hitec el que presenta el menor coste con un valor de 0,175695 €/kWh. A pesar de ello, la diferencia del Hitec con respecto al Therminol Vp 1, fluido que peor LCOE presenta, es del 0.34% lo cual a priori no representa una diferencia sensible.

En última instancia, se añadió una simulación de lo que sería la planta sin almacenamiento para ver la influencia del mismo. De esta manera, se ha podido comprobar que existe una diferencia apreciable entre instalar almacenamiento con fluido Hitec y no instalar el sistema ya que el LCOE aumenta en un 6.97%.

Otras diferencias entre los fluidos propuestos por SAM se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Parámetros de almacenamiento de cada fluido.

	Volumen disponible de HTF ( $\times 10^3 m^3$ )	Volumen de tanque ( $\times 10^3 m^3$ )	Diámetro de tanque (m)	Calor estimado perdido (MWt)	Densidad (kJ/kg)
Hitec Solar	13,86	14,93	36,85	0,646	1871,85
Caloria HT 43	20,63	22,22	44,95	0,857	643,15
Hitec XL	13,91	14,97	36,91	0,648	1956,48
Therminol Vp 1	20,75	22,34	45,08	0,860	764,29
Hitec	13,66	14,71	36,58	0,640	1828,58
DOWtherm Q	20,60	22,18	44,92	0,856	721,02
DOWtherm RP	19,09	20,56	43,24	0,810	790,93
Therminol 59	19,88	21,41	44,12	0,834	714,31
Therminol 66	18,41	19,83	42,47	0,790	779,69

En lo relativo a la generación de energía también se pueden observar diferencias entre los fluidos disponibles del programa y en el caso de la central sin almacenamiento. Con ello, se presentan a continuación los resultados obtenidos en formato tabla.

Tabla 9. Producción anual.

Fluido de almacenamiento	Producción anual (GWh e)
Hitec Solar	174,462
Caloria HT 43	174,089
Hitec XL	174,356
Therminol Vp 1	174,005
Hitec	174,560
Dowtherm Q	174,046
Dowtherm RP	174,180
Therminol 59	174,029
Therminol 66	174,217
Sin almacenamiento	119,431

En sintonía con el anterior apartado se facilitan los datos de la tabla graficados para ver las diferencias tanto entre fluidos y sin almacenamiento como entre fluidos exclusivamente.

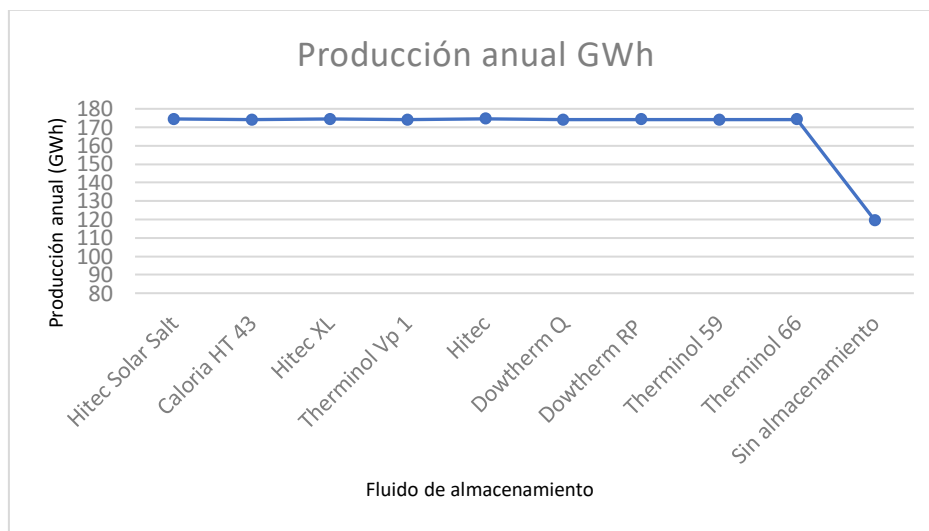


Figura 48. Comparación de la producción anual de cada fluido con respecto al caso sin almacenamiento

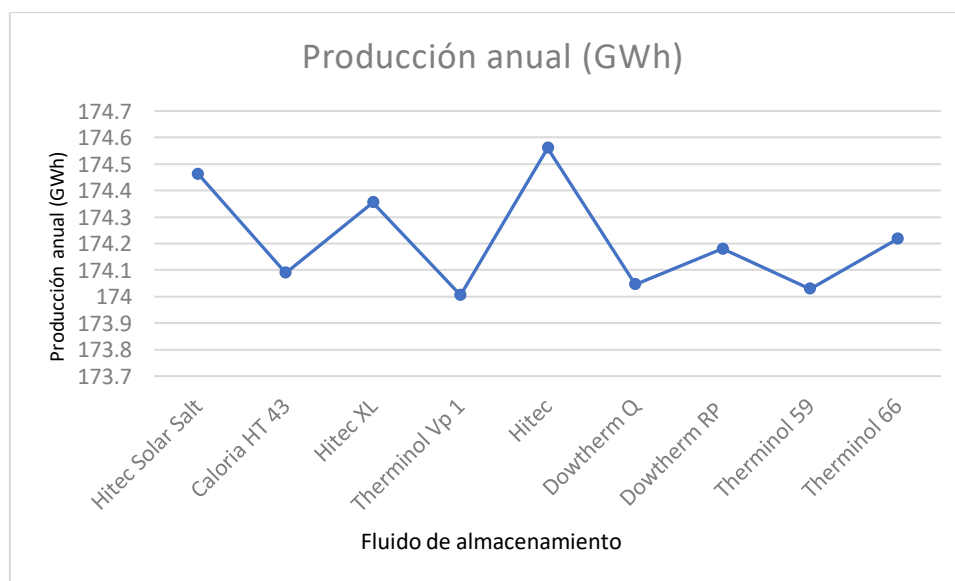


Figura 49. Comparación de la producción anual de cada fluido

De los resultados se puede concluir que son razonables ya que se ha obtenido una producción anual cercana a 175 GWh que es similar a los 180 GWh que produce Andasol 1 [60]. Por otro lado, analizando los valores de producción anual se puede apreciar que no existe una gran diferencia entre el Hitec y el Therminol Vp1 (fluido con menor producción) ya que con este último se reduce un 0.32% la generación de energía anual. En cambio, la disminución de la producción de energía provisto de sistema de almacenamiento con el fluido Hitec y sin sistema de almacenamiento adquiere un valor de 31.58 %. Dicha cifra aporta una idea de la importancia de instalar un sistema de almacenamiento para obtener una mayor producción.

Otra variable relacionada con la producción anual es la protección del sistema de almacenamiento frente a la congelación. En la siguiente tabla se pueden ver las necesidades energéticas exigidas por cada fluido de almacenamiento para evitar el cambio de estado de líquido a sólido.

Tabla 10. Protección del sistema de almacenamiento contra congelación.

Fluido de almacenamiento	Protección TES (GWh e)
Hitec Solar	1,919
Caloria HT 43	2,422
Hitec XL	1,953
Therminol Vp 1	2,470
Hitec	1,910
Dowtherm Q	2,427
Dowtherm RP	2,302
Therminol 59	2,386
Therminol 66	2,235
Sin almacenamiento	0

En el siguiente gráfico se puede apreciar que el fluido que menores necesidades de protección requiere es el Hitec. Este parámetro también favorece que con este fluido se obtengan mayores producciones anuales.

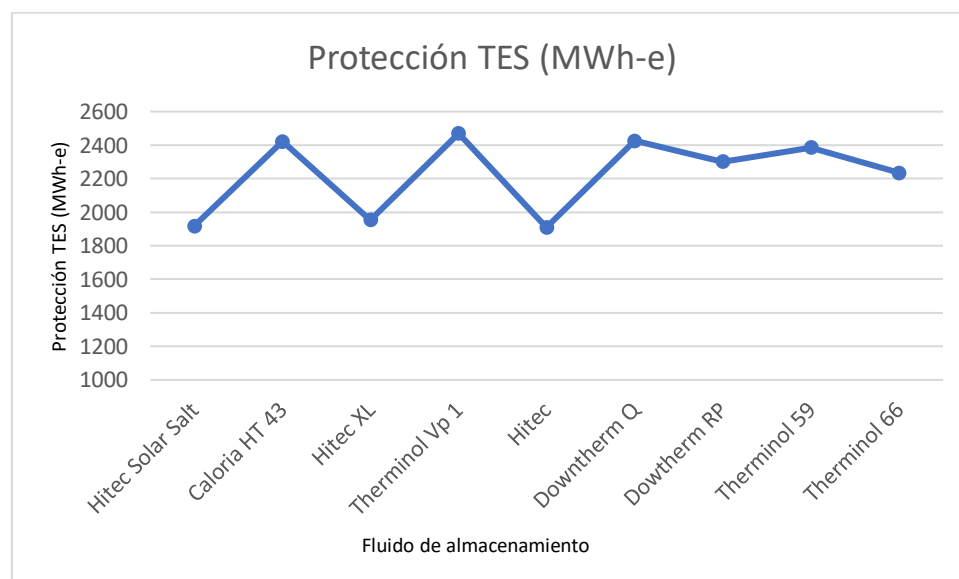


Ilustración 50. Necesidades de protección frente a congelación de cada fluido

## 4.2. Optimización de la capacidad de almacenamiento y el múltiplo solar

Una vez escogido el fluido de almacenamiento óptimo, se han realizado simulaciones variando la capacidad de almacenamiento y el múltiplo solar para determinar qué condiciones proporcionan un LCOE menor. A mayores, se facilita otra tabla con las producciones anuales en cada caso de forma que se pueda apreciar las diferencias prescindiendo de almacenamiento y conforme aumenta el múltiplo solar y la propia capacidad de almacenamiento.

Tabla 11. LCOE (€/kWh) variando Horas de almacenamiento y Múltiplo solar

Capacidad de almacenamiento (h)										
SM	0	2	3	4	5	6	7	7,5	8	9
1,6	0,182	0,174	0,172	0,172	0,175	0,176	0,178	0,180	0,181	0,185
1,7	0,185	0,175	0,173	0,173	0,173	0,174	0,176	0,177	0,179	0,182
1,8	0,189	0,177	0,174	0,173	0,173	0,174	0,175	0,176	0,177	0,179
1,9	0,193	0,181	0,177	0,175	0,175	0,175	0,175	0,176	0,177	0,178

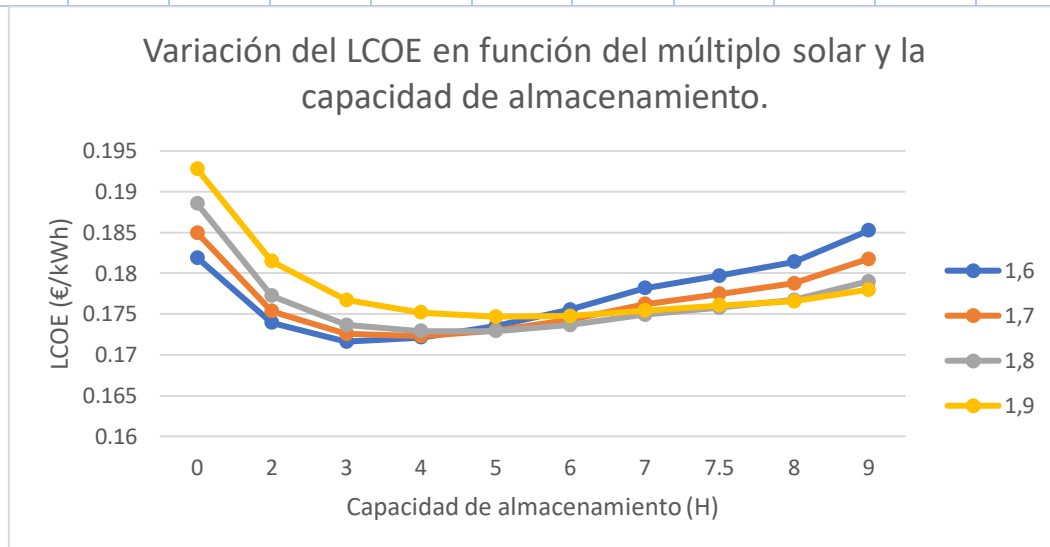


Figura 51. Variación del LCOE en función del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento

Después de realizar las simulaciones, cuyos resultados se presentan tanto en la tabla como en la gráfica se pueden apreciar los siguientes aspectos reseñables.

- Utilización del sistema de almacenamiento: en la tabla se puede observar que el LCOE para valores bajos de capacidad de almacenamiento (0, 2, 3 y 4) aumenta a medida que es mayor el MS pues se desaprovecha el sistema de almacenamiento. En cambio, para capacidades de almacenamiento mayores (7, 7,5, 8 y 9) el LCOE baja a medida que sube el múltiplo solar ya que se aprovecha el sistema de almacenamiento.

- Valor óptimo: en este caso el valor óptimo obtenido es de 0,171615 €/kWh y se obtiene para una capacidad de almacenamiento de 3h y un múltiplo solar de 1.6.

En última instancia, cabe mencionar que a pesar de obtenerse el valor óptimo de LCOE para 3h y 1.6 de múltiplo solar existen valores aceptables del coste de producción de energía para mayores capacidades de almacenamiento y múltiplo solar. Por lo tanto, en caso de haber un condicionante relacionado con la producción anual requerida no carecen de interés estas

opciones en las que se incrementan las variables comentadas. En contra, se pueden observar las carencias tanto de producción como de coste de producción de energía que presentan las situaciones en las que no se recurre a almacenamiento.

A continuación, se presentan los datos de las producciones anuales para las diferentes capacidades y múltiplo solar.

Tabla 12. Producción anual (GWh-e).

SM	Capacidad de almacenamiento (h)									
	0	2	3	4	5	6	7	7,5	8	9
1,6	116,125	134,193	142,358	148,297	153,375	157,824	161,526	163,156	164,578	166,993
1,7	117,775	136,876	145,485	152,051	157,708	162,724	167,159	169,004	170,845	173,956
1,8	119,452	139,599	148,852	155,858	162,152	167,713	172,702	174,957	177,152	180,899
1,9	120,645	140,420	150,507	158,069	164,787	170,944	176,495	179,006	181,526	186,146

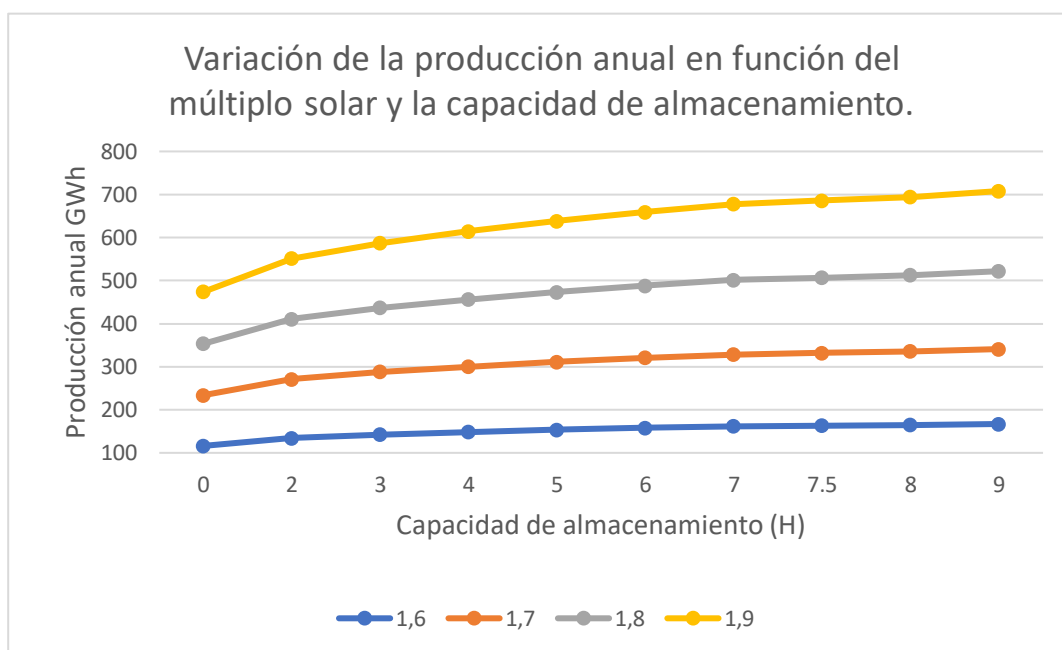


Figura 52. Variación de la producción anual en función del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento

Después de realizar esta gráfica relacionada con la producción anual en función del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento, se puede observar como a medida que aumenta la capacidad de almacenamiento se hacen más sensibles las diferencias entre la energía producida por los distintos múltiplos solares.

A continuación, se presentan las características de la planta escogida.

Tabla 13. Resultados de la planta diseñada.

Medida	Valor
Producción anual de red eléctrica	142,36 GWh e
Protección de congelación anual	1,59 GWh e
Protección anual de congelación de TES	1,55 GWh e
Protección anual de congelación del campo	0,04 GWh e

Factor de capacidad	32.8%
Salida bruta de energía del ciclo de potencia	161,30 GWh e
kWh/kW el primer año	2.876
Conversión bruta a la red	88.3%
Uso anual de agua	33 962 m <sup>3</sup>
LCOE (Nominal)	0.171615 €/kWh
LCOE (Real)	0.139145 €/kWh
Valor actual de red	203 M€
IRR	NaN
IRR logrado al año	25
IRR al final del proyecto	NaN
Coste capital de red	231,52 M€
Capital	288,05 M€
Tamaño de deuda	56 ,53 M€

En cuanto al coste total, se ha obtenido un valor de 288 M€ que no dista demasiado de los 260 M€ presupuestados en un inicio para dicha planta[60].

Los costes de la instalación se presentan a continuación.

Tabla 14. Desglose de costes de la planta.

Coste de emplazamiento	457 800 m <sup>2</sup>	23,8 €/ m <sup>2</sup>	10,90 M€
Campo solar	457 800 m <sup>2</sup>	127,5 €/ m <sup>2</sup>	58,37 M€
Sistema HTF	457 800 m <sup>2</sup>	66,3 €/ m <sup>2</sup>	30,35 M€
Almacenamiento	433 MWht	66,3 €/kWht	28,71 M€
Reserva fósil	55 MWe	51 €/kW e	2,81 M€
Planta	55 MWe	722,5 €/kW e	39,74 M€
Balance de la planta	55 MWe	89,25 €/kW e	4,91 M€
	Subtotal		175, 79 M€
Contingencias			12,31 M€
Coste directo total			188,1 M€
Coste indirecto total			32,31 M€
Coste total instalado			220,41 M€
Coste total estimado por capacidad de red			4 408,2/kW

### 4.3. Optimización de la producción y el múltiplo solar

Como bien se ha comentado en el apartado 4.5, el múltiplo solar representa el sobredimensionado de una instalación respecto al punto de funcionamiento nominal. De esta forma, valores superiores a uno supondrán un excedente de energía en el punto de diseño. El exceso de energía posibilita hacer uso del sistema de almacenamiento, permitiendo una mayor gestionabilidad de la central ya que de este modo se puede hacer un uso diferido de la energía térmica absorbida. El aumento de la gestionabilidad se traduce en mayor independencia entre la generación de energía eléctrica y la disponibilidad del recurso solar. Otro factor que interviene en la selección del múltiplo solar es la energía rechazada. Este concepto se refiere al exceso de energía captado por el campo solar que no es posible almacenar al encontrarse

saturada su capacidad de almacenamiento. Con todo ello, se da la presencia de un óptimo entre el aumento de producción que supone incrementar el múltiplo solar y los costes asociados al mayor tamaño del campo.

Con todo lo anterior, se va a realizar una gráfica para las 3h de almacenamiento ya que fue en esta capacidad donde se obtuvo un valor menor valor de LCOE en las simulaciones.

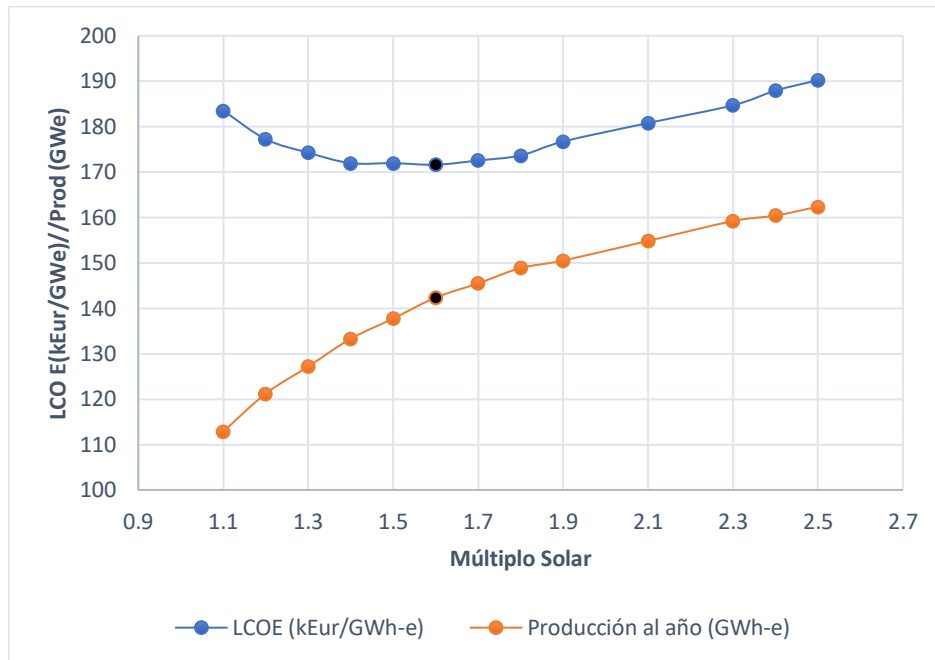


Figura 53. Gráfica LCOE y producción anual

Después de ver la gráfica se pueden sacar diferentes conclusiones:

- Poco interés de un MS bajo: para los múltiplos solares con valores más bajos se obtiene un precio de producción de energía bastante alto ya que el uso diferido de la energía se es bajo.
- Óptimo: el valor óptimo se da para un múltiplo solar de 1.6 (puntos negros) ya que es el punto donde se da un menor coste de la generación de energía. Para valores mayores de múltiplo solar se va encareciendo el precio de la generación de energía.



## 5. CONCLUSIONES

### 5.1. Conclusiones generales

En primer lugar, se han introducido las diferentes formas de obtención de energía donde ha quedado de manifiesto la necesidad de optar por fuentes de energía renovables fomentando su desarrollo para reducir la emisión de gases contaminantes. Este aspecto resulta fundamental para el cuidado del planeta que ya está viendo los efectos nocivos del ser humano en la producción de energía (incremento de temperatura, extinción de especies, etc).

A continuación, se ha realizado una revisión de las diferentes energías renovables que se encuentran disponibles y constituyen una opción atractiva tanto a nivel de localización (España) como a nivel de desarrollo. Con ello, se ha optado por analizar las opciones y vías de mejora de la energía solar térmica concentrada ya que resulta interesante por las condiciones climatológicas en España y posee diferentes vías de desarrollo (almacenamiento, selección de fluido de transferencia de calor, etc) para hacerla más competitiva con respecto al resto de energías renovables.

En el siguiente paso, se efectuó una observación del estado del estado del arte de la energía solar térmica concentrada para conocer con mayor profundidad los aspectos relativos a la misma. Dentro de los diferentes tipos de tecnologías empleados para aprovechar la luz solar se pudo apreciar que en la actualidad están cogiendo fuerza las plantas de Torre Central. A pesar de ello, la gran parte de las centrales en España emplean la tecnología de cilindro parabólico y por esta razón se escogió dichos dispositivos de obtención para realizar el estudio de mejora en la producción de la energía. Un factor a tener en cuenta en la construcción de una planta lo representa el tamaño de la misma ya que debe de existir una relación adecuada entre la potencia solar térmica producida por el campo solar y la potencia requerida por el bloque de alimentación en condiciones de diseño (múltiplo solar). Por otro lado, resulta trascendente escoger bien el almacenamiento de la planta ya que este permite evitar la aleatoriedad de la generación de energía, ofreciendo así la posibilidad de suministrar energía en horarios más beneficiosos económicamente. Esto se puede observar en el hecho de que la mayor parte de plantas proyectadas disponen de sistemas de almacenamiento. En consecuencia, se aborda tanto la capacidad de almacenamiento de la planta como el fluido empleado para ello.

Pues bien, para realizar dicho estudio donde se conjuguen tanto aspectos de almacenamiento como de tamaño de planta se ha recurrido al software SAM donde se ha modelado una central solar térmica de concentración con cilindros parabólicos tomando como referencia los datos disponibles de la central Andasol 1. El manejo de esta herramienta se ha incrementado a lo largo del trabajo donde se ha podido apreciar la multitud de variantes que ofrece, así como su utilidad de los resultados que ofrece al simular diferentes procesos. Cabe mencionar, que el uso de este programa ofrece puntos de interés más allá del propio rendimiento de la planta diseñada ya que permite introducir aspectos económicos de la construcción de la planta aportando una visión bastante precisa aspectos como el coste de la producción de la energía en planta, coste total de la instalación, etc.

Como se ha comentado con anterioridad, el procedimiento seguido consiste en modelar una planta solar térmica de cilindros parabólicos tipo e ir variando el fluido de almacenamiento el múltiplo solar, y la capacidad de almacenamiento. De esta forma se ha podido concluir la mejor opción de diseño de la planta. Resulta interesante resaltar que los valores obtenidos son

coherentes con respecto a los que ofrecen el tipo de central objeto de análisis, por lo cual se puede manifestar buen hacer en lo que a introducción de datos se refiere.

Con todo lo descrito, se puede afirmar que el estudio llevado ha permitido profundizar el conocimiento impartido en la asignatura de Tecnología Energética del Máster de Ingeniería industrial. De esta forma, se ha podido observar que las alternativas ofrecidas por las energías renovables resultan un camino interesante para paliar los efectos de la contaminación. Aun así, se ha podido observar cómo estas tecnologías renovables poseen una multitud de alternativas de mejora de las cuales no carece de interés su desarrollo para incrementar su competitividad y reducir la dependencia de las energías basadas en combustibles fósiles.

## 5.2. Conclusiones específicas

De manera más concreta que en el apartado de resultados, se van a exponer conclusiones obtenidas tanto para la elección en primer lugar del fluido de almacenamiento como para selección del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento.

### 5.2.1. Selección del fluido de almacenamiento

De las simulaciones realizadas para seleccionar el fluido más apropiado se pueden llegar a diferentes conclusiones.

Fluido de almacenamiento con mejores prestaciones: de las diferentes opciones el fluido que presenta un LCOE de 0.175695 €/kWh y producción anual de 174.560 GWh-e.

Diferencias entre fluidos de almacenamiento: las diferencias existentes entre los fluidos objeto de estudio en cuanto a LCOE y la producción anual resultan poco representativas, inferiores al 1%.

Diferencias entre fluidos de almacenamiento y planta sin almacenamiento: en este caso existe una diferencia de LCOE apreciable que se acerca al 7%. Y en cuanto al coste de producción de energía, se disminuye en un valor cercano al 32%.

### 5.2.2. Optimización del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento

Una vez realizadas las simulaciones para lograr la optimización del múltiplo solar y la capacidad de almacenamiento, se tienen las siguientes conclusiones:

Combinación óptima: el valor óptimo después de simular es de 0,171615 €/kWh y se da para una capacidad de almacenamiento de 3h y un múltiplo solar de 1.6.

Uso del sistema de almacenamiento: resulta poco adecuado incrementar el múltiplo solar para capacidades bajas ya que se utiliza poco el sistema de almacenamiento. Por el contrario, si resulta interesante incrementar el múltiplo solar para capacidades altas pues sí se aprovecha el sistema.

### 5.2.3. Optimización de la producción y el múltiplo solar

De la optimización de la producción el múltiplo solar cabe comentar los siguientes aspectos:

Escaso interés de un MS bajo: para los múltiplos solares con valores más bajos se obtiene un precio de producción de energía bastante alto ya que el uso diferido de la energía se es bajo.

Valor óptimo: el valor óptimo se obtiene para un múltiplo solar de 1.6 ya que es el punto donde se da un menor coste de la generación de energía.

### 5.3. Líneas futuras

En lo que respecta al apartado de futuras tendencias, se describirán por un lado distintas vías de continuar el trabajo propuesto y por otro las alternativas de desarrollo que posee la energía de concentración solar.

Como primer punto, cabe destacar que el trabajo realizado puede presentar un número casi ilimitado de variantes que aporten diferentes perspectivas acerca de los diferentes tipos de tecnologías y formas de almacenamiento. En relación con dichas variantes se podrían destacar las siguientes.

- Analizar diferentes tipos de tecnologías de concentración solar.
- Analizar las diferencias con otras energías.

A continuación, se presentarán vías de desarrollo para la energía solar térmica que requieren de una mayor profundización.

- Integración en sistemas.
- Uso de ciclos Brayton supercríticos.
- Almacenamiento.



## 6. REFERENCIAS

- [1] F. A. Farret and M. G. Simões, *Integration of Alternative Sources of Energy*. 2006.
- [2] M. B. Hayat, D. Ali, K. C. Monyake, L. Alagha, and N. Ahmed, “Solar energy—A look into power generation, challenges, and a solar-powered future,” *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 3. John Wiley and Sons Ltd, pp. 1049–1067, Mar. 10, 2019, doi: 10.1002/er.4252.
- [3] V. R. G. y G. S. José Ignacio Alonso Montes, Alfonso Fernández Durán, Carlos Jiménez Suárez, Antonio Lecouna Ribot, Francisco Mellado García, José Fabián Plaza Fernández, *Energía Solar Fotovoltaica\_2E5C69a6*. .
- [4] Y. Morillo, “Energía solar fotovoltaica | Qué es, cómo funciona, usos y aplicaciones.” <https://futuroelectrico.com/energia-solar-fotovoltaica/>.
- [5] C. Montoya Rasero *et al.*, “Energía solar fotovoltaica,” *Environ. Pollut.*, vol. 16, no. 3, pp. 262–270, 2017, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.02.016><http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-027571-0.50013-6><http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.012>[www.eoi.es](http://www.eoi.es).
- [6] “Energía solar térmica (Serie Energías renovables) - Alfonso Aranda Usón, Ignacio Zabalza Bribián - Google Libros.” [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=E2LjDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=energía+solar+térmica+introducción&ots=pWCHcxyDPD&sig=DA6cBCiOUe9F1\\_D\\_morfmrSis4#v=onepage&q=energía+solar+térmica+introducción&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=E2LjDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA7&dq=energía+solar+térmica+introducción&ots=pWCHcxyDPD&sig=DA6cBCiOUe9F1_D_morfmrSis4#v=onepage&q=energía+solar+térmica+introducción&f=false) (accessed Jul. 05, 2021).
- [7] “SANEA - GUÍA COMPLETA DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA Y TERMOELÉCTRICA. ADAPTADA AL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE) Y AL NUEVO RITE.” <https://www.sanea.org/curso/5315/GUIA-COMPLETA-DE-LA-ENERGIA-SOLAR-TERMICA-Y-TERMOELECTRICA-ADAPTADA-AL-CODIGO-TECNICO-DE-LA-EDIFICACION-CTE-Y-AL-NUEVO-RITE/> (accessed Aug. 17, 2021).
- [8] J. F. and W. L. Borst, *Essentials of Energy Technology*. .
- [9] P. Puig, M. Jofra, and D. Electricidad, “Energía Solar Fotovoltaica.”
- [10] R. Adib, “RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT DISTRIBUTED RENEWABLE ENERGY FOR ENERGY ACCESS,” 2015, Accessed: Jul. 19, 2021. [Online]. Available: [www.ren21.net/gsr](http://www.ren21.net/gsr).
- [11] “El efecto fotovoltaico :: ECOSISTEMAS DEL SURESTE S.L.” <https://www.ecosistemasdelsureste.com/news/el-efecto-fotovoltaico/> (accessed Jul. 19, 2021).
- [12] P. I. Maldonado, “ACERCAMIENTO A LA ENERGIA SOLAR TERMICA,” *Una Rev. arte y Arquit.*, 2010.
- [13] G. San Miguel and B. Corona, “Economic viability of concentrated solar power under different regulatory frameworks in Spain,” 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.017.
- [14] M. A. Laborde and R. J. J. Williams, *Energía Solar*. 2016.
- [15] J. M. L. Cózar, “Energía Solar Térmica,” *Manuales Energías Renov.*, vol. 4, p. 148, 2006, [Online]. Available: [www.idae.es](http://www.idae.es).

- [16] Q. Wang, G. Pei, and H. Yang, “Techno-economic assessment of performance-enhanced parabolic trough receiver in concentrated solar power plants,” *Renew. Energy*, vol. 167, pp. 629–643, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.11.132.
- [17] H. L. Zhang, J. Baeyens, J. Degr Eve, and G. Cac Eres, “Concentrated solar power plants: Review and design methodology,” 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.01.032.
- [18] M. F. Stuckings and A. W. Blakers, “A study of shading and resistive loss from the fingers of encapsulated solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 59, no. 3, pp. 233–242, 1999, doi: 10.1016/S0927-0248(99)00024-0.
- [19] E. González-Roubaud, D. Pérez-Osorio, and C. Prieto, “Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80. Elsevier Ltd, pp. 133–148, Dec. 01, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.084.
- [20] “Technology Roadmap - Solar Thermal Electricity 2014 – Analysis - IEA.” <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-solar-thermal-electricity-2014> (accessed Jul. 19, 2021).
- [21] W. Fuqiang, C. Ziming, T. Jianyu, Y. Yuan, S. Yong, and L. Linhua, “Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 1314–1328, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.05.174.
- [22] “Central termosolar de Morón de la Frontera | MÁS QUE INGENIERÍA.” <https://masqueingenieria.com/blog/central-termosolar-moron-de-la-frontera/> (accessed Aug. 17, 2021).
- [23] A. Bilal Awan, M. N. Khan, M. Zubair, and E. Bellos, “Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements,” *Sol. Energy*, vol. 211, pp. 1422–1458, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.09.072.
- [24] F. and F. Muller-Steinhagen, Hans Trieb, “Concentrating Solar Power,” in *Introduction to Renewable Energy*, 2004, pp. 149–164.
- [25] D. M. V. Juan ignacio Navarro Falcon, “Aplicación de tecnología solar térmica en procesos industriales - PDF Descargar libre,” 2014. <https://docplayer.es/88920665-Aplicacion-de-tecnologia-solar-termica-en-procesos-industriales.html> (accessed Jul. 19, 2021).
- [26] H. L. Zhang, J. Baeyens, J. Degreève, and G. Cacères, “Concentrated solar power plants: Review and design methodology,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 466–481, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.RSER.2013.01.032.
- [27] K. C. Keith Lovegrove, Wes Stein, John PYe, Richard Meyer, *Concentrating Solar Power Technology*. 2021.
- [28] S. A. Kalogirou, “Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition,” *Sol. Energy Eng. Process. Syst. Second Ed.*, pp. 1–819, 2014, doi: 10.1016/C2011-0-07038-2.
- [29] K. Ravi Kumar, N. V. V. Krishna Chaitanya, and N. Sendhil Kumar, “Solar thermal energy technologies and its applications for process heating and power generation – A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 282, p. 125296, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.125296.

- [30] S. A. Kalogirou, “Solar thermal collectors and applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 231–295, Jan. 2004, doi: 10.1016/J.PECS.2004.02.001.
- [31] K. S. Reddy and G. Veershetty, “Viability analysis of solar parabolic dish stand-alone power plant for Indian conditions,” 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.09.034.
- [32] D. Barlev, R. Vidu, and P. Stroeve, “Innovation in concentrated solar power,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 95, no. 10, pp. 2703–2725, Oct. 2011, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2011.05.020.
- [33] S. Ferrer Martín, “Climatización y ACS en un hotel por medio de energías renovables,” Apr. 2014, Accessed: Jul. 19, 2021. [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/22671>.
- [34] “No Title,” [Online]. Available: <https://suelosolar.com/guia/calefaccion-solar>.
- [35] “SISTEMAS DE ENERGIA SOLAR TERMICA – Calefacción solar piscina, climatización piscina, panel solar piscina.” <https://www.kw-solar.es/?Productos/Calefacción-solar-piscina%2C-climatización-piscina%2C-panel-solar-piscina> (accessed Jul. 19, 2021).
- [36] IDAE, “Mapa Tecnológico: Calor y Frío Renovables Observatorio Tecnológico de la Energía Área Tecnológica: Energía Solar Térmica,” 2012. Accessed: Jul. 19, 2021. [Online]. Available: [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Calor\\_y\\_Frio\\_Renovables\\_Solar\\_01022012\\_global\\_9b166efc.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Solar_01022012_global_9b166efc.pdf).
- [37] “Energía Solar en Procesos de Calefacción Industrial | Textos Científicos.” <https://www.textoscientificos.com/energia/solar/calefaccion-industrial> (accessed Jul. 19, 2021).
- [38] U. Pelay, L. Luo, Y. Fan, D. Stitou, and M. Rood, “Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 82–100, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.RSER.2017.03.139.
- [39] R. Gu Edez, J. Spelling, and B. € Orn Laumert, “Reducing the Number of Turbine Starts in Concentrating Solar Power Plants Through the Integration of Thermal Energy Storage,” 2015, doi: 10.1115/1.4028004.
- [40] U. Herrmann and D. W. Kearney, “Survey of thermal energy storage for parabolic trough power plants,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 124, no. 2, pp. 145–152, May 2002, doi: 10.1115/1.1467601.
- [41] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, “Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 39, no. 4, pp. 285–319, Aug. 2013, doi: 10.1016/J.PECS.2013.02.001.
- [42] R. Sioshansi and P. Denholm, “The Value of Concentrating Solar Power and Thermal Energy Storage,” 2010, Accessed: Jul. 17, 2021. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>.
- [43] H. Zhang, J. Baeyens, G. Cáceres, J. Degreè, and Y. Lv, “Thermal energy storage: Recent developments and practical aspects,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 53, pp. 1–40, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.PECS.2015.10.003.
- [44] D. Fernandes, F. Pitié, G. Cáceres, and J. Baeyens, “Thermal energy storage: ‘How

- previous findings determine current research priorities,” *Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 246–257, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.ENERGY.2012.01.024.
- [45] W.-D. Steinmann, “Thermal energy storage systems for concentrating solar power plants,” *Conc. Sol. Power Technol.*, pp. 399–440, Jan. 2021, doi: 10.1016/B978-0-12-819970-1.00008-6.
- [46] “Guadix - Google Maps.”  
<https://www.google.es/maps/place/18500+Guadix,+Granada/@37.2447928,-3.1208967,14207m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0xd6e2b0012977bf7:0xd7bfa855928f4200!8m2!3d37.3011351!4d-3.1403256?hl=es> (accessed Aug. 31, 2021).
- [47] “ADRASE - Acceso a datos de radiación solar de España - Inicio.”  
<http://www.adrase.com/> (accessed Aug. 31, 2021).
- [48] “Concentrating Solar Power Projects | Concentrating Solar,” 1977, Accessed: Jul. 22, 2021. [Online]. Available: <https://solarpaces.nrel.gov/andasol-1>.
- [49] M. J. Wagner and P. Gilman, “Technical Manual for the SAM Physical Trough Model,” 2011, Accessed: Aug. 31, 2021. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>.
- [50] T. Dow Chemical Company, “DOWTHERM TM A Product Type Synthetic organic heat transfer fluid-Liquid and Vapor Phase Data Applications,” Accessed: Jul. 21, 2021. [Online]. Available: <http://www.dowtherm.com>.
- [51] María José Montes Pita, “ANÁLISIS Y PROPUESTAS DE SISTEMAS SOLARES DE ALTA EXERGÍA QUE EMPLEAN AGUA COMO FLUIDO CALOPORTADOR,” 2008.
- [52] David Alegría Arias, “UNIVERSIDAD DE CANTABRIA ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE MINAS Y ENERGÍA,” 2016.
- [53] R. Barbero, “DESARROLLO DE UN MODELO TEÓRICO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL RENDIMIENTO TÉRMICO EN COLECTORES SOLARES. APLICACIÓN A TECNOLOGÍAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA.,” 2018.
- [54] Golden, “Parabolic Trough Receiver Parabolic Trough Receiver Thermal Performance Thermal Performance Parabolic Trough Workshop,” 2007.
- [55] M. J. Wagner and P. Gilman, “Technical Manual for the SAM Physical Trough Model,” 2011, Accessed: Jul. 23, 2021. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>.
- [56] Laura García Martín, “Estudio comparativo de diferentes tecnologías renovables en un horizonte 2020,” Universidad de Comillas, Madrid, 2016.
- [57] C. A. B. Inostroza, “Optimización de parámetros de diseño de una planta solar de concentración para generación eléctrica considerando distintos escenarios de despacho,” Universidad de Chile, 2018.
- [58] P. Martín Rodríguez Madrid and J. Muñoz Antón, “ESTUDIO Y REVISIÓN CRÍTICA DE DISEÑO DE LA PLANTA SOLAR TERMOELÉCTRICA SOLNOVA 1.”
- [59] C. De Madrid, “GUÍA TÉCNICA DE LA ENERGÍA SOLAR TERMOELÉCTRICA



GOBIERNO DE ESPAÑA MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y  
COMERCIO La Suma de Todos Guía técnica de la energía Solar Termoeléctrica,”  
2012. Accessed: Jul. 26, 2021. [Online]. Available: [www.madrid.org](http://www.madrid.org).

- [60] “CENTRAL TERMOSOLAR ANDASOL-1 - PDF Free Download.”  
<https://docplayer.es/45309674-Central-termsolar-andasol-1.html> (accessed Jul. 26,  
2021).