



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

MODELADO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CENTRAL ELÉCTRICA TERMO-SOLAR DE 30 MW CON ALMACENAMIENTO DE CALOR

AUTOR: ELISA BLASCO MUÑOZ

TUTOR: JEAN JOSEPH PIERRE ARREGLE

Curso Académico: 2017-18

AGRADECIMIENTOS

“A mi familia, por haberme apoyado durante todo el trabajo
y a mi tutor, por haberme guiado en su realización”

RESUMEN

El presente trabajo es el estudio académico de la optimización de una central termo-solar con almacenamiento térmico situada en una localización turística, de la cual se ha realizado un modelo matemático que se ha implementado en Microsoft Excel. En este documento se describen las características propias de este tipo de centrales, así como el desarrollo matemático que se ha llevado a cabo para la realización del modelo. Se estudian diferentes configuraciones de área de paneles solares y volumen de almacenamiento térmico, para obtener como conclusión del estudio la relación óptima entre dichas variables que satisfaga la demanda eléctrica y minimice la inversión a realizar.

Palabras clave: Central termosolar, Captadores solares, Sistema de almacenamiento, Ciclo de vapor, Optimización, Estudio paramétrico, Energía.

RESUM

El present treball és l'estudi acadèmic de l'optimització d'una central termo-solar amb emmagatzematge tèrmic situada en una localització turística, de la qual s'ha realitzat un model matemàtic que s'ha implementat en Microsoft Excel. En aquest document es descriuen les característiques pròpies d'aquest tipus de centrals, així com el desenvolupament matemàtic que s'ha dut a terme per a la realització del model. S'estudien diferents configuracions d'àrea de panells solars i volum d'emmagatzematge tèrmic, per obtenir com a conclusió de l'estudi la relació òptima entre aquestes variables que satisfaci la demanda elèctrica i minimitzi la inversió a realitzar.

Paraules clau: Central termosolar, Captadors solars, Sistema d'emmagatzematge, Cicle de vapor, Optimització, Estudi paramètric, Energia.

ABSTRACT

The present paper is the academic study of the optimization of a thermo-solar power station with thermal storage located in a tourist location, of which a mathematical model has been made and has been implemented in Microsoft Excel. This document describes the characteristics of this type of plants, as well as the mathematical development that has been carried out for the realization of the model. Different configurations of the area of solar panels and thermal storage volume are studied, in order to obtain, as a conclusion of the study, the optimal relationship between these variables that satisfies the electrical demand and minimizes the investment to be made.

Key words: Solar thermal power plant, Solar collectors, Storage system, Steam cycle, Optimization, Parametric study, Energy.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA

Capítulo 1. Introducción

1.1. Objetivos generales del trabajo.....	5
1.2. Estado del arte de la tecnología termo-solar.....	6
1.2.1. Centrales de receptor central.....	6
1.2.2. Centrales de disco parabólico + motor Stirling.....	7
1.2.3. Centrales de concentrador cilindro parabólico.....	7
1.2.4. Centrales de concentradores lineales Fresnel	8
1.3. Sistema de almacenamiento	9

Capítulo 2. Contexto general del trabajo

2.1. Contexto climatológico	10
2.2. Demanda de la central	12
2.3. Predimensionamiento sistema de almacenamiento	13
2.4. Características del campo solar.....	16
2.5. Características ciclo vapor.....	17
2.6. Variables a definir	20

Capítulo 3. Análisis previo

3.1. Valores estudio paramétrico	21
3.2. Resultados estudio paramétrico	23
3.2.1. Selección de presión de vapor.....	23
3.2.2. Selección gasto másico de aceite	24
3.2.3. Definición del criterio de control del campo solar.....	26

3.3.	Conclusiones análisis previo	28
Capítulo 4. Desarrollo del modelo		
4.1.	Esquema central termosolar	29
4.1.1.	Configuración de los intercambiadores de calor	32
4.1.2.	Limitación de volumen en los tanques	33
4.2.	Metodología de cálculo	34
4.2.1.	Cálculo estacionario	34
4.2.2.	Cálculo transitorio	35
4.3.	Ecuaciones utilizadas en el modelo	36
4.3.1.	Discretización del campo solar	36
4.3.1.	Cálculos ciclo de vapor	36
4.3.2.	Balances de energía en los intercambiadores de calor	37
4.3.3.	Transitorio sistema de almacenamiento	38
Capítulo 5. Resultados generales		
5.1.	Resultados generales.....	41
5.2.	Estudio paramétrico doble. Resultados finales	48
5.2.1.	Objetivos.....	48
5.2.2.	Metodología utilizada	48
5.3.	Conclusiones.....	54
5.3.1.	Conclusiones sobre el trabajo	54
5.3.2.	Conclusiones sobre la metodología	55
Capítulo 6. Referencias		
6.1.	Bibliografía.....	56
6.2.	Temario	56
6.3.	Páginas web.....	56

MODELADO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CENTRAL ELÉCTRICA TERMO-SOLAR DE 30 MW CON ALMACENAMIENTO DE CALOR

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS GENERALES DEL TRABAJO

El presente Trabajo de Final de Grado (TFG) es un trabajo académico, por lo que uno de los principales objetivos es la demostración de los conocimientos adquiridos a lo largo del grado y la ampliación de los mismos.

El trabajo se basa en el estudio termodinámico y el análisis energético de una central termo-solar para la producción de energía eléctrica, estudio que se realiza con la ayuda de la aplicación informática *Microsoft Excel*, en la que se desarrolla un modelo ofimático. Mediante la agrupación de las ecuaciones características de este tipo de centrales (campo solar, ciclo de vapor, sistema de almacenamiento...) y el conocimiento de las variables termodinámicas para cada estado de presión y temperatura, se pueden llegar a determinar las características de cada punto de la central y desarrollar el modelo para 1 año completo. Esto proporciona una visión muy clara e interesante del comportamiento de este tipo de plantas de producción de electricidad.

La obtención del modelo se ha conseguido mediante la utilización de la aplicación informática *Microsoft Excel*, al que se le han añadido las funciones de *X Steam Tables*, que permiten calcular las propiedades termodinámicas del agua, en estado líquido y vapor.

El propósito final del trabajo es la utilización del modelo informático para determinar la relación óptima existente entre el área de captadores solares que posea una central de características similares a la aquí estudiada y la cantidad de almacenamiento térmico necesario para satisfacer la demanda. Es decir, proporcionar un criterio de selección de área de captadores y volumen de almacenamiento térmico que permita satisfacer la demanda eléctrica y a su vez minimizar la inversión.

El área del campo solar y el volumen necesario de fluido térmico en los tanques de almacenamiento son dos de las variables que más elevan el coste de construcción de una central termo-solar, por ese motivo es importante intentar en la medida de lo posible optimizar la relación entre ambas.

Una vez definida la curva que permitirá conocer la correspondencia entre estas dos variables, será muy útil como herramienta para minimizar la inversión necesaria en la construcción de una central de características similares y para ajustar la producción de energía con la demanda eléctrica.

1.2. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA TERMOSOLAR

En este apartado se pretende introducir al lector en el contexto de las centrales termosolares, dando una explicación global del funcionamiento de estas instalaciones y de las tecnologías disponibles para la producción de electricidad.

En las centrales termo-solares se utiliza un ciclo térmico muy similar al de cualquier planta termoeléctrica convencional, con la principal diferencia de que en las centrales que nos ocupan, la fuente de energía es la radiación solar, que se utiliza para calentar un fluido.

Las centrales eléctricas termo-solares se clasifican en dos grandes grupos, según el número de componentes que transforman la energía solar en energía térmica:

- **Sistemas de receptor central (CRS):** concentran la radiación solar en un punto, y existe sólo un componente para toda la planta. El fluido de trabajo alcanza temperaturas elevadas ($T > 300^{\circ}\text{C}$).
Una de las ventajas de este tipo de centrales es que no requieren fluidos circulando por el campo solar, hecho que simplifica y abarata las plantas.
Hay dos tecnologías que emplean este sistema; las de torre central y los discos parabólicos con motores Stirling.
- **Sistemas de colectores distribuidos (DCS):** la radiación se concentra a lo largo de una línea, y no se alcanzan temperaturas tan altas como en las anteriores ($100^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$).
Las tecnologías que utilizan colectores distribuidos son los concentradores cilindro-parabólicos y los espejos Fresnel.

A continuación se explican con más detalle cada una de las cuatro técnicas de captación solar.

1.2.1. Centrales de receptor central.

Consisten en una serie de grandes espejos orientables, denominados helióstatos, situados entorno a la torre. El receptor transforma la radiación en calor, transfiriéndolo a un fluido, que puede ser aire, agua o sales inorgánicas.



Imagen 1. Central de torre Gemasolar

1.2.2. Centrales de disco parabólico + motor Stirling.

Están compuestas por unidades autónomas conectadas a motores Stirling situados en el foco del disco parabólico. Se alcanzan temperaturas muy elevadas, así como altos rendimientos, gracias a la curva del concentrador y la gran capacidad de concentración. Sin embargo es una tecnología poco madura por el momento.



Imagen 2. Unidad EuroDISH, Plataforma Solar de Almería

1.2.3. Centrales de concentrador cilindro parabólico.

Es la tecnología que se encuentra más avanzada a día de hoy, por ese motivo se ha escogido como la opción que se va a estudiar en este trabajo.

El fluido se introduce en el campo solar a una determinada temperatura y sale por el otro extremo a una temperatura superior. El fluido utilizado suele ser aceite sintético, para evitar problemas de cambio de estado. El calor que absorbe este aceite se transfiere a un circuito de agua, donde se genera el vapor necesario para producir electricidad en la turbina.



Imagen 3. Detalle campo solar Valle 1

1.2.4. Centrales de concentradores lineales Fresnel

La tecnología de espejos Fresnel intenta imitar a los cilindros parabólicos, pero de una manera más económica y sencilla, y con rendimientos más bajos.

Consisten principalmente en un campo de espejos primarios que reflejan la radiación solar a un tubo absorbedor, sobre el que se encuentra un espejo secundario, encargado de concentrar los rayos solares que se hayan desviado de su trayectoria.



Imagen 4. Campo solar Puerto Errado 2

1.3. SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

Una de las principales dificultades que se encuentran al producir energía eléctrica a partir de sistemas que dependen de las condiciones climatológicas, es la de disponer de energía cuando existe un consumo, y no cuando las condiciones meteorológicas sean las adecuadas.

Es necesario hacer una previsión precisa de la electricidad que producirá cada planta, y generarla cuando haya demanda. Para solucionar este inconveniente, se utiliza el almacenamiento de energía, que en las centrales termo-solares siempre es almacenamiento térmico.

La acumulación de energía aumenta la producción de la central; el exceso de energía se utiliza en las horas en las que no existe radiación. También mejora la calidad de la energía, absorbiendo las variaciones de radiación, y estabiliza la operación de la planta, reduciendo los transitorios.

Existen diferentes posibilidades para almacenar la energía térmica, las más importantes se explican a continuación:

Almacenamiento por calor sensible:

Es el más utilizado, se basa en el cambio de temperatura del medio de almacenamiento.

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (1)$$

Este medio puede ser el propio fluido térmico que recorre el campo solar, sales inorgánicas fundidas u hormigón.

En la mayoría de centrales que cuentan con este tipo de tecnologías se suelen utilizar sales inorgánicas o fluido térmico, separadas en dos tanques, uno caliente que almacena las sales procedentes de los colectores, y otro frío en el que se recogen las que proceden del generador de vapor.

Almacenamiento por calor latente:

Esta técnica está basada en el cambio de fase del medio de almacenamiento, que suelen ser sales inorgánicas.

$$Q = \dot{m} * (C_{p_{sólido}} * (T_{fluido} - T_{sólido}) + H_{cf} + C_{p_{líquido}} * (T_{líquido} - T_{fluido})) \quad (2)$$

Con este sistema no se requiere que las sales circulen, lo que reduce el coste de bombeo, y es necesaria menos cantidad de sales para almacenar la misma energía que con el calor sensible, pero todavía está en desarrollo.



Imagen 5. Tanques de almacenamiento de la central de Manchasol

CAPÍTULO 2. CONTEXTO GENERAL DEL TRABAJO

El contenido del trabajo se basa en un estudio previo a un anteproyecto de construcción de una central de producción de energía eléctrica con tecnología termo-solar, en el que a una Ingeniera de la Energía se le solicita un análisis y optimización de la relación existente entre el área de captadores de una central y su volumen de almacenamiento

La planta de producción de energía eléctrica tiene como objetivo satisfacer la demanda de una región turística de Andalucía, donde la demanda de electricidad es mucho mayor en verano. Esta central va a estar ubicada en una zona cercana a un río, de modo que se pueda utilizar el agua que recorre el mismo como sistema de refrigeración.

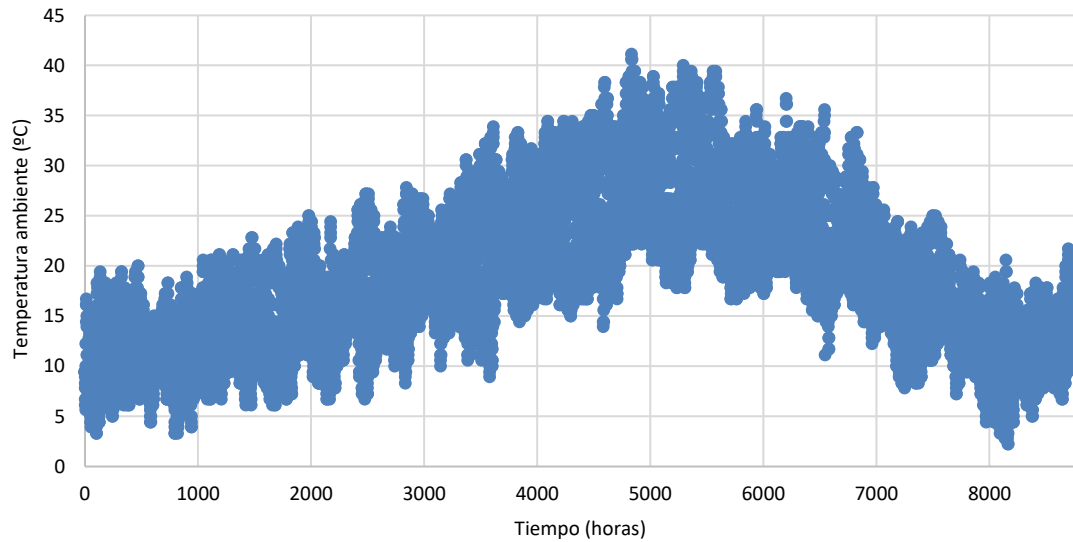
Antes de comenzar con el modelado y el estudio de la central termo-solar, se debe realizar una investigación sobre el contexto en el que va a estar ubicada la central, hay que analizar las características de la localización escogida, qué parámetros será importante conocer y calcular antes de empezar el modelo, la demanda que se debe satisfacer... Para en posteriores apartados definir los criterios que se han escogido para calcular o imponer cada una de las variables necesarias.

2.1. CONTEXTO CLIMATOLÓGICO

En esta situación hipotética se ha decidido ubicar la central en el sur de la península española, concretamente en la provincia de Sevilla, en una localización turística. El principal motivo por el que se ha tomado esta decisión es la cantidad de horas de sol de las que se dispone en el sur de España, particularidad determinante para el correcto funcionamiento de este tipo de centrales.

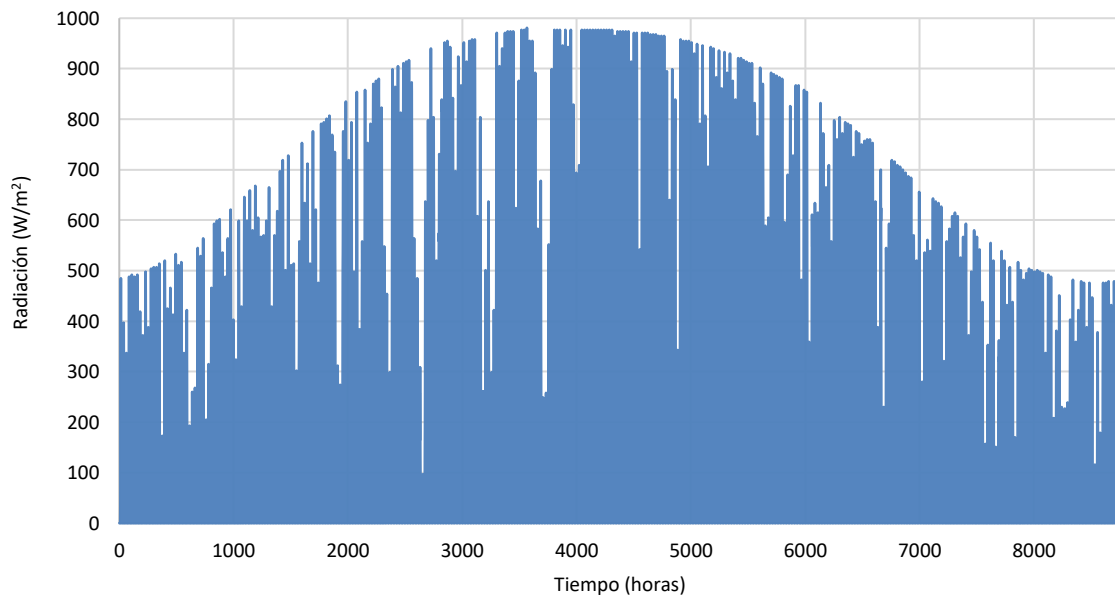
Posteriormente a la selección de la ubicación, se deben buscar los datos climatológicos necesarios para la elaboración del modelo, como la temperatura ambiente y la radiación solar a lo largo de un año. Para ello es necesario contar con una base de datos fiable y precisa para descargar esta información, como por ejemplo la base de datos del programa *EnergyPlus*, que se utiliza para simular y modelar el consumo de agua y energía en edificios, y que cuenta con datos climatológicos de más de 2100 localizaciones en todo el mundo, entre las que se encuentra Sevilla. La información ambiental española a la que se puede acceder desde esta base de datos está agrupada en ficheros *SWEC (Spanish Weather for Energy Calculations)*, inicialmente desarrollados para la utilización del programa de simulación *Calener*.

Se han descargado estos ficheros en formato epw (Energy plus Weather), y tras su conversión a Excel, se han obtenido las siguientes gráficas que ayudan a percibir el comportamiento que la temperatura y la irradiación tienen a lo largo de un año en Sevilla.



Gráfica 1. Evolución de la temperatura ambiente a lo largo de un año en Sevilla

Es importante distinguir entre los conceptos de radiación solar e irradiación. Radiación es un término genérico que se refiere tanto a la potencia como a la energía de la radiación recibida, mientras que el concepto irradiación hace referencia a la energía recibida en un periodo de tiempo determinado y en un área concreta.

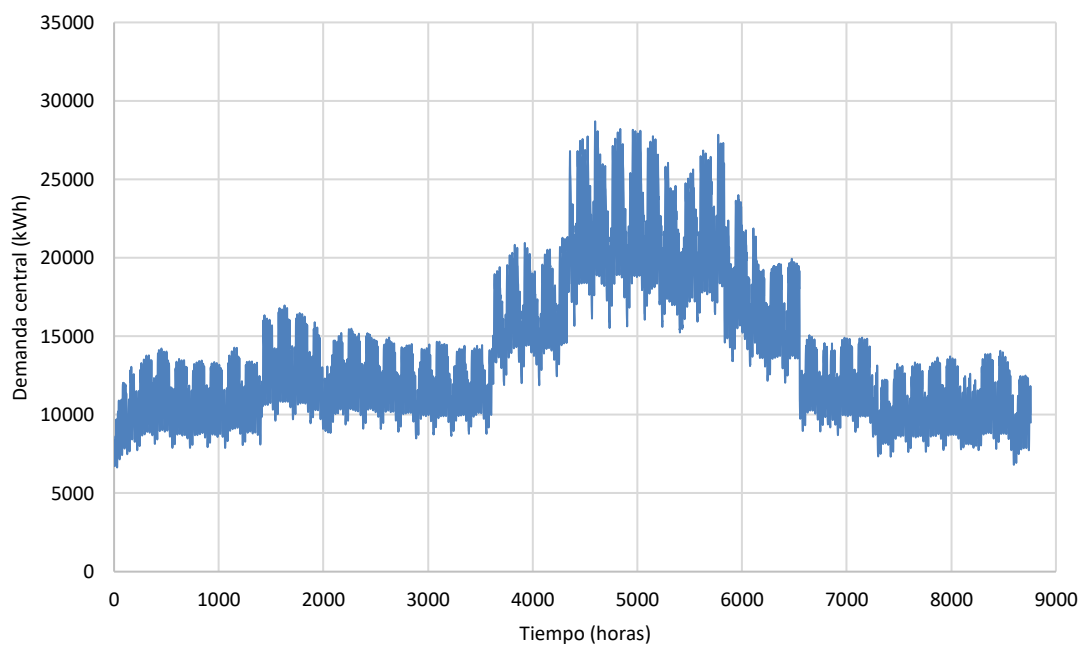


Gráfica 2. Evolución de la radiación solar a lo largo de un año en Sevilla

2.2. DEMANDA DE LA CENTRAL

La ubicación de la central en el territorio español proporciona ventajas también en lo que respecta al cálculo de la demanda eléctrica a satisfacer por la misma. Se puede acceder fácilmente a la información de demanda y producción eléctrica española gracias a la página web de Red Eléctrica Española (REE), de la que se puede descargar la curva de demanda para todo el territorio español, y a partir de esos datos, construir la curva de demanda eléctrica que debe satisfacerse con la central.

La instalación está ubicada en una zona turística, por lo que la demanda de electricidad es mucho mayor en los meses de verano, y se reduce significativamente en los meses de invierno. A partir de la curva de demanda eléctrica de la península se realiza un escalado de los datos y se construye la siguiente curva de demanda para la central termo-solar.



Gráfica 3. Demanda eléctrica central termo-solar

Se observa que la curva de la demanda eléctrica que debe satisfacer la central tiene una forma similar a la curva de la radiación anual, es decir, los meses de mayor demanda eléctrica coinciden con aquellos en los que hay mayores niveles de radiación. Esta particularidad supone que la producción de energía eléctrica a partir de energía solar para satisfacer la demanda es en principio viable.

2.3. PREDIMIENSIONAMIENTO SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

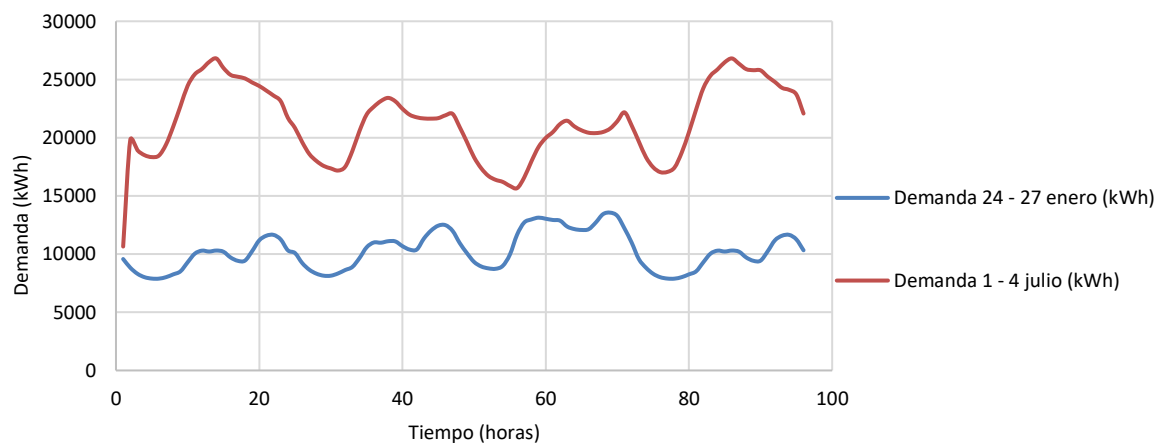
Las características climatológicas de la ubicación escogida y la curva de demanda que se debe satisfacer hacen pensar que, a priori, la central termo-solar podrá funcionar correctamente a lo largo del año, abasteciendo de electricidad a la población.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que por la noche y en los días nublados la central tendrá que seguir produciendo electricidad, aunque no haya aporte solar. Para ello hay que contar con un sistema de almacenamiento térmico, que proporcionará la energía necesaria para cubrir la demanda en las horas en las que no exista radiación, o esta sea insuficiente.

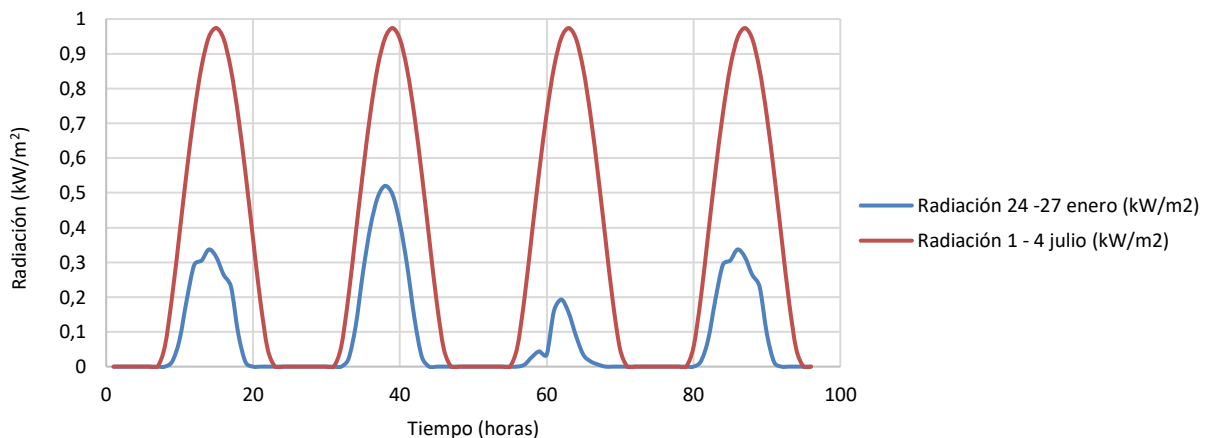
En la central que se va a estudiar se va a implementar un sistema de almacenamiento por calor sensible, utilizando el mismo aceite térmico que circula por los captadores solares.

Para ilustrar mejor la necesidad del almacenamiento térmico, se van a representar la irradiación y la demanda eléctrica para cuatro días de verano con un comportamiento de la radiación solar muy favorable para la producción de electricidad, y para cuatro días de invierno en los que apenas hay aporte solar.

Concretamente se han representado los días del 1 al 4 de julio, en los que la radiación es muy elevada y constante, y del 24 al 27 de enero, en los que apenas hay radiación y ésta es muy variable.



Gráfica 4. Demanda eléctrica días 1-4 julio y 24-27 enero



Gráfica 5. Radiación solar días 1-4 julio y 24-27 enero

Se observa como la demanda eléctrica en invierno es casi la mitad que en verano, por tratarse de una localización muy turística y concentrar la necesidad de electricidad en los meses estivales. En cambio la radiación en los días estudiados de invierno no es la mitad que en los días de verano, si no que en algunos casos llega a ser la tercera parte. Por tanto, los días de invierno son los que más restricciones van a imponer al funcionamiento de la central, teniendo que dimensionar el sistema de almacenamiento de manera que se pueda abastecer la demanda de electricidad en los días más desfavorables del año.

Con el objetivo de adquirir orden de magnitud sobre el volumen de almacenamiento que será necesario disponer en la central, se va a realizar un pre-dimensionamiento de los tanques necesarios. Los resultados se muestran en un esquema en la siguiente página.

Para ello se ha considerado una situación muy desfavorable, en la que no se recibe aporte solar durante tres días seguidos, que bien podría darse en los meses de invierno. Se ha tomado como demanda la correspondiente a los días 24 – 27 de enero, representada en la gráfica 4.

Demanda eléctrica (kWh)	8 000 – 14 000
Rendimiento ciclo vapor	0.3
Δ Temperaturas tanque caliente y frío (°C)	150
Aporte solar	0
Densidad aceite térmico (kg/m³)	850
Calor específico aceite térmico (kJ/kg K)	2.4

Tabla 1. Condiciones consideradas para el pre-dimensionamiento del sistema de almacenamiento

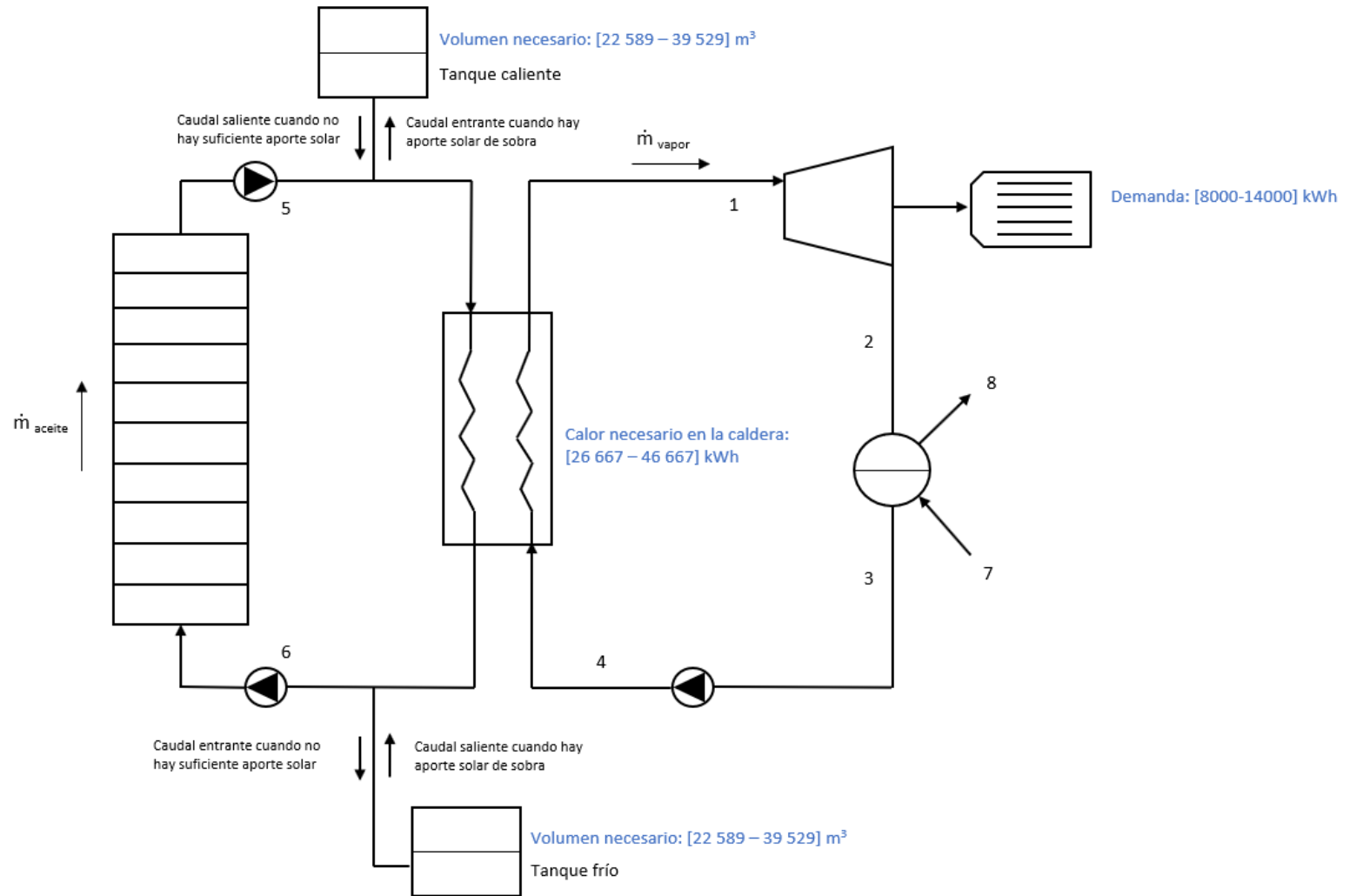
Conociendo el rango en el que varía la demanda eléctrica y el rendimiento del ciclo de vapor, es posible calcular el rango de calor que es necesario aportar en la caldera. Puesto que se han considerado 3 días sin radiación solar significativa, todo el calor deberá ser aportado por el almacenamiento térmico.

El gasto másico de aceite que llega a la caldera se ha calculado con la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{aceite} = \frac{Q_{caldera}}{c_p \cdot \Delta T} \quad (3)$$

Posteriormente se ha calculado la cantidad de aceite que sería necesaria en 3 días, y teniendo en cuenta la densidad, se ha calculado finalmente el volumen.

Los cálculos realizados en este apartado son muy sencillos y no se corresponden con los que luego se implementarán para la realización del modelo de la central termo-solar. Se han utilizado simplemente para conseguir un orden de magnitud sobre el volumen del sistema de almacenamiento.



Esquema 1. Pre-dimensionamiento sistema de almacenamiento. Esquema simplificado de la central termo-solar

Se ha obtenido un volumen de almacenamiento necesario entre 22 600 m³ y 39 600 m³, para satisfacer la demanda eléctrica durante tres días de invierno sin aporte solar.

A continuación se detallan en una tabla los puntos especificados en el esquema anterior, que representa una simplificación de la que posteriormente será la distribución de todos los componentes de la central termo-solar.

Punto	Situación
1	Entrada de vapor a la turbina
2	Salida de agua - vapor de la turbina
3	Salida líquido saturado del condensador
4	Salida líquido de la bomba
5	Salida aceite térmico del campo solar
6	Entrada aceite térmico del campo solar
7	Entrada refrigerante al condensador
8	Salida refrigerante del condensador

Tabla 2. Puntos del esquema simplificado de la central termo-solar

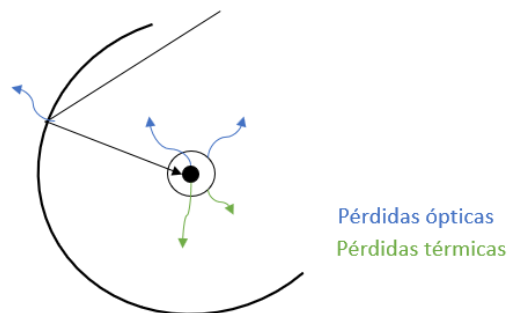
Una vez conocido el orden de magnitud del volumen del almacenamiento y un esquema inicial de la instalación, es necesario definir las características del campo solar y del ciclo de vapor que deberán determinarse antes de comenzar el modelo.

2.4. CARACTERÍSTICAS CAMPO SOLAR

Tal y como se ha mencionado anteriormente, en este trabajo se va a estudiar una central termo-solar en la que los elementos encargados de absorber la radiación procedente del sol son unos captadores cilindro parabólicos, recorridos por aceite térmico.

En este tipo de plantas el foco de calor es muy intermitente, debido a la dependencia de las condiciones ambientales, y no se alcanzan temperaturas tan elevadas como con una caldera convencional. Es por ello por lo que se debe prestar mucha atención al dimensionamiento del campo, y determinar qué variables van a ser importantes a la hora de realizar los cálculos.

En primer lugar se va a definir la ecuación que rige el rendimiento de los captadores solares, a partir de un esquema de la radiación que llega a un colector y las pérdidas ópticas y térmicas que se producen.



Esquema 2. Esquema pérdidas captador solar

El rendimiento asociado a este captador viene definido por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{Q_{neto}}{Q_{aportado}} = \frac{I_r * A * \eta_{opt} - Q_{pérdidas}}{I_r * A} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que las pérdidas térmicas se producen por convección y por radiación, la ecuación que se va a utilizar para calcular el rendimiento de los captadores, una vez desarrollada, es:

$$\eta = \eta_{opt} - \frac{1}{F_c * I_r} (k_1 (T_{fluido} - T_{ext}) + k_2 (T_{fluido} - T_{ext})^2) \quad (5)$$

Siendo η_{opt} el rendimiento óptico, F_c el factor de concentración, k_1 y k_2 los coeficientes de pérdidas térmicas.

Para el campo solar que nos ocupa se han seleccionado unos captadores solares con las siguientes características, valores típicos de colectores cilindro parabólicos.

Rendimiento óptico	Factor de concentración	Coeficientes de pérdidas térmicas	
		k_1 (W/m ² K)	k_2 (W/m ² K)
0,85	60	7,5	0,06

Tabla 3. Características captadores solares

Como puede verse en la ecuación del rendimiento de los captadores, también es necesario conocer la irradiación que incide sobre el captador solar y la temperatura exterior. Ambas variables se han obtenido de acuerdo a lo explicado en apartados anteriores.

Para garantizar el correcto funcionamiento del campo solar, se ha de estudiar a partir de qué nivel de radiación solar se consiguen rendimientos de los captadores positivos.

Por último, para poder calcular las temperaturas de entrada y salida del campo, así como el calor absorbido por el fluido, es de vital importancia determinar el gasto másico de aceite que va a circular por los captadores. Para ello habrá que tener en cuenta las características del ciclo de vapor, por lo que este estudio se realizará en el siguiente capítulo.

2.5. CARACTERÍSTICAS CICLO VAPOR

El ciclo termodinámico que sigue cualquier central de producción de electricidad mediante una turbina de vapor es el ciclo Rankine, aplicación del conocido ciclo ideal de Carnot.

Es importante tener claro todas y cada una de las etapas del ciclo termodinámico que opera en la planta antes de empezar su análisis.

1ª Etapa: La bomba de agua aumenta la presión del fluido hasta la presión de trabajo de la turbina.

2ª Etapa: El economizador empieza a calentar el agua, posteriormente en el vaporizador se produce el cambio de fase y en el recalentador se consigue vapor sobrecalentado. El calor es aportado por el campo solar.

3ª Etapa: El vapor se expande en la turbina, produciendo trabajo, que será convertido en energía eléctrica en el alternador.

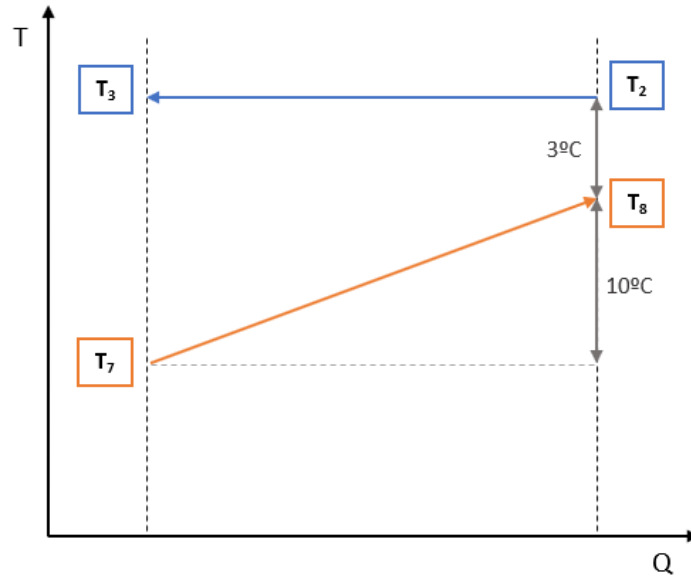
4ª Etapa: A la salida de la turbina, el fluido, mezcla de agua y vapor, es introducido en el condensador para realizar el cambio de fase a líquido y volverlo a introducir en la bomba.

En las centrales termo-solares se pueden utilizar diferentes versiones del ciclo de Rankine; simple, con recalentamiento y con regeneración. Para el caso a estudiar se ha escogido un ciclo de Rankine simple.

En primer lugar es importante determinar la presión a la que trabaja el condensador. Se ha decidido utilizar un condensador refrigerado con agua de río, es decir, con una temperatura de operación prácticamente constante.

Para calcular la temperatura del condensador y la presión a la que opera, se han tomado las siguientes consideraciones:

- La temperatura del refrigerante que entra al condensador (T_7) es 5°C superior a la temperatura atmosférica.
- La bomba del refrigerante trasiega un caudal tal, que la diferencia de temperaturas entre el refrigerante que entra y el que sale es de 10°C.
- La diferencia de temperaturas entre el refrigerante caliente que sale y el caudal que viene de la turbina y se introduce en el condensador es de 3 grados.



Esquema 3. Hipótesis sistema de condensación

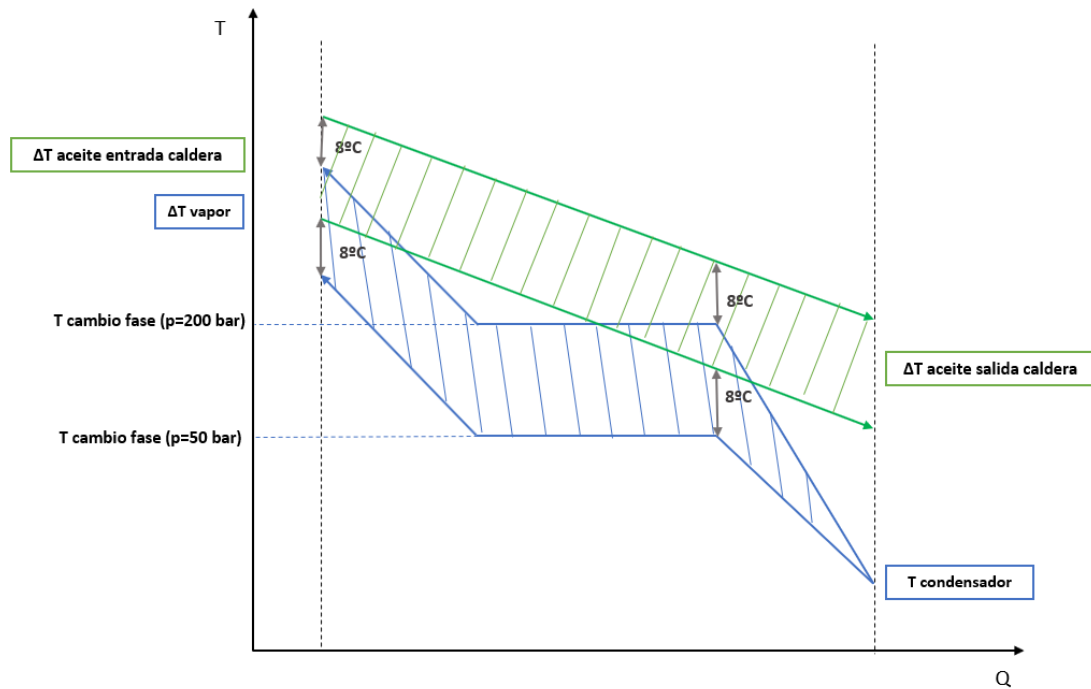
Se ha considerado una temperatura atmosférica de 25°C, por lo que las características del condensador son las siguientes:

Tcondensador = T₂ = T₃	38 °C	Presión condensador = p₃ = p₄	0.086 bar
---	-------	--	-----------

Tabla 4. Características condensador

Dos de las variables más trascendentes a la hora de calcular los puntos característicos de un ciclo Rankine son la temperatura y la presión de vapor, es decir, estado en el que el vapor entra en la turbina y comienza su expansión. Una presión y temperatura elevadas aumentan el rendimiento del ciclo notablemente, pero disminuye el rendimiento del campo solar, al tener que trasegar un fluido a mayor temperatura, produciéndose más pérdidas. Por ello se han de escoger unas condiciones de entrada a la turbina tal que el rendimiento global de la instalación sea aceptable en todo momento.

El intercambiador de calor es el elemento en el que mejor se puede analizar el comportamiento de la presión y la temperatura de vapor, por ello se muestra a continuación un esquema en el que se han resaltado los rangos entre los que podrían variar estas dos características:



Esquema 4. Rangos de temperaturas y presiones en la caldera

Al tratarse de un intercambiador líquido-líquido se ha tomado como aceptable la suposición de que la variación óptima de temperaturas entre la entrada del fluido caliente y la salida del fluido frío, es de 8°C. Con el fin de que el fluido térmico no salga del intercambiador a una temperatura menor que la del condensador, se establece que la diferencia entre la temperatura de cambio de fase del agua a la presión de vapor y la temperatura del aceite térmico ha de ser también de 8°C.

Se ha considerado el rango de presiones [50 – 200]bar por ser la máxima y mínima presión a las que trabajan las turbinas de vapor.

Tal y como puede deducirse del esquema, una vez determinada la temperatura del condensador, se debe seleccionar la presión a la que va a trabajar la turbina. Como se ha comentado anteriormente, la presión de trabajo del ciclo influye en el rendimiento del campo solar, por lo que para determinarla es necesario estudiar el campo solar y el ciclo de vapor conjuntamente.

2.6. VARIABLES A DEFINIR

Una vez analizado el contexto general en el que se va a situar la central termo-solar, se han determinado una serie de variables y criterios de control que hay que definir antes de iniciar el modelado de la instalación:

- Gasto másico de aceite que recorre el campo solar (\dot{m} aceite).
- Presión de vapor a la que trabaja la turbina (p_1).
- Nivel de radiación mínimo para el cual los rendimientos de los captadores solares son positivos, y por tanto, es posible activar las bombas que trasiegan el aceite térmico.

El criterio que se va a utilizar para definir las variables mencionadas es el de maximizar el rendimiento global de la instalación.

$$\eta = \eta_{\text{campo solar}} * \eta_{\text{ciclo vapor}} \quad (6)$$

Este estudio se va a realizar en el siguiente apartado, y una vez finalizado, permitirá comenzar a modelar el comportamiento de la central termo-solar.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS PREVIO

En el presente capítulo se va a llevar a cabo un estudio paramétrico para definir el gasto másico de aceite, la presión de vapor, y la irradiación mínima que maximizan el rendimiento global de la central.

Para ello se va a estudiar una disposición de la central más sencilla que el modelo completo, concretamente la mostrada en el esquema 1. Las hipótesis que se han tomado son las siguientes:

- No se ha considerado almacenamiento térmico.
- No se ha impuesto una demanda de electricidad.
- Se ha estudiado en estado estacionario.

Teniendo definidos los criterios y las hipótesis a utilizar en este estudio paramétrico, en primer lugar se van a definir los valores que se han tomado para realizarlo.

3.1. VALORES ESTUDIO PARAMÉTRICO

Persiguiendo el objetivo de definir los criterios que permitan escoger un gasto másico de aceite y una presión de vapor adecuados para la instalación que se va a estudiar, se han seleccionado los siguientes valores de radiación, temperatura de entrada del aceite al campo, presión de vapor, y caudal de aceite.

Radiación solar:

Se han escogido 17 valores que abarcan todo el rango de funcionamiento de la radiación solar:

0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----	------	-----

Tabla 5. Valores radiación estudio paramétrico, en kW/m²K

Temperatura de entrada de aceite al campo solar (T_6):

Se han seleccionado 9 temperaturas típicas de entrada del aceite al campo solar, aunque posteriormente en el modelo de la central esta temperatura se calculará para cada hora. En esta etapa previa se ha simplificado imponiendo una serie de valores.

200	220	230	240	250	260	270	280	290
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 6. Valores T_6 estudio paramétrico, en °C

Presión de vapor a la entrada de la turbina (p_1):

Los valores escogidos se corresponden con el rango de presiones aceptable de trabajo de una turbina de vapor, entre 50 y 200 bar.

50	70	90	110	130	150	200
----	----	----	-----	-----	-----	-----

Tabla 7. Valores p_1 estudio paramétrico, en bar

Gasto másico de aceite:

Para seleccionar los valores de gasto másico que se van a emplear en el estudio paramétrico se han realizado unos sencillos cálculos.

En primer lugar se ha calculado la cantidad de calor que absorbería un captador solar ideal de 1 m² cuando sobre él incide la siguiente radiación:

0.1	0.15	0.25	0.35	0.5	0.65	0.7	0.8
-----	------	------	------	-----	------	-----	-----

Tabla 8. Valores de radiación para el cálculo del gasto másico de aceite, en kW/m²K

Se ha utilizado la siguiente expresión:

$$Q = I * A * \eta \quad (7)$$

En segundo lugar, suponiendo una diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del campo solar de 200°C, se han calculado los gastos másicos de aceite, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (8)$$

Con la que se obtienen los siguientes resultados:

0.20833	0.3125	0.52083	0.72917	1.04167	1.35417	1.45833	1.6667
---------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	--------

Tabla 9. Valores de gasto másico de aceite estudio paramétrico, en g/s/m²

Por último, se fijan los siguientes parámetros del campo solar y del ciclo de vapor, tanto para el estudio paramétrico como para el modelo:

Calor específico aceite térmico (kJ/kg K)	2,4
Rendimiento turbina	0,9
Rendimiento alternador	0,9

Tabla 10. Parámetros fijos del modelo

Para cada valor de radiación, se calculan los puntos termodinámicos del ciclo y el rendimiento global de la instalación para cada valor de temperatura de entrada al campo solar, para cada valor de presión y para cada valor de gasto másico de aceite. Por tanto, se estudian un total de 8568 casos.

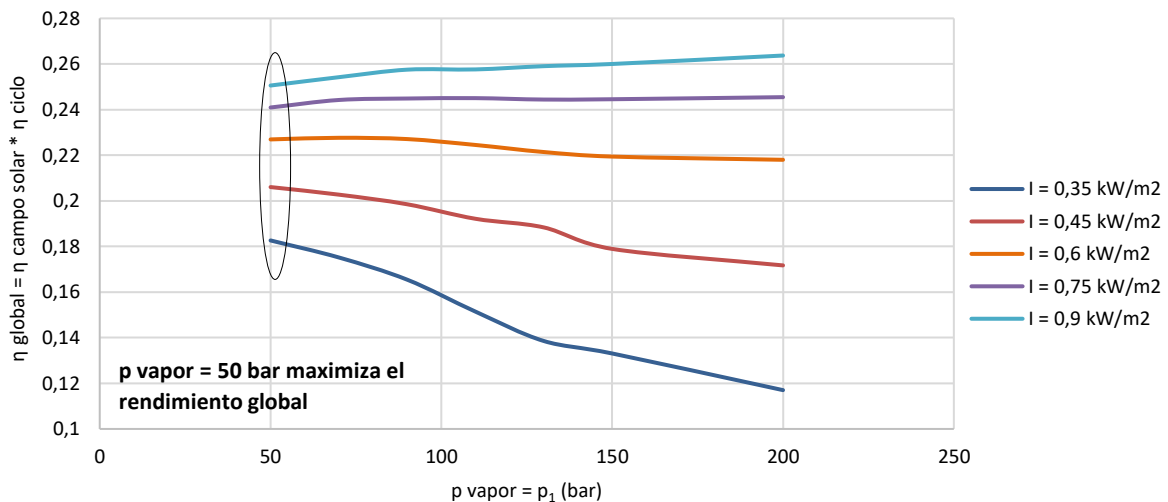
3.2. RESULTADOS ESTUDIO PARAMÉTRICO

Las ecuaciones y expresiones utilizadas en este estudio previo son una versión simplificada de las utilizadas posteriormente en el modelado, de manera que no se van a reflejar en este apartado, si no que se va a proceder a mostrar las gráficas y conclusiones a las que se ha llegado tras el análisis de los 8568 casos estudiados.

Se recuerda que el objetivo es determinar una serie de variables para maximizar el rendimiento global de la central termo-solar, de manera que todas las gráficas y esquemas que se muestran a continuación persiguen ese propósito.

3.2.1. Selección de presión de vapor

En primer lugar se han representado los valores del rendimiento global máximo que se obtienen con cada valor de presión de vapor, para todo el rango de temperatura de entrada de aceite al campo solar y gasto másico del mismo. Se han representado estos valores para diferentes niveles de radiación.



Gráfica 6. Estudio paramétrico. Selección presión vapor

Para elevadas radiaciones solares, el rendimiento aumenta muy ligeramente conforme se incrementa la presión de vapor, mientras que a medias y bajas radiaciones, el rendimiento desciende con el aumento de la presión a la entrada de la turbina.

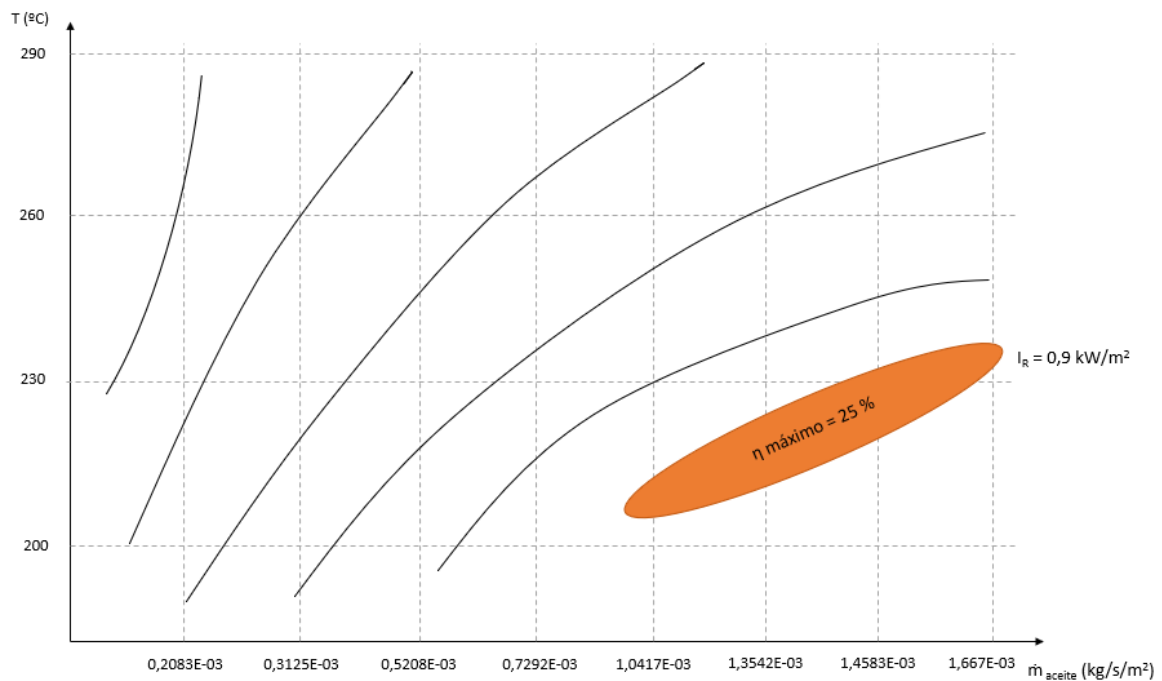
La central va a trabajar la mayor parte del año con radiaciones medias y bajas, y tan sólo en momentos puntuales y horas del día muy concretas con valores de radiación tan elevados como los que se muestran en la gráfica. Para estos últimos valores, el aumento del rendimiento es

prácticamente insignificante, por tanto se establece que la presión óptima de trabajo de la turbina es de **50 bar**.

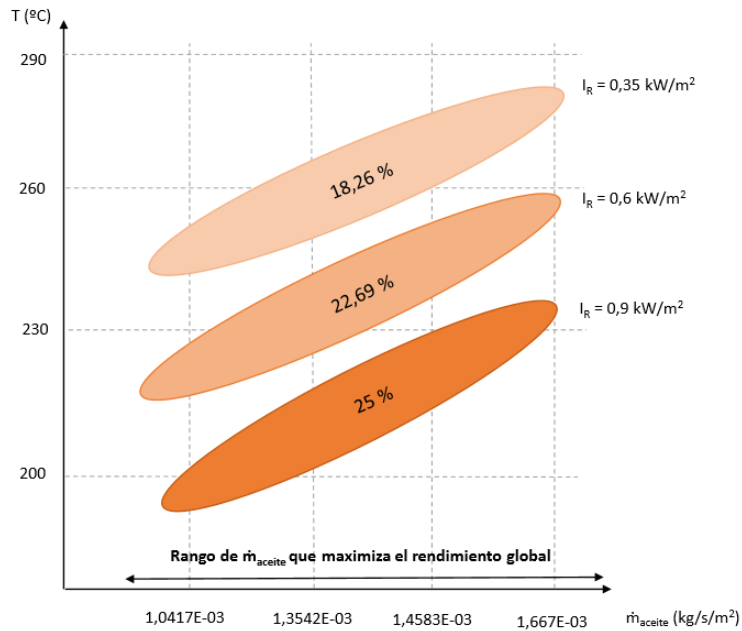
3.2.2. Selección gasto másico de aceite

Una vez seleccionada la presión de vapor a la que va a trabajar el ciclo, se estudia cómo evoluciona el rendimiento de la central a dicha presión. Para ello se han representado las líneas de isorendimiento global en una gráfica, en función de la temperatura de entrada del aceite al campo y el gasto másico.

Inicialmente se ha representado la evolución del rendimiento para un valor de radiación elevado, $0,9 \text{ kW/m}^2$, y posteriormente se muestra una gráfica con las zonas de isorendimiento máximo para 3 valores de radiación, uno alto, medio y bajo.



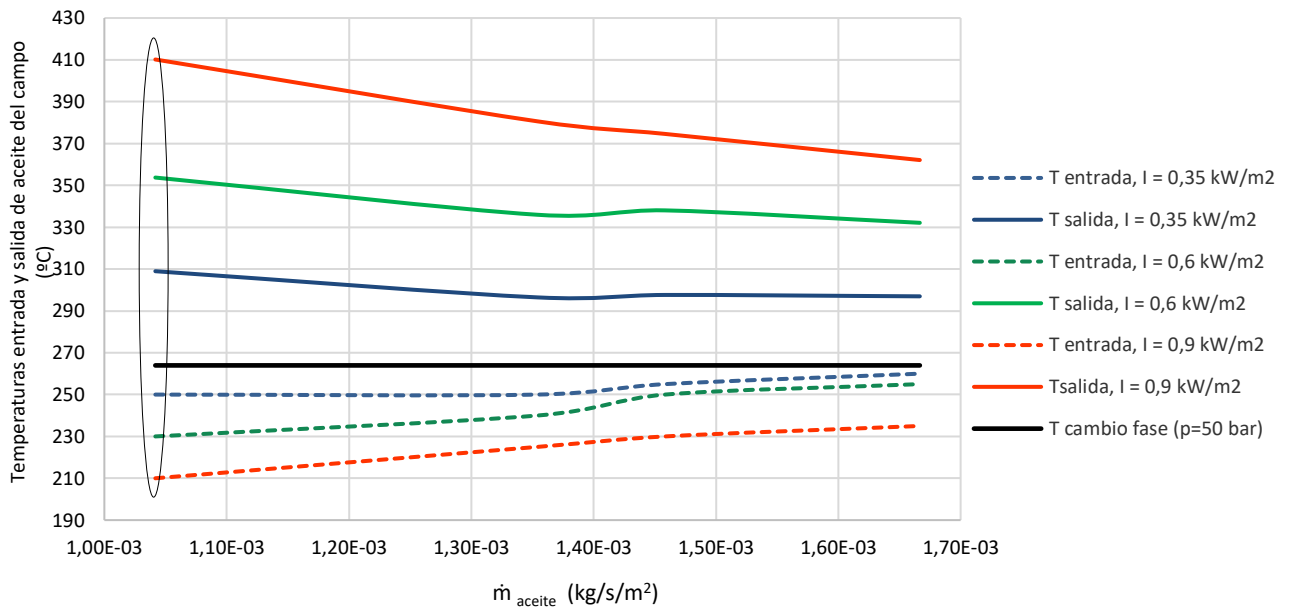
Gráfica 7. Estudio paramétrico. Líneas de isorendimiento para $I_R = 0,9 \text{ kW/m}^2$



Gráfica 8. Estudio paramétrico. Zonas de isorendimiento máximo

Según se puede apreciar por las zonas de isorendimiento calculadas, la variación del gasto másico de aceite entre $1,0417\text{E}-03$ y $1,667\text{E}-03 \text{ kg/s/m}^2$ no afecta significativamente al rendimiento obtenido, por lo que podría escogerse cualquier valor comprendido en ese rango.

Con la finalidad de seleccionar el gasto másico más adecuado, se calculan las temperaturas de entrada y salida del aceite al campo solar, para cada uno de los valores de gasto del rango y para diferentes niveles de radiación.



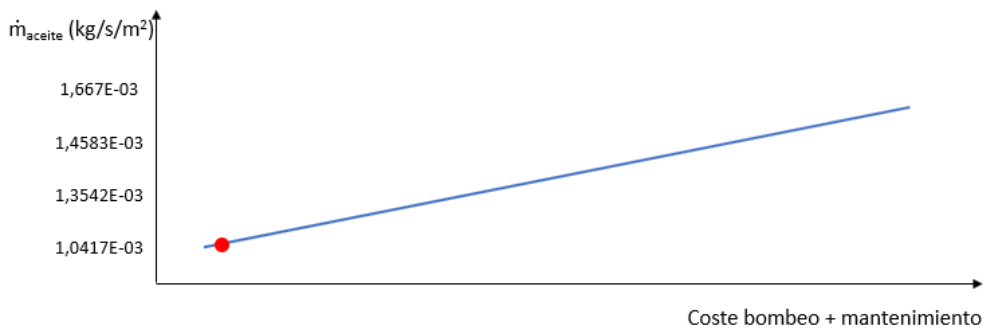
Gráfica 9. Estudio paramétrico. Selección gasto másico de aceite

Se observa que conforme aumenta la radiación, la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida también se incrementa. Esto ocurre para todos los valores de gasto másico de aceite, pero la variación de temperatura entre entrada y salida es mayor cuanto menor es el gasto.

Llegados a este punto se plantean los siguientes escenarios:

Escoger un valor de gasto másico reducido, con una diferencia de temperaturas muy elevada. Como consecuencia, una temperatura de salida del aceite del campo solar muy variable, que provocará estrés térmico y mayores pérdidas, pero también reducirá el volumen de almacenamiento necesario, y con ello el coste. Minimizar el caudal de aceite que circula por el campo reducirá el trabajo que deben realizar las bombas, así como la presión que deberán soportar los tubos que recorren los captadores solares. Esta situación hará que disminuya el rendimiento de campo solar, pero aumente el del ciclo de vapor.

Por otro lado, escoger un gasto másico más elevado supondría obtener una temperatura menor a la salida del campo, con menos pérdidas térmicas, pero a su vez incrementaría el volumen de almacenamiento necesario, el trabajo a realizar por las bombas y la presión en los captadores. Aumentaría el rendimiento del campo y disminuiría el del ciclo de vapor.

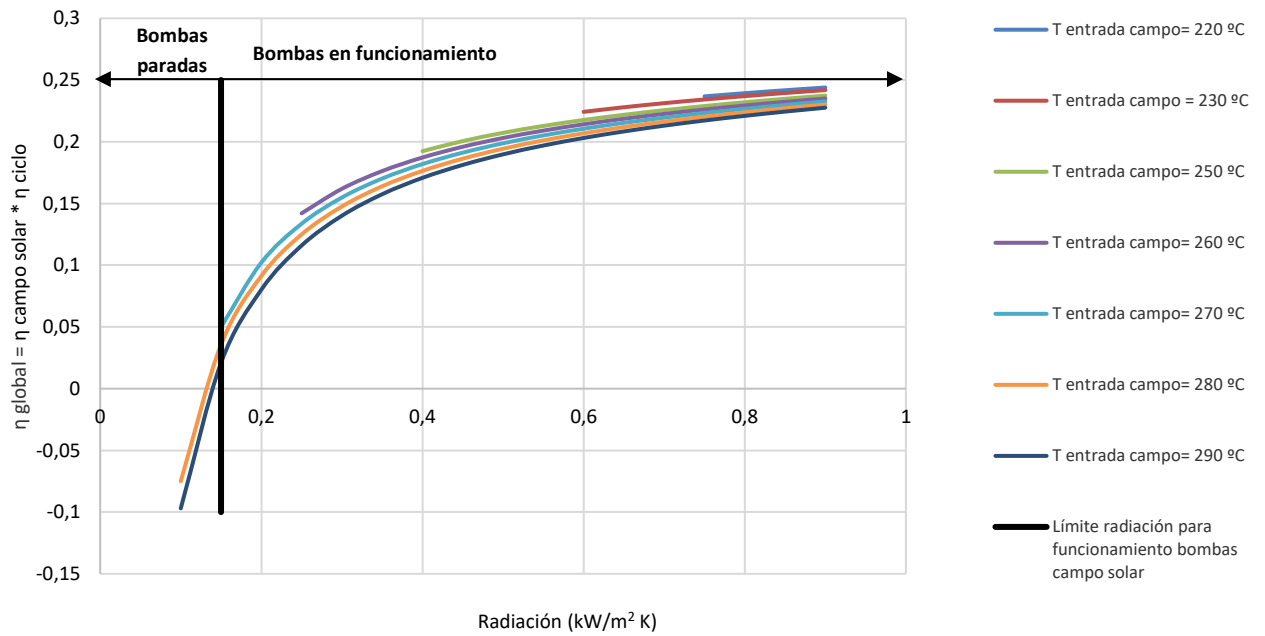


Gráfica 10. Estudio paramétrico. Selección gasto másico de aceite

Por todo lo expuesto anteriormente se ha considerado que la mejor solución es trabajar con un gasto másico de aceite lo más pequeño posible, es decir **1.0417E-03 kg/s/m²**.

3.2.3. Definición del criterio de control del campo solar

Una vez fijada la presión de vapor y el gasto másico de aceite, se analiza la evolución del rendimiento global en función de la temperatura de entrada y la radiación, para determinar a partir de qué valor de radiación es aconsejable poner en funcionamiento las bombas que trasiegan el aceite térmico por el campo solar.



Gráfica 11. Estudio paramétrico. Definición criterio de control del campo solar

Tal y como se deduce de la gráfica, cuando la radiación solar sea mayor que **0,150 kW/m²**, se hará circular caudal de aceite por los captadores. Cuando la radiación sea menor, todo el calor aportado en la caldera provendrá del almacenamiento.

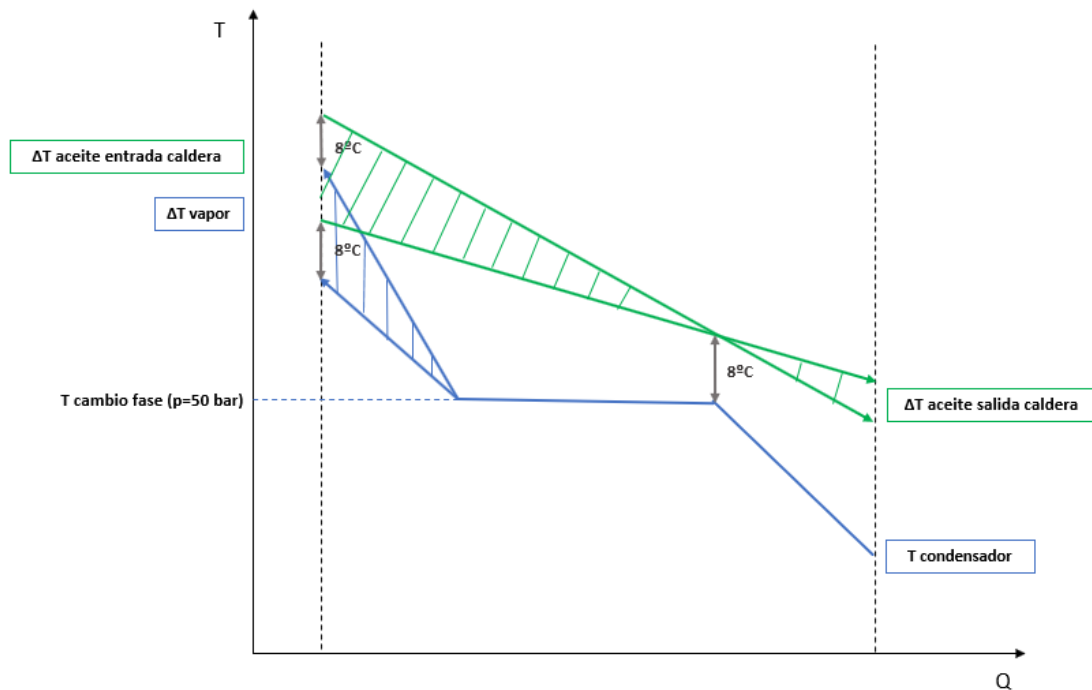
3.3. CONCLUSIONES ANÁLISIS PREVIO

Mediante el estudio paramétrico, se han determinado las características de diseño y control más importantes para el modelado de la central termo-solar, que se resumen a continuación:

Características	Consecuencias
Presión vapor = 50 bar	Temperatura cambio fase = 263,9°C
Gasto másico aceite = 1.0417E-03 kg/s/m ²	Bomba caudal fijo
Radiación mínima funcionamiento campo solar = 0.150 kW/m ²	

Tabla 11. Características definidas mediante el estudio paramétrico y sus consecuencias

Puesto que ya se ha definido la presión a la que trabaja la turbina, es posible rehacer el esquema nº4, en el que se muestra el intercambio de calor que tiene lugar en la caldera, ahora con los rangos más definidos:



Esquema 5. Resultados estudio paramétrico. Intercambiador de calor

Una vez definidas las características de diseño y control más significativas de la central, es posible comenzar con el modelado del sistema, que se realizará en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DEL MODELO

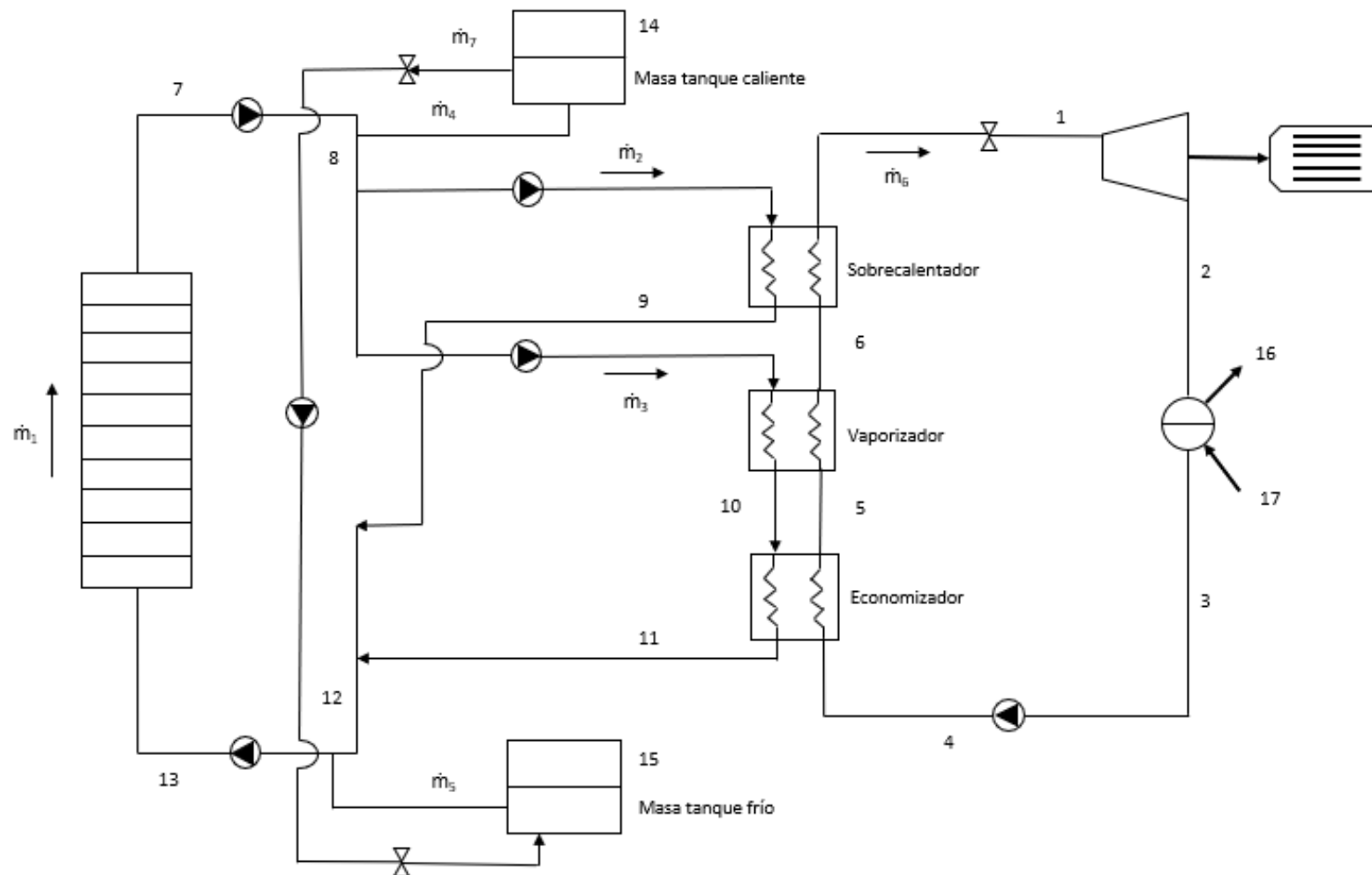
Para la realización de un buen modelado de la central termo-solar, es imprescindible visualizar y definir el esquema de la misma, donde se especifique la distribución de los equipos y los puntos termodinámicos del sistema.

Posteriormente se explicará y justificará la metodología de cálculo que se ha seguido, y finalmente se mostrarán todas las ecuaciones utilizadas en el modelo.

4.1. ESQUEMA CENTRAL TERMOSOLAR

En el capítulo 2 se ha mostrado un esquema simplificado de la instalación, para poder realizar un análisis previo. Para el modelo que se va a desarrollar, este esquema ha de completarse, teniendo en cuenta que el intercambiador de calor y el sistema de almacenamiento son sistemas más complejos de lo que se había mostrado anteriormente.

En la siguiente página se muestra el esquema definido para la central termo-solar con mayor resolución, y a continuación se explican los ítems añadidos al mismo.



Esquema 6. Distribución de equipos y puntos termodinámicos de la central termo-solar a modelar

A continuación se resumen en unas tablas todos los puntos mostrados en el esquema, para una mayor comprensión del sistema.

Punto	Presión	Temperatura	Entalpía	Entropía	Estado
1	p_1	T_1	h_1	s_1	Vapor sobrecalentado
2	p_2	T_2	h_2	s_2	Agua - Vapor
3	p_3	T_3	h_3	s_3	Líquido saturado
4	p_4	T_4	h_4	s_4	Líquido
5	p_5	T_5	h_5	s_5	Líquido saturado
6	p_6	T_6	h_6	s_6	Vapor saturado
16	p_{16}	T_{16}	h_{16}	s_{16}	Líquido
17	p_{17}	T_{17}	h_{17}	s_{17}	Líquido

Tabla 12. Puntos del ciclo de vapor

Punto	Temperatura	Situación
7	T_7	Salida del aceite térmico del campo solar
8	T_8	Mezcla aceite térmico que sale del campo con el que entra/sale del tanque caliente.
9	T_9	Salida aceite térmico del sobrecalentador
10	T_{10}	Salida aceite térmico del vaporizador
11	T_{11}	Salida aceite térmico del economizador
12	T_{12}	Mezcla aceite procedente del sobrecalentador y economizador
13	T_{13}	Entrada del aceite térmico al campo solar
14	T_{14}	Aceite situado en el tanque caliente
15	T_{15}	Aceite situado en el tanque frío

Tabla 13. Puntos del circuito de aceite térmico

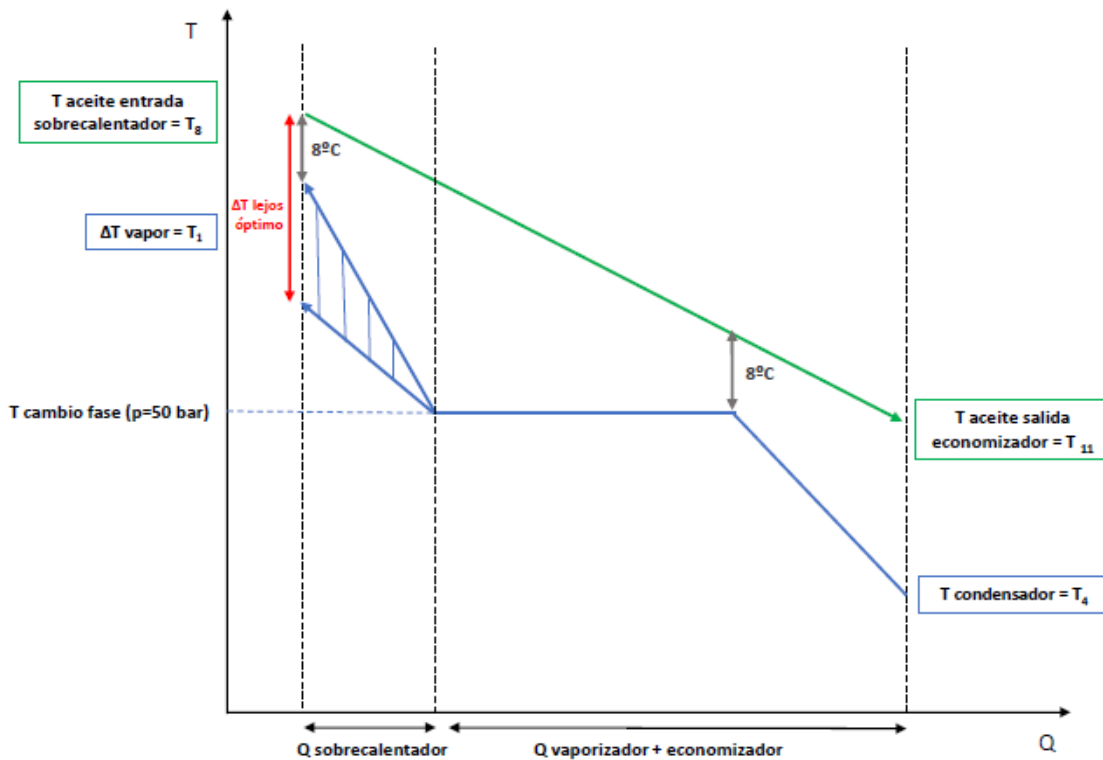
Gasto másico	Definición
\dot{m}_1	Aceite térmico que recorre el campo solar = $1.04167E-03 \text{ kg/s/m}^2$
\dot{m}_2	Aceite térmico sobrecalentador
\dot{m}_3	Aceite térmico vaporizador + economizador
\dot{m}_4	Aceite térmico entrante/saliente del tanque caliente
\dot{m}_5	Aceite térmico entrante/saliente del tanque frío
\dot{m}_6	Agua - vapor
\dot{m}_7	Aceite térmico sobrante del tanque caliente

Tabla 14. Gastos másicos del sistema

4.1.1. Configuración de los intercambiadores de calor

Inicialmente se había considerado un intercambiador de calor aceite – agua vapor en un solo bloque, donde el cambio de fase del agua y el sobrecalentamiento del vapor tienen lugar en el mismo equipo. Todo el gasto másico de aceite procedente del campo solar o del almacenamiento recorre el único intercambiador.

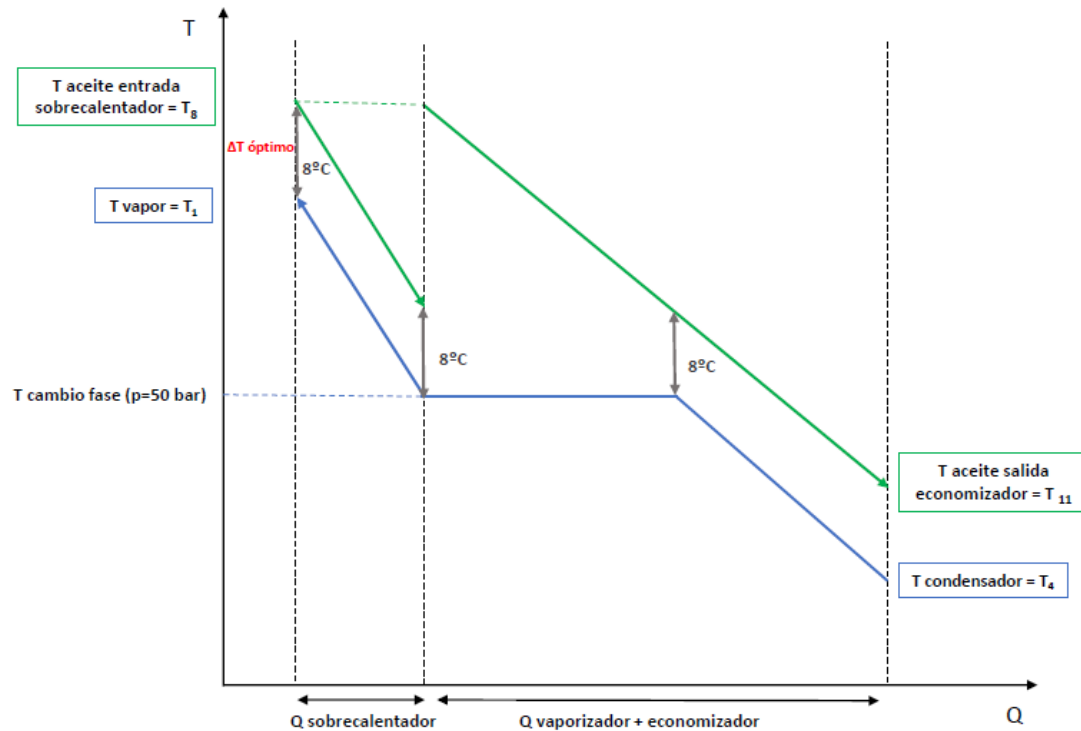
Esta configuración más sencilla tiene un menor coste, al necesitar solamente un intercambiador, pero plantea el siguiente problema: para una temperatura de salida del aceite del campo solar dada, es difícil controlar la temperatura de salida del vapor, tal y como se muestra en el siguiente esquema:



Esquema 7. Configuración del intercambiador de calor considerando sobrecalentador, vaporizador y economizador en un solo bloque.

Como ya se ha comentado anteriormente, la temperatura a la que el vapor llegue a la turbina es determinante en el rendimiento del ciclo, cuanto más elevada sea, mayor rendimiento se obtendrá. Es por ello por lo que se busca que entre la temperatura a la que entra el aceite al sobrecalentador y la temperatura de salida del vapor haya una diferencia de 8°C , valor que se ha estimado óptimo para un intercambiador de estas características.

Con la finalidad de conseguir esta diferencia de temperaturas y optimizar el rendimiento del ciclo, se ha separado el gasto másico procedente del campo y el almacenamiento en dos circuitos, una parte del gasto recorre el sobrecalentador (\dot{m}_2) y el resto recorre el vaporizador (\dot{m}_3).



Esquema 8. Configuración del intercambiador de calor considerando el sobrecalentador separado del vaporizador y economizador

Tal y como se puede apreciar en el esquema, al separar los gastos máxicos es posible obtener una diferencia de temperaturas tanto a la salida como a la entrada del sobrecalentador mucho mejor que con la configuración anterior.

Por tanto, se ha escogido esta última disposición de los elementos que componen la caldera para el desarrollo del modelo.

4.1.2. Limitación de volumen en los tanques

En el esquema general de la instalación se observa que se ha construido un lazo que une el tanque caliente con el tanque frío. Esto es debido a que se debe establecer un límite en el volumen que almacenan los tanques, de lo contrario, cuando el aporte solar sea muy elevado y continuado, podrían llegar a almacenarse cantidades desmedidas de aceite térmico, con el consiguiente aumento del coste del almacenamiento, situación que resulta por completo inviable.

Cuando el volumen de almacenamiento del tanque caliente llegue al límite establecido, el caudal sobrante (\dot{m}_7) se transferirá al tanque frío, con el objetivo de no desaprovechar la energía térmica del fluido que ya no puede almacenarse en el tanque caliente.

En el tanque frío se dispone de un sistema de refrigeración que limita la temperatura del tanque a 400°C. El motivo es que al recibir caudal desde el tanque caliente, la temperatura del tanque frío podría ser muy elevada, poniendo en riesgo la integridad de los materiales del campo solar y de los tanques. Con este sistema se pierde un poco de energía térmica, pero mucha menos

que si se desechara el caudal sobrante del tanque caliente, por tanto se ha considerado una solución adecuada.

Una vez explicada y justificada la disposición de los elementos de la central, se va a proceder a explicar la metodología de cálculo seguida, y las ecuaciones utilizadas.

4.2. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

El objetivo del modelo es calcular todos los parámetros característicos de la central hora a hora durante un año, para poder analizar la relación existente entre el área de captadores solares y el volumen de almacenamiento necesario.

Para realizar el modelo de la central termo-solar, se han dividido los cálculos en dos partes muy diferenciadas:

4.2.1. Cálculo estacionario

El cálculo de los saltos de un estado estacionario al siguiente (es decir, de una hora del año a otra) se corresponde con los cálculos del campo solar y ciclo de vapor, los cálculos relativos al sistema de almacenamiento se explicarán en el siguiente apartado.

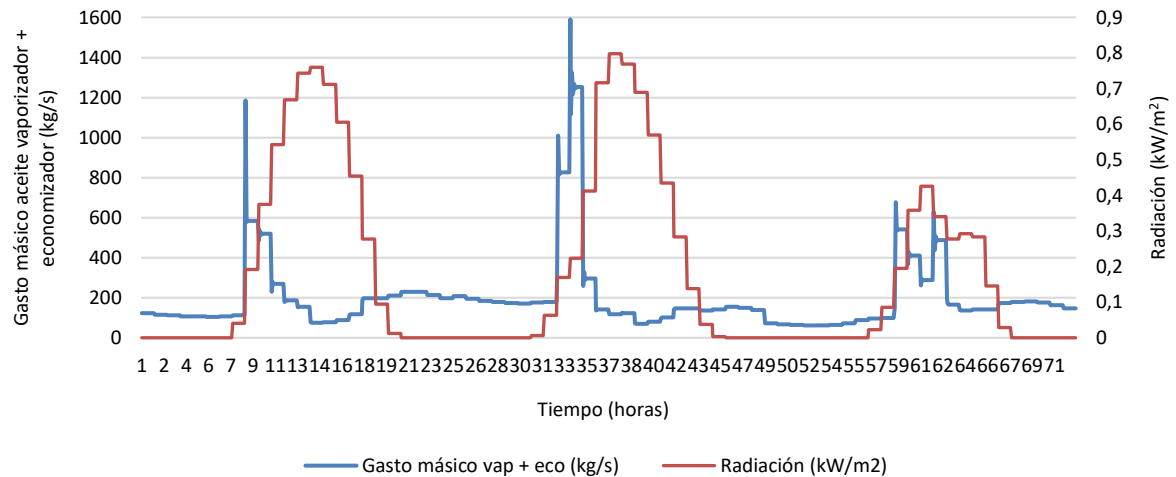
Para calcular un estado estacionario estable, se han realizado las iteraciones necesarias hasta que la diferencia entre los resultados de una iteración y la siguiente sea menor que un valor aceptable. En este caso se ha considerado que la diferencia entre la temperatura de entrada al campo de una iteración y la siguiente debe ser menor de 1°C.

El método utilizado para determinar el número de iteraciones necesarias ha sido realizar los cálculos del modelo para los 3 días de año con mayor variación entre los parámetros de entrada, es decir, se han seleccionado los días con mayor variación de radiación entre una hora y la siguiente, con mayor variación de demanda, y con mayor variación de temperatura. Se ha deducido que la variación de estos valores es lo que va a determinar la variación del resto de parámetros del modelo. Por consiguiente, si se establece un número adecuado de iteraciones basadas en los 3 días mencionados, los estados estacionarios se calcularán satisfactoriamente para el resto de días del año.

Δ Temperatura exterior máxima	1 octubre
Δ Radiación solar máxima	23 abril
Δ Demanda máxima	18 enero

Tabla 15. Días del año con mayores variaciones de los parámetros de entrada del modelo

Se han realizado los cálculos de los estados estacionarios con 14 iteraciones, y para determinar si el número de iteraciones es el adecuado, se ha representado la variable que presenta mayor variación a lo largo del año, el gasto másico de aceite que circula por el vaporizador y el economizador (\dot{m}_3).



Gráfica 12. Estudio del número de iteraciones necesario para pasar de un estado estacionario a otro

Se observan en la gráfica claramente las oscilaciones que sufre el gasto másico en las primeras iteraciones, pero para cada hora de los tres días estudiados, el valor que toma esta variable acaba estabilizándose siempre, por lo que se considera que 14 iteraciones es un número suficiente como para que los cálculos del modelo sean correctos.

4.2.2. Cálculo transitorio

Los cálculos correspondientes a la carga y descarga de los tanques de almacenamiento se corresponden con un estado transitorio, es decir, se realizan una vez se obtiene un estado estacionario estable de las variables del campo solar y del ciclo de vapor.

En el modelo esto se ha implementado de la siguiente manera: los gastos másicos y las temperaturas del sistema de almacenamiento (\dot{m}_4 , \dot{m}_5 , \dot{m}_7 , T_{14} y T_{15}) se han calculado en la última de las iteraciones del cálculo del estado estacionario para cada hora, y se han mantenido esos valores durante las 13 primeras iteraciones del siguiente estacionario, para volver a calcularlas en la iteración número 14. De esta manera, las variables del sistema de almacenamiento se calculan una sola vez para cada hora del año.

La comprensión de la metodología de cálculo descrita será mayor una vez explicadas las ecuaciones utilizadas, a lo que se va a proceder en el siguiente apartado.

4.3. ECUACIONES UTILIZADAS EN EL MODELO

Con el fin de estructurar la explicación de las expresiones utilizadas y ayudar a su comprensión, se han dividido en varios apartados, correspondientes a los sistemas existentes en la central: campo solar, ciclo de vapor, intercambiadores de calor y sistema de almacenamiento.

4.3.1. Discretización del campo solar

En primer lugar se calculan las variables que definen el comportamiento del campo solar tomando como temperatura de entrada al campo el valor de T_{13} calculado en la iteración anterior.

A partir de este valor, se ha de calcular el calor que absorbe el fluido a lo largo de todo el campo solar, la temperatura de salida del campo del aceite térmico (T_7) y el rendimiento del campo.

Se ha de tener en cuenta que el calor que recibe toda el área de captadores es el mismo, pero la temperatura del fluido irá aumentando conforme este vaya recorriendo la superficie del campo, lo que hará que disminuya el rendimiento, tal como se ha podido deducir en la explicación de la ecuación del rendimiento de los captadores solares. Esto se debe a que la temperatura de intercambio de calor aumenta y se producen mayores pérdidas térmicas. Por tanto se ha decidido discretizar el área de captación y dividirla en 10 tramos. Cada uno de los 10 tramos recibirá la misma energía procedente del sol, pero tendrá un rendimiento diferente, descendente con el aumento de la temperatura.

Conocida la temperatura de entrada al primer tramo de captadores, se calcula el rendimiento de ese tramo, y a partir del rendimiento, el calor absorbido, tal y como se muestra a continuación:

$$\eta_{cap1} = \eta_{opt} - \frac{1}{F_c * I_R} (k_1(T_{13} - T_{ext}) + k_2(T_{13} - T_{ext})^2) \quad (9)$$

$$Q_{cap1} = I_R * \left(\frac{A_{campo}}{10}\right) * \eta_{cap1} \quad (10)$$

$$T_{cap2} = T_{cap1} + \frac{Q_{cap1}}{\dot{m}_1 * C_p} \quad (11)$$

Estos cálculos se repiten 10 veces hasta conseguir la temperatura de salida del campo (T_7).

Una vez calculada la temperatura de salida del aceite del campo de captadores, se procede a calcular el calor total absorbido en el campo solar, y su rendimiento.

$$Q_{campo} = \dot{m}_1 * C_p * (T_7 - T_{13}) \quad (12)$$

$$\eta_{campo} = \frac{Q_{campo}}{A_{campo} * I_R} \quad (13)$$

4.3.1. Cálculos ciclo de vapor

La central termo-solar que se está estudiando tiene como misión satisfacer una demanda de electricidad que varía hora a hora. Esta demanda eléctrica permite conocer el trabajo que es necesario aportar con la turbina de vapor:

$$E_{demandada} = \eta_{turbina} * W_T \quad (14)$$

Para calcular el estado termodinámico del punto de entrada a la turbina (punto 1) se ha de tener en cuenta que se conoce la presión a la que trabaja la turbina ($p_1 = p_6 = p_5 = p_4 = 50 \text{ bar}$), y la relación existente entre T_1 y T_8 :

$$T_1 = T_8 - 8^\circ\text{C} \quad (15)$$

Conocidas presión y temperatura de entrada a la turbina ya se puede definir el punto termodinámico 1.

Determinado el punto 1, resulta muy sencillo calcular las condiciones a la salida de la turbina (punto 2), puesto que p_2 es conocida, tal y como se ha explicado en el contexto del trabajo.

$$s_1 = s_{2is} \quad (16)$$

$$h_{2is} = h(p_2, s_{2is}) \quad (17)$$

$$h_2 = h_1 - \eta_{is}(h_1 - h_{2is}) \quad (18)$$

A partir de los puntos 1 y 2, y conociendo el trabajo que debe aportar la turbina, se calcula el caudal másico de vapor que ha de recorrer el ciclo:

$$\dot{m}_6 = \frac{W_T}{(h_1 - h_2)} \quad (19)$$

El resto de puntos del ciclo de vapor son muy sencillos de calcular, por lo que no se van a reflejar todos los cálculos.

- Punto 3: líquido saturado a temperatura y presión conocidas.
- Punto 4: líquido a presión y entropía conocidas ($s_3 = s_4$).
- Punto 5: líquido saturado a presión conocida.
- Punto 6: vapor saturado a presión conocida.

4.3.2. Balances de energía en los intercambiadores de calor

El objetivo de este apartado es calcular las temperaturas del aceite de entrada y salida de los intercambiadores (T_8, T_9, T_{10} y T_{11}), así como los gastos másicos que los recorren (\dot{m}_2 y \dot{m}_3).

La temperatura de entrada al sobrecalentador y al vaporizador se calcula como la media ponderada entre la temperatura que tiene el gasto másico de aceite que procede del campo solar y la temperatura del gasto másico procedente del tanque caliente:

$$T_8 = \frac{T_7 * \dot{m}_1 + T_{14} * \dot{m}_4}{\dot{m}_1 + \dot{m}_4} \quad (20)$$

Se ha de tener en cuenta que los signos serán positivos si \dot{m}_4 sale del tanque caliente, y negativos si entra.

Tal y como se ha explicado en el apartado sobre la configuración de intercambiador, se ha tomado la suposición de que entre la temperatura de entrada del vapor saturado al sobrecalentador y la salida del aceite del mismo, haya una diferencia de temperaturas de 8°C . Gracias a dicha suposición es posible calcular \dot{m}_2 .

$$T_9 = T_6 + 8^{\circ}C \quad (21)$$

$$Q_{sobrecalentador} = \dot{m}_6 * (h_1 - h_6) \quad (22)$$

$$\dot{m}_2 = \frac{Q_{sobrecalentador}}{Cp*(T_8-T_9)} \quad (23)$$

Para el vaporizador y el economizador se sigue un procedimiento similar:

$$T_{10} = T_5 + 8^{\circ}C \quad (24)$$

$$Q_{vaporizador} = \dot{m}_6 * (h_6 - h_5) \quad (25)$$

$$\dot{m}_3 = \frac{Q_{vaporizador}}{Cp*(T_8-T_{10})} \quad (26)$$

$$Q_{economizador} = \dot{m}_6 * (h_5 - h_4) \quad (27)$$

$$T_{11} = T_{10} - \frac{Q_{economizador}}{Cp * \dot{m}_3} \quad (28)$$

$$Q_{caldera} = Q_{sobrecalentador} + Q_{vaporizador} + Q_{economizador} \quad (29)$$

Una vez calculadas las temperaturas de salida del aceite del sobrecalentador y del economizador, es posible calcular la temperatura del punto 12, que será la media ponderada de los dos flujos mencionados.

$$T_{12} = \frac{T_9 * \dot{m}_2 + T_{11} * \dot{m}_3}{\dot{m}_2 + \dot{m}_3} \quad (30)$$

Por último, se calcula la temperatura de entrada del aceite al campo solar, teniendo en cuenta el caudal que entra o sale del tanque frío:

$$T_{13} = \frac{T_{12} * (\dot{m}_2 + \dot{m}_3) + T_{15} * \dot{m}_5}{\dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_5} \quad (31)$$

Los signos que acompañan a \dot{m}_5 serán positivos si el gasto másico sale del tanque y negativos si se introduce en él.

La temperatura del punto 13 es la que se utiliza como dato de partida para el comienzo de la siguiente iteración, ya que para calcular todos los parámetros del campo solar, es necesario conocer la temperatura de entrada del aceite al primer captador.

Ahora que ya se están definidos todos los puntos termodinámicos, tanto del campo solar como del ciclo de vapor, se procede a calcular el transitorio del sistema de almacenamiento.

4.3.3. Transitorio sistema de almacenamiento

Como ya se ha explicado anteriormente, los cálculos que indican los gastos másicos que entran o salen de los tanques, las temperaturas de los mismos y la cantidad de masa almacenada, se realizan una sola vez en cada hora.

Es importante tener en cuenta que el caudal que circula por el campo solar es constante, de manera que si existe una demanda y una radiación que hacen que sobre caudal y este deba ser almacenado en el tanque caliente, el tanque frío deberá aportar la misma cantidad de caudal que se ha almacenado en el caliente. Así, \dot{m}_1 se mantiene constante y \dot{m}_4 y \dot{m}_5 son iguales y de sentido contrario.

Esto se traduce en que en el momento en el que el tanque caliente llegue a su máximo de capacidad, el tanque frío estará vacío, y viceversa. Por tanto es muy importante desviar la masa sobrante del tanque caliente hacia el frío, para no tener problemas de abastecimiento de aceite.

Realizando un balance de masa se puede conocer el caudal que entra o sale del tanque caliente, y una vez conocido, se calcula la cantidad de aceite almacenado en el tanque, sumando o restando a la cantidad de aceite que ya hay en el tanque el caudal que entra o sale durante 1 hora.

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \quad (32)$$

$$m_{caliente} = m_{caliente(anterior)} + \dot{m}_4 * 3600 \quad (33)$$

Para el cálculo del volumen del tanque se ha considerado una densidad del aceite térmico de 850 kg/m³, por lo que el volumen se calcula de la siguiente manera:

$$V_{caliente} = \frac{m_{caliente}}{850} \quad (34)$$

La temperatura del tanque caliente se calcula como la media ponderada entre la cantidad de aceite que contenía el tanque en el instante anterior y la cantidad de aceite que entra o sale en 1 hora.

$$T_{14} = \frac{T_{14 anterior} * m_{caliente(anterior)} + T_7 * \dot{m}_4 * 3600}{m_{caliente(anterior)} + \dot{m}_4 * 3600} \quad (35)$$

En caso de que $m_{caliente}$ supere la máxima capacidad del tanque, se calculará la cantidad de aceite que se transferirá al tanque frío.

$$m_7 = m_{caliente} - m_{máxima} \quad (36)$$

Para los cálculos del tanque frío se ha seguido un procedimiento idéntico:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 - \dot{m}_1 \quad (37)$$

$$m_{frío} = m_{frío(anterior)} + \dot{m}_5 * 3600 \quad (38)$$

$$V_{frío} = \frac{m_{frío}}{850} \quad (39)$$

$$T_{15} = \frac{T_{15 anterior} * m_{frío(anterior)} + T_{12} * \dot{m}_5 * 3600}{m_{frío(anterior)} + \dot{m}_5 * 3600} \quad (40)$$

Es importante recordar que T_{15} , la temperatura a la que se encuentra el aceite térmico en el tanque frío, se debe limitar a 400°C, pues una temperatura mayor provocaría la destrucción de los materiales del campo solar al calentarse el fluido a temperaturas muy elevadas.

En este apartado se debe prestar especial atención al criterio de signos utilizado, ya que se ha considerado que \dot{m}_4 es positivo cuando entra al tanque caliente, y \dot{m}_5 también es positivo cuando entra al tanque frío.

Por último se ha calculado la energía que se extrae del sistema de almacenamiento, teniendo en cuenta la diferencia de temperaturas entre el tanque caliente y el frío.

$$Q_{almacenamiento} = \dot{m}_4 * Cp * (T_{14} - T_{15}) \quad (41)$$

Hay que tener en cuenta que cuando \dot{m}_4 entre al tanque, $Q_{\text{almacenamiento}}$ resultará positiva, y cuando el gasto másico salga del tanque, será negativa. Este criterio de signos no tiene mayor trascendencia, se ha determinado de esa manera para cuando se representen los gráficos finales, sea más sencillo de apreciar la energía que se almacena y la que se extrae del almacenamiento. Esta energía tomará el valor 0 cuando se desvíe la masa sobrante del tanque caliente hacia el tanque frío, pues ambos tanques estarán a la misma temperatura.

Con la conclusión de este apartado ya se tienen definidas las ecuaciones que definen el modelo matemático de la central termo-solar, y ya es posible realizar los cálculos para todas las horas de un año, introduciendo en la aplicación informática los valores de demanda eléctrica, radiación solar y temperatura ambiente para cada hora del año.

Es necesario también escoger un área de paneles solares y una capacidad máxima de almacenamiento para poder calcular todo lo visto anteriormente, y poder realizar una representación gráfica de cualquier parámetro de la central que se desee.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

En el presente capítulo se van a presentar los resultados obtenidos después del desarrollo del modelo matemático.

Como se ha visto en el apartado anterior, se han calculado todos los puntos característicos de la central termo-solar, tanto para el campo solar, ciclo de vapor y sistema de almacenamiento. De manera que se pueden representar las variables que se deseen para analizar su comportamiento a lo largo del tiempo.

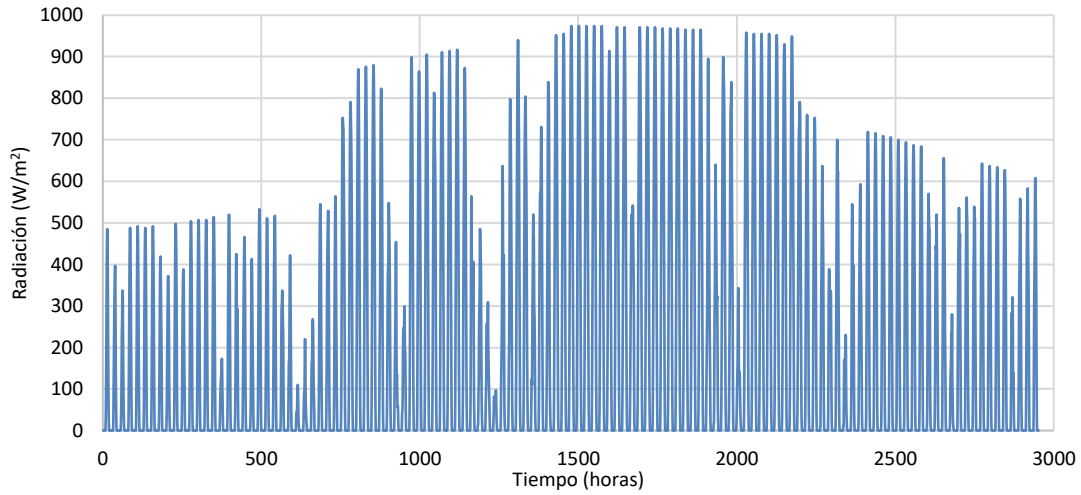
A la hora de calcular el modelo no se ha desarrollado para un año completo de doce meses, debido a la gran cantidad de cálculos que supone y la falta de capacidad de los equipos informáticos utilizados. En su lugar, se ha simulado un año tipo, es decir, se han seleccionado cuatro meses representativos de la climatología de la ubicación seleccionada, y se ha desarrollado el modelo para estos meses.

En concreto los cálculos se han realizado para los meses de enero, abril, julio y octubre, un mes por cada estación del año. Los meses que más trascendencia van a tener a la hora de analizar los resultados son los meses de enero y julio. Al tratarse de una localización muy turística, en julio la demanda de electricidad es muy alta, pero también lo es la radiación solar, por lo que se presupone que no habrá problemas a la hora de abastecer a la población de electricidad. Durante las horas diurnas se producirá suficiente energía como para satisfacer la demanda y llenar el tanque caliente, del que se extraerá la energía durante las horas nocturnas. En cambio en enero, como ya se ha visto al principio del trabajo, la demanda de electricidad es menor, pero la radiación disminuye de manera mucho más acusada, de forma que es previsible que en algunos días del mes no se posea suficiente energía almacenada. Este tipo de cuestiones son las que se van a analizar en este apartado, con el objetivo de conseguir una curva que represente la relación óptima entre área de paneles y volumen de almacenamiento para satisfacer la demanda en cada hora del año estudiado.

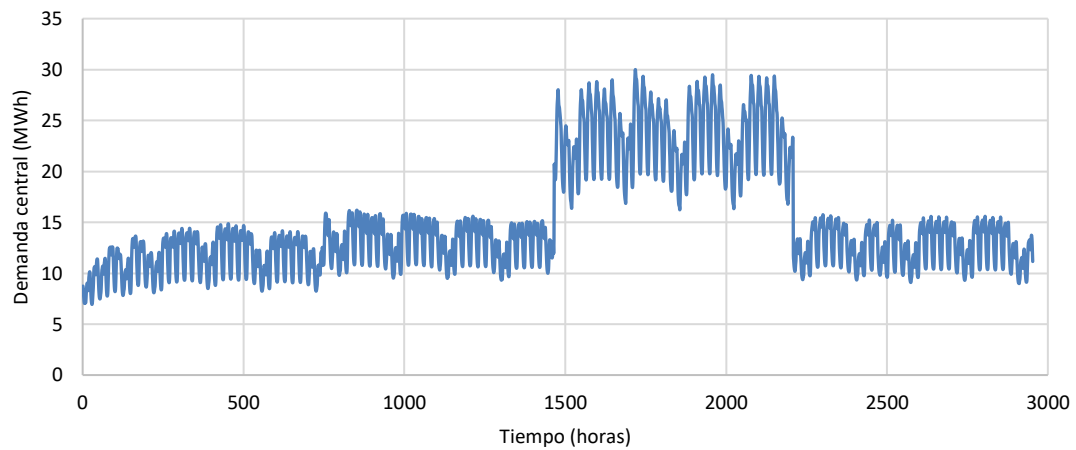
5.1. RESULTADOS GENERALES

Como ya se ha explicado, se ha simulado el modelo para cuatro meses representativos de un año, es decir, se han obtenido resultados para 2952 horas, lo que supone una gran cantidad de datos que va a ser muy costosa de analizar. Para poner un ejemplo de ello, se han representado a continuación la radiación solar, la demanda eléctrica, el rendimiento del ciclo de vapor y el volumen de almacenamiento del tanque caliente, para observar como evolucionan a lo largo del año.

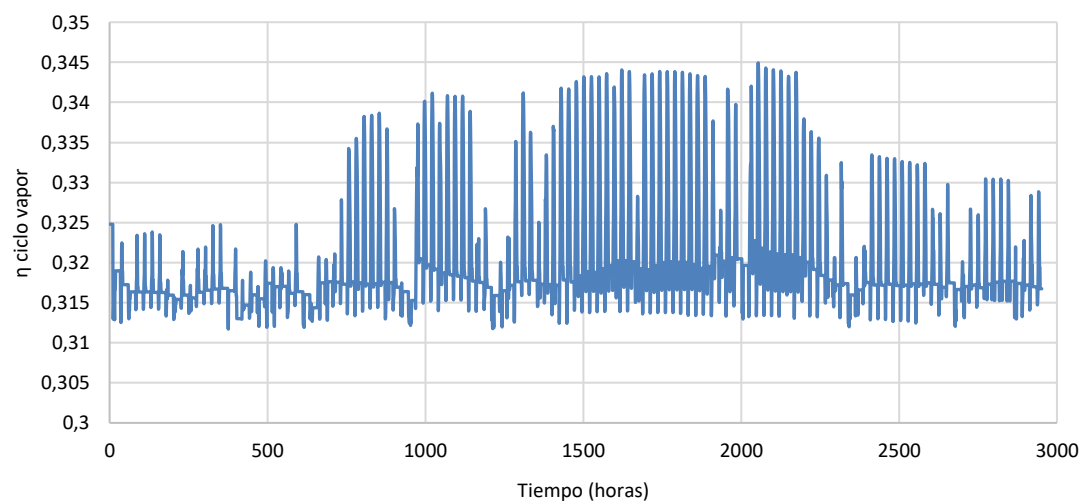
Se ha escogido un valor de área de paneles de 1 300 000 m² y un volumen de almacenamiento máximo de 47 000 m³.



Gráfica 13. Evolución de la radiación a lo largo de un año tipo

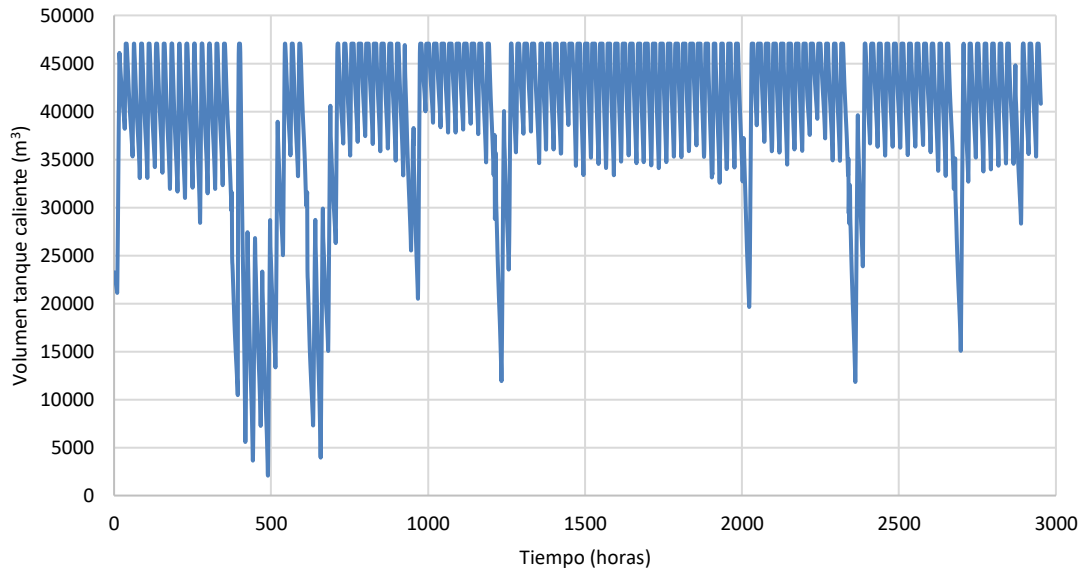


Gráfica 14. Evolución de la demanda eléctrica de la central a lo largo de un año tipo



Gráfica 15. Evolución del rendimiento del ciclo de vapor a lo largo de un año tipo

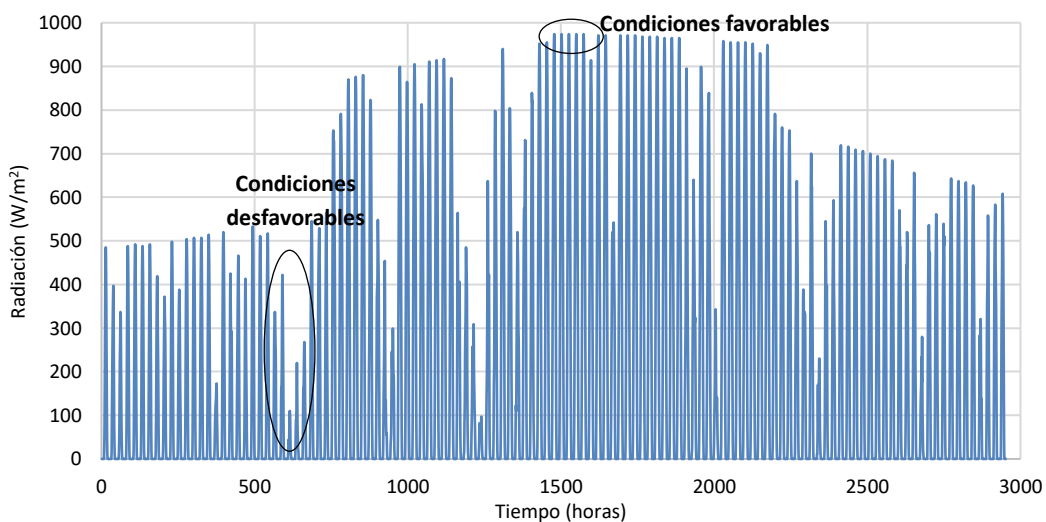
Se observa que la variación del rendimiento del ciclo de vapor es muy pequeña (varía entre 0.312 y 0.345), prácticamente insignificante.



Gráfica 16. Evolución del volumen de almacenamiento a lo largo de un año tipo

En la gráfica sobre la evolución del volumen de almacenamiento se aprecia como en ningún momento el volumen del tanque caliente está por debajo de 0, lo que quiere decir que la relación entre el área de captadores solares y el volumen de almacenamiento que se ha escogido es correcta para satisfacer la demanda eléctrica en todo momento.

Aunque se puedan deducir algunos detalles de las gráficas mostradas se ha considerado que para realizar un análisis más exhaustivo del comportamiento de la central es conveniente analizar el comportamiento de la misma en periodos de tiempo más pequeños. Para ello, y para que los resultados resulten más interesantes, se van a comparar 4 días de invierno en los que la radiación es muy reducida, por tanto las condiciones para la producción de electricidad mediante la energía aportada por el campo solar son muy desfavorables, y 4 días de verano, en los que la radiación es muy elevada.

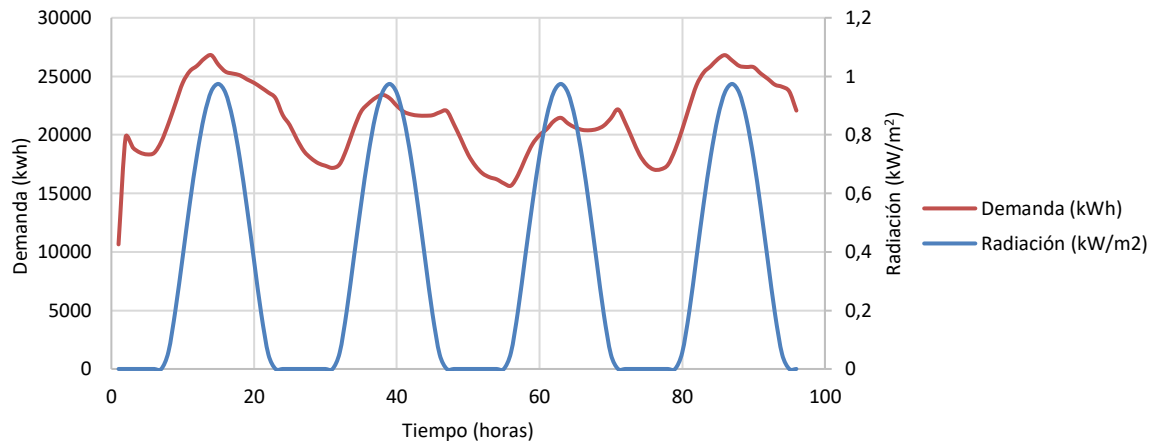


Gráfica 17. Selección de días para análisis de los resultados

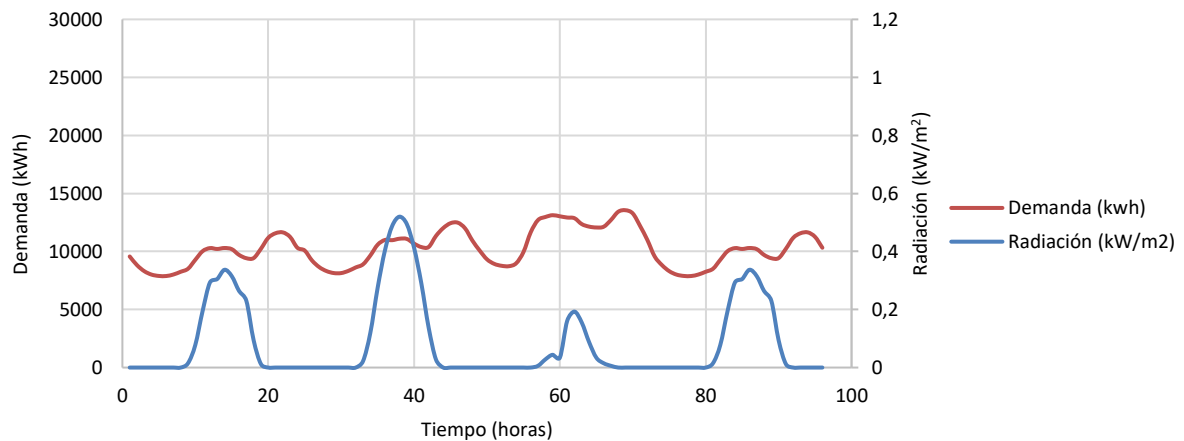
En concreto se van a analizar los periodos del 24 al 27 de enero y del 1 al 4 de julio.

Todas las representaciones se han realizado a la misma escala, para poder apreciar de forma rápida y visual las diferencias que existen en el comportamiento de la central entre los días estudiados.

En primer lugar se han representado los valores de radiación y demanda energética para cada uno de los periodos.



Gráfica 18. Demanda eléctrica y radiación solar del 1 al 4 de julio



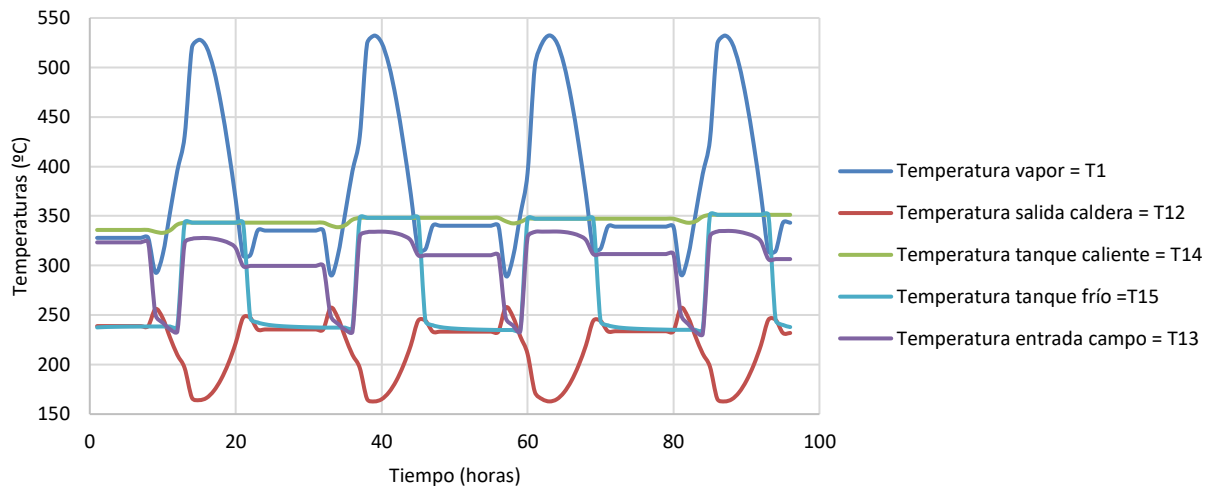
Gráfica 19. Demanda eléctrica y radiación solar del 24 al 27 de enero

La demanda eléctrica en el intervalo de tiempo estival es casi el doble que en los días de invierno analizados, se observa en verano un máximo de demanda de 26 000 kWh, mientras que en invierno el máximo de demanda se sitúa en 14 000 kWh.

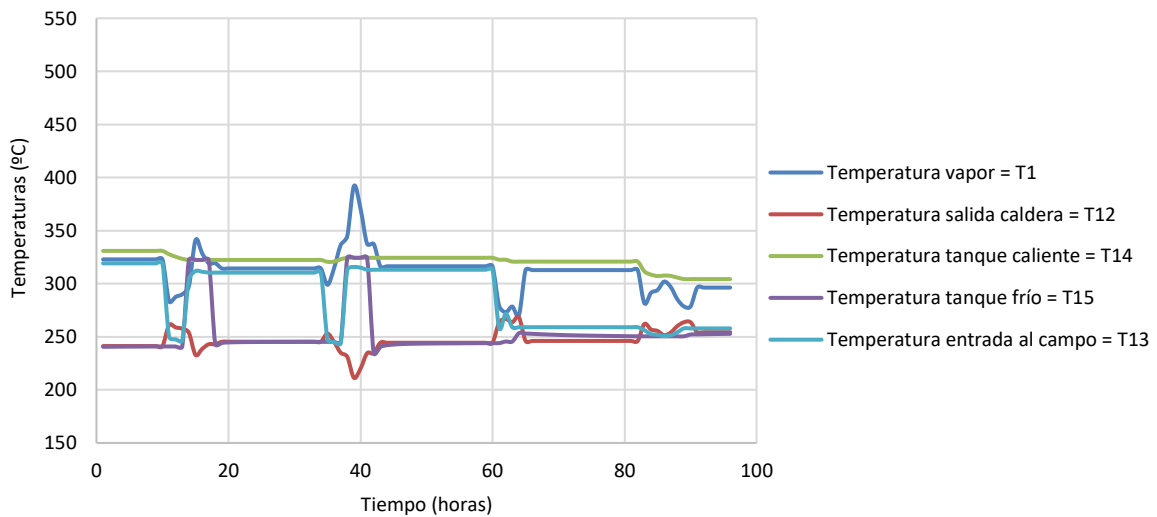
En cambio, la radiación es prácticamente el triple en verano, llegando y superando valores de 0.9 kW/m², mientras que en invierno hay días que no se alcanzan los 0.3 kW/m².

Esta situación hace pensar que los días que van a condicionar el volumen de almacenamiento necesario de la central son los días con características similares a los días de invierno analizados.

En segundo lugar se muestra la evolución de las temperaturas más características de la central (temperatura de vapor, temperatura del aceite de salida de la caldera, temperaturas de los tanques y temperatura del aceite de entrada al campo).



Gráfica 20. Temperaturas del 1 al 4 de julio



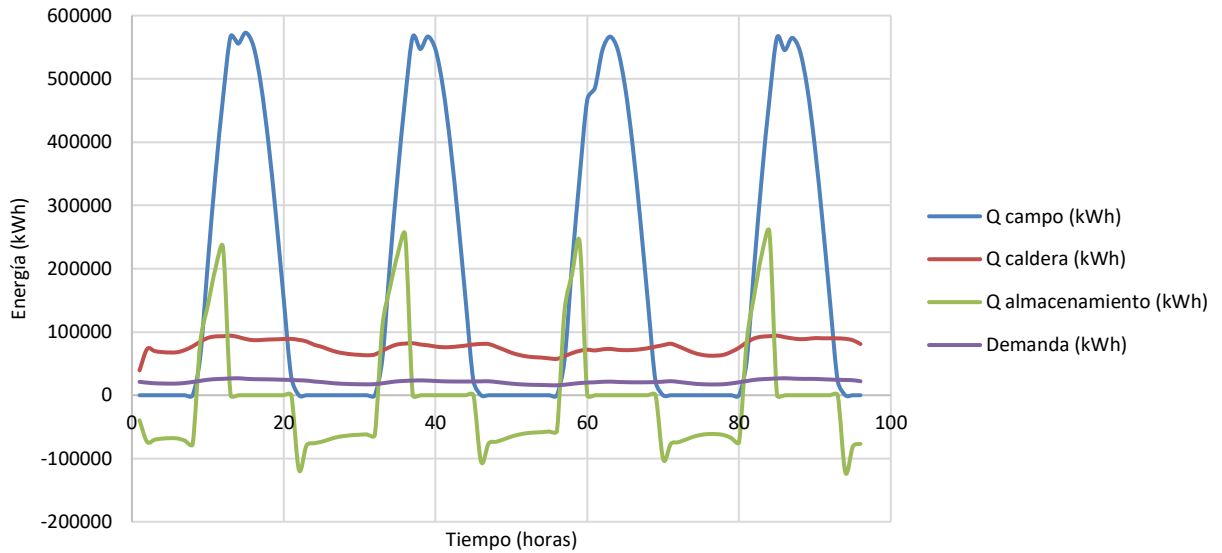
Gráfica 21. Temperaturas del 24 al 27 de enero

Se aprecia muy claramente que en las horas en las que radiación solar es elevada, la temperatura de vapor aumenta considerablemente, llegando a valores por encima de los 500°C en verano y cercanos a los 400°C en invierno.

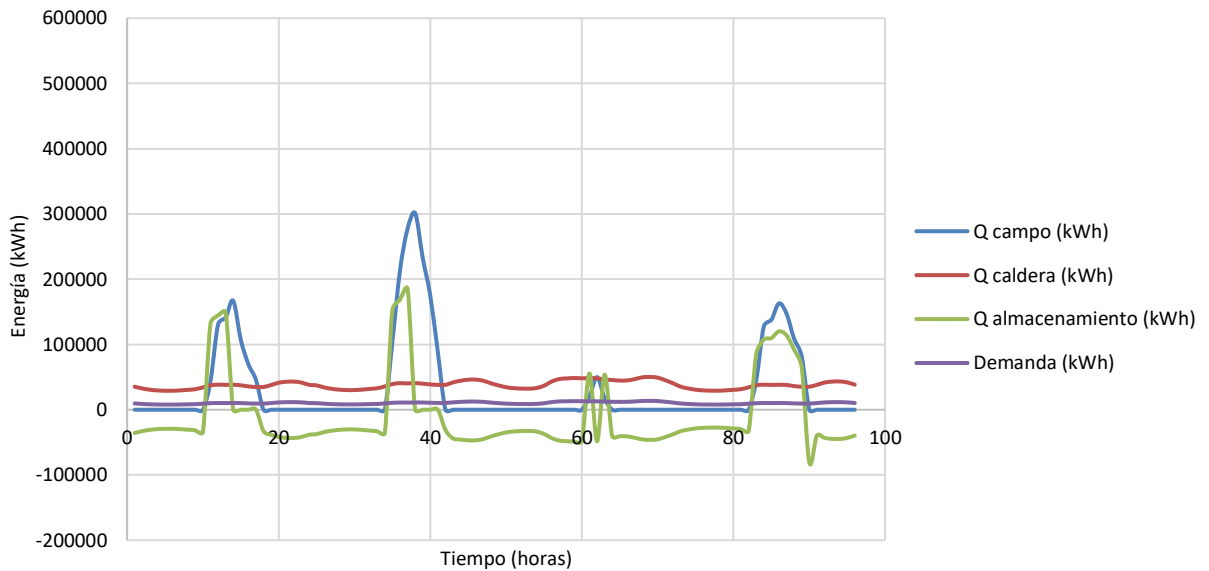
Se puede observar también como aumenta rápidamente en verano la temperatura del tanque frío cuando hay aporte solar, y se iguala a la temperatura del tanque caliente. Esto es así porque se necesita almacenar más cantidad de aceite de la que puede contener el tanque caliente, y por tanto esta masa sobrante se almacena en el tanque frío, igualándose las temperaturas.

Esta situación en invierno se produce solamente en ocasiones puntuales, tal y como puede apreciarse en la gráfica (las temperaturas de los tanques sólo se igualan los dos primeros días analizados, y durante un periodo de tiempo mucho más reducido que en verano).

En tercer lugar se han representado las energías que aportan cada hora el campo solar, la caldera, y el almacenamiento.



Gráfica 22. Energías generadas y demanda eléctrica del 1 al 4 de julio

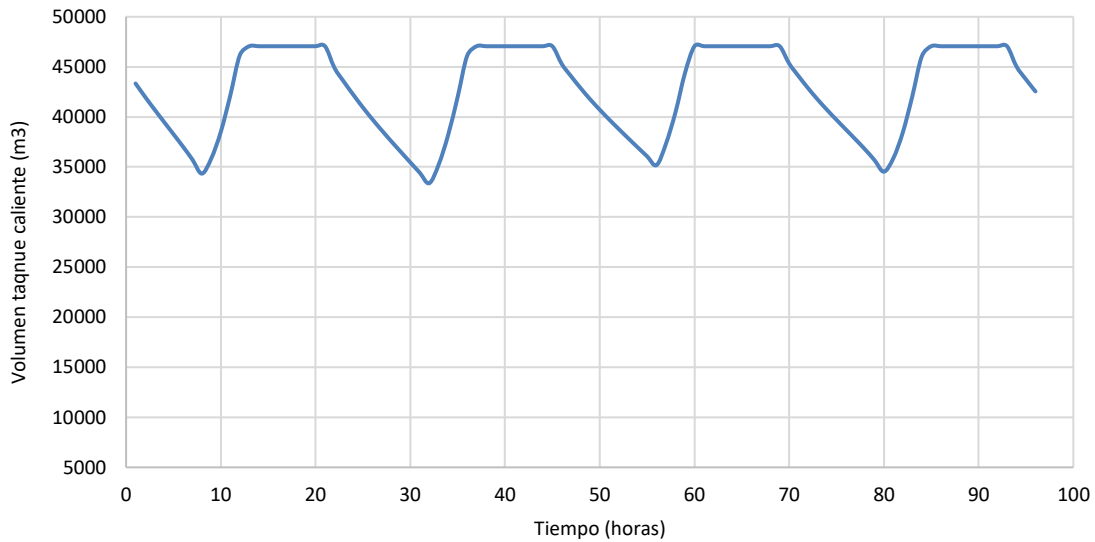


Gráfica 23. Energías generadas y demanda eléctrica del 24 al 27 de enero

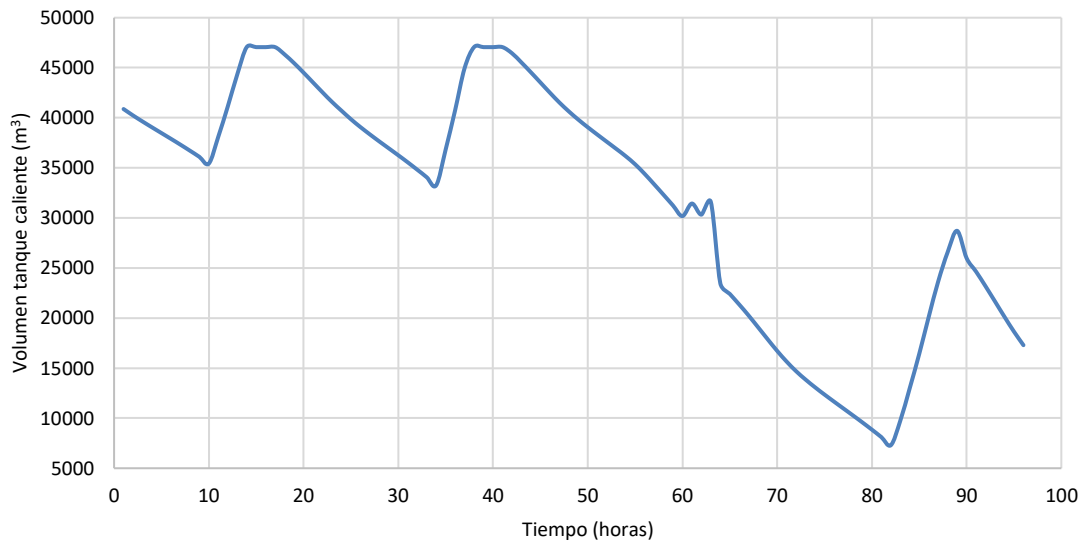
El criterio de signos utilizado para calcular la energía que posee el almacenamiento es el siguiente: los valores positivos corresponden a los momentos en los que se introduce gasto másico de aceite en el tanque caliente, y los negativos a los momentos en los que se extrae caudal de aceite del mismo tanque. Se puede observar, sobre todo en verano, que hay periodos durante los cuales esta energía es igual a cero. Estos periodos corresponden al traspaso de caudal desde el tanque caliente al frío, pues ambos tanques están a la misma temperatura.

Así como sucede con la radiación, la energía aportada por el campo solar en invierno es una tercera parte de la energía que se consigue extraer del campo en verano.

Por último, se muestran a continuación unas gráficas que describen los procesos llenado y vaciado del tanque caliente para los dos periodos de tiempo analizados.



Gráfica 24. Carga y descarga del tanque caliente del 1 al 4 de julio



Gráfica 25. Carga y descarga del tanque caliente del 24 al 27 de enero

Tal y como se había predicho al analizar la radiación solar de los días estudiados, durante el periodo estival se consigue llenar por completo el tanque caliente hasta su nivel máximo durante varias horas al día. En cambio, durante el periodo invernal, se dan situaciones como las que se observan en la gráfica 25, los días con muy poca radiación, como el 26 de enero, se necesita aportar caudal de aceite desde el almacenamiento prácticamente durante todo el día, de manera que el nivel del tanque caliente desciende acusadamente. Este tipo de días son los que van a condicionar el volumen del tanque necesario para un área de captadores dada.

Una vez finalizado el análisis de las variables más importantes de la central termo-solar durante dos periodos representativos del año, se va a proceder a realizar un estudio paramétrico doble del que se extraerá la gráfica objetivo del modelo, determinar los valores mínimos de área de campo solar y volumen de almacenamiento necesario que permiten satisfacer la demanda eléctrica durante todo el año.

5.2. ESTUDIO PARAMÉTRICO DOBLE. RESULTADOS FINALES

5.2.1. Objetivos

Los resultados de la modelización del funcionamiento de la central termo-solar para un año tipo proporcionan información muy extensa sobre los parámetros y variables características de este tipo de centrales, tal y como se ha analizado en el apartado anterior. Aun así, el estudio de todas las variables importantes de la central termo-solar no es el objeto de este estudio, si bien ha servido de gran ayuda para comprender el funcionamiento de este tipo de instalaciones.

La finalidad principal de este trabajo académico es la de construir una gráfica que permita conocer la relación óptima entre el área de captadores utilizada y el volumen de almacenamiento necesario para satisfacer la demanda eléctrica durante cada hora del año.

Es lógico pensar que hay muchas parejas de área y volumen que pueden satisfacer la demanda de la central, pero se van a buscar aquellas combinaciones que satisfaciendo la demanda, minimicen la inversión que ha de realizarse.

Tanto el campo solar como los tanques de almacenamiento suponen una gran inversión de capital a la hora de construir una central termo-solar, ya que son tecnologías avanzadas que han de disponerse en grandes cantidades. Por tanto, si para un área de captadores de 1 200 000 m² puede satisfacerse la demanda durante todo el año con un volumen de almacenamiento de, por ejemplo, 45 000 m³, no quiere decir que no se puedan utilizar tanques mayores, pero es conveniente acercarse lo máximo posible al valor mínimo de volumen de almacenamiento necesario, de manera que se minimice la inversión a realizar. Este va a ser el criterio que se va a seguir a la hora de construir la gráfica final, conseguir definir el límite de la relación área de captadores y volumen de almacenamiento que permite satisfacer la demanda eléctrica durante todo el año.

5.2.2. Metodología utilizada

La metodología que se ha utilizado para encontrar las parejas de área del campo solar y volumen de almacenamiento mínimos necesarios ha sido la de realizar un estudio paramétrico doble, en el que se han escogido diez valores de área de captadores y diez de volumen de los tanques.

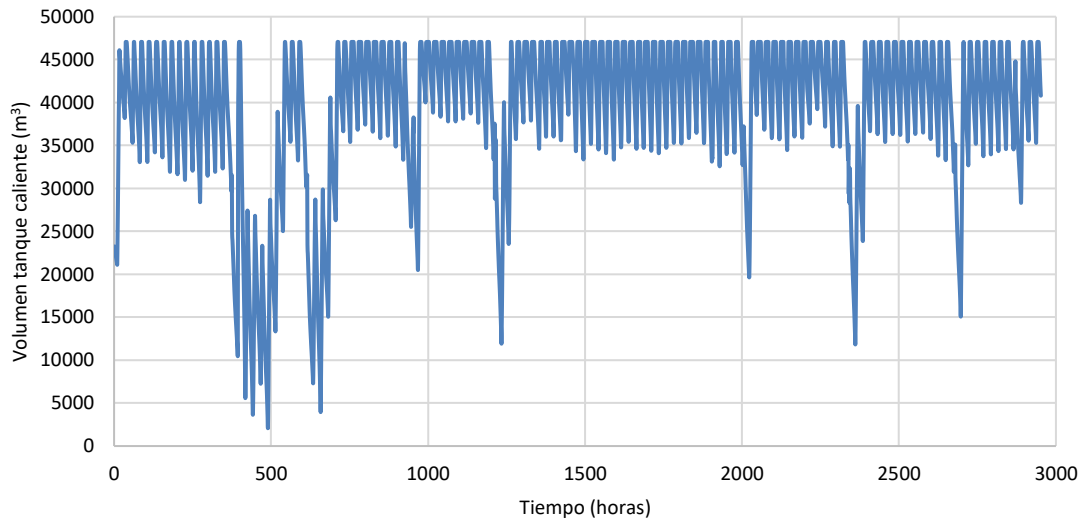
Los valores utilizados se comprenden en los siguientes rangos:

Área campo solar (m ²)	900 000 – 3 600 000
Volumen almacenamiento (m ³)	32 500 – 65 000

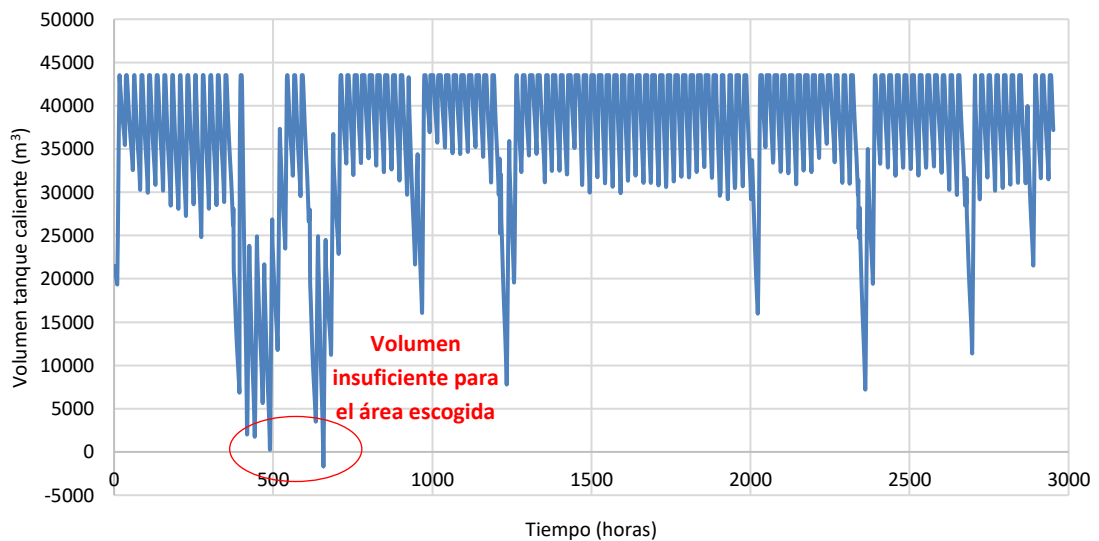
Tabla 16. Rangos de valores de área y volumen en el estudio paramétrico doble

Para cada una de las combinaciones anteriores, se ha simulado el año tipo y se ha representado la evolución del volumen almacenado en el tanque caliente. En caso de que en ningún momento del año el volumen almacenado esté por debajo de cero, se satisface la demanda, y por tanto la pareja de área y volumen utilizada es adecuada. En cambio, si en algún instante el volumen del tanque cae por debajo de cero, la pareja utilizada se descarta, por no ser suficiente para satisfacer la demanda.

A continuación se muestra un ejemplo de cada caso, para ilustrar mejor la metodología seguida.



Gráfica 26. Evolución del volumen de almacenamiento con una relación [A,V] adecuada



Gráfica 27. Evolución del volumen de almacenamiento con una relación [A,V] inadecuada

Aunque inicialmente se han tomado los valores indicados en los rangos de la tabla 14, se ha intentado determinar el límite con la mayor precisión, de manera que para intentar mostrar una gráfica final lo más exacta posible, se han realizado multitud de combinaciones hasta encontrar para cada área de captadores, el mínimo volumen de almacenamiento necesario.

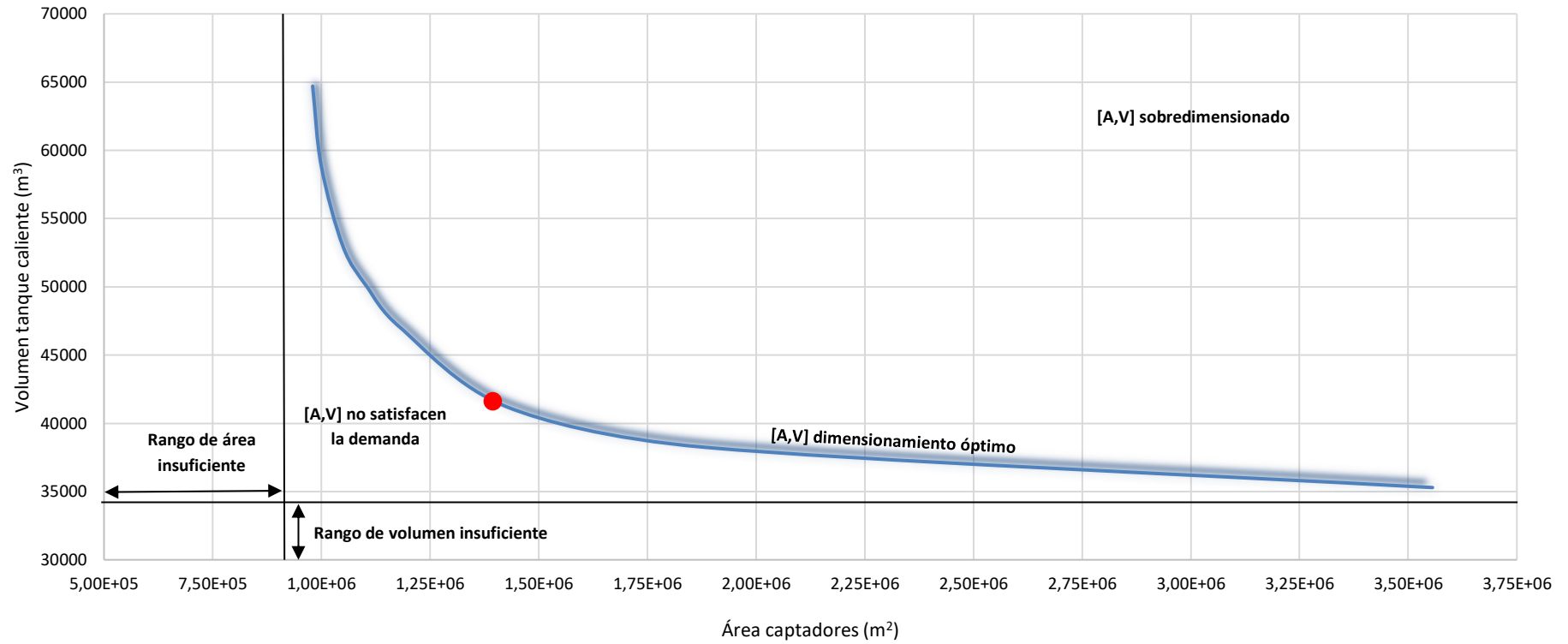
Durante la realización del estudio paramétrico doble descrito, se ha encontrado el área de paneles mínima por debajo de la cual el funcionamiento de la central resulta inviable, pues no se consigue llenar el tanque caliente en ningún momento. Asimismo, se ha determinado el volumen de almacenamiento mínimo para cualquier área, por muy elevada que esta sea, por debajo del cual tampoco se satisface la demanda.

Área mínima campo solar (m²)	980 000
Volumen mínimo almacenamiento (m³)	34 900

Tabla 17. Valores mínimos por debajo de los cuales no se es viable el funcionamiento de la central

Una vez determinadas las combinaciones de área de captadores y volumen de tanques que componen el límite para la satisfacción de la demanda, se ha procedido a representar este límite en una gráfica, que se muestra en la página siguiente con mayor resolución.

La construcción de esta gráfica es el objetivo del desarrollo del modelo por lo que se va a proceder a su análisis y explicación.



Gráfica 28. Relación óptima entre área de captadores y volumen de almacenamiento que satisface la demanda de la central termo-solar

La primera conclusión que puede extraerse de la curva representada es que conforme aumenta el área de captación, disminuye el volumen necesario de almacenamiento. Esto es así porque al aumentar el área con la que se absorbe el calor proporcionado por la radiación, aumenta la energía que se obtiene del campo solar. Por tanto habrá mayor cantidad de horas al año con el tanque caliente lleno, lo que se traduce en menor número de horas al año en las que el tanque se está vaciando. Es decir, se necesitará un volumen de almacenamiento menor en los tanques.

En la gráfica pueden apreciarse dos asíntotas que determinan la forma de la gráfica. Estas se corresponden con los valores mínimos de área del campo solar y volumen de almacenamiento que permiten el funcionamiento de la central termo-solar, tal y como se han especificado en la tabla 15.

Por debajo de la curva azul las parejas [A,V] no satisfacen la demanda eléctrica de la central, corresponden a los casos similares al mostrado en la gráfica 27, y bajo ningún caso deberían escogerse a la hora de diseñar una central de estas características.

Las combinaciones de [A,V] situadas por encima de la curva azul sí satisfacen la demanda, por lo que serían una opción viable para el diseño de una central, pero se debe tener en cuenta que esta estaría sobredimensionada, haciendo falta una inversión de capital más elevada de lo necesario para satisfacer la demanda eléctrica.

Las parejas de área de captadores y volumen de almacenamiento óptimas para satisfacer la demanda son las situadas sobre la curva azul, o en la zona inmediatamente superior a esta, por tanto, esas combinaciones son las que se deben tomar en consideración a la hora de diseñar una central termo-solar de características similares.

El punto rojo situado sobre la curva corresponde a un ejemplo explicado más adelante.

Con el fin de realizar un análisis más profundo de los resultados, se va a proceder a realizar un estudio sobre el coste adimensional que tendría cada combinación de área de campo solar y volumen de almacenamiento.

El objetivo es definir unas curvas de área del campo solar óptima y volumen de almacenamiento óptimo según los costes de ambas variables.

Para ello se ha definido el Precio Unitario Relativo (PUR), relación entre el coste del almacenamiento y el coste de los paneles solares.

$$PUR = \frac{\frac{\text{€}}{\text{m}^3 \text{almacenamiento}}}{\frac{\text{€}}{\text{m}^2 \text{paneles}}} \quad (42)$$

Con el Precio Unitario Relativo se ha calculado el coste que tendría cada una de las parejas de área y volumen de la curva representada en la gráfica 28.

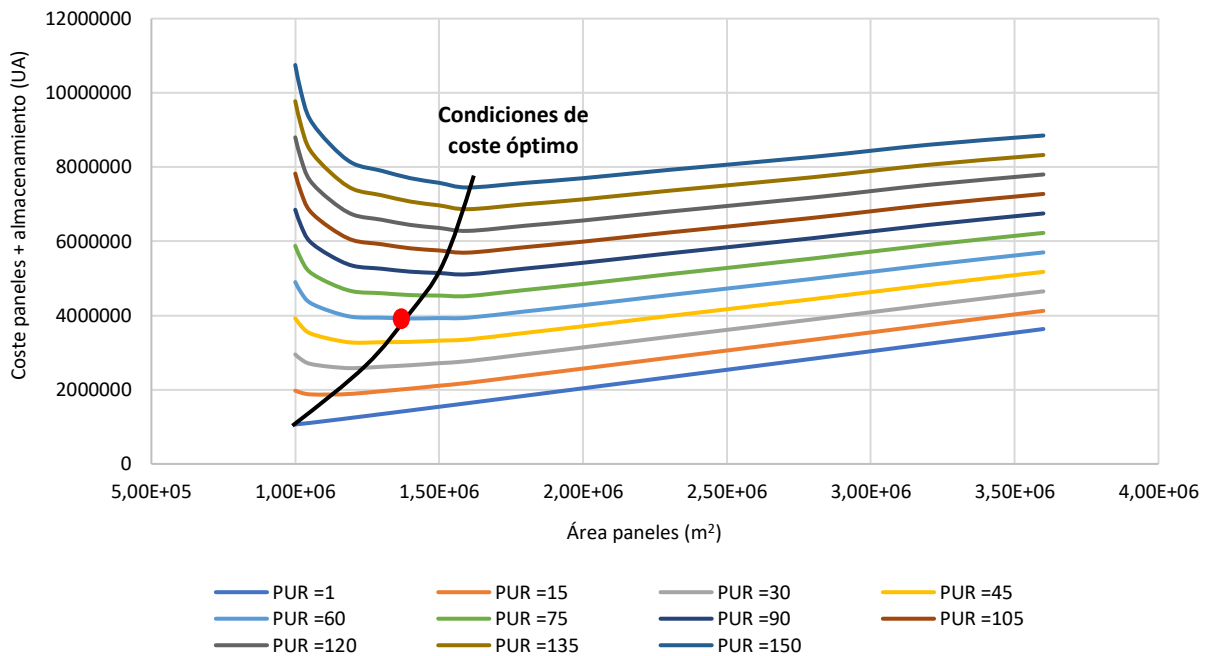
$$\text{Coste paneles} + \text{almacenamiento (UA)} = \text{Área paneles} + \text{Volumen almacenamiento} * PUR \quad (43)$$

Se han escogido varios valores de PUR y se ha calculado el coste que tendría cada una de las parejas de área de captadores y volumen de almacenamiento que componen el límite para satisfacer la demanda.

1	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150
---	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----

Tabla 18. Valores de PUR escogidos para realizar estudio de costes adimensionales

A continuación se muestra la gráfica que relaciona los costes totales del área de captadores y el volumen de almacenamiento en función del área de captadores y para cada uno de los valores de PUR tomados.

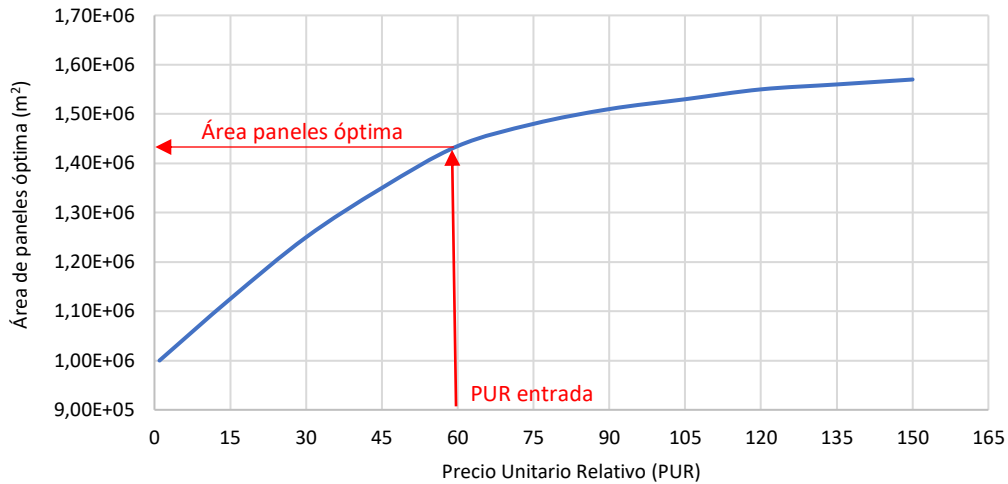


Gráfica 29. Coste óptimo de área paneles + almacenamiento para diferentes valores de PUR

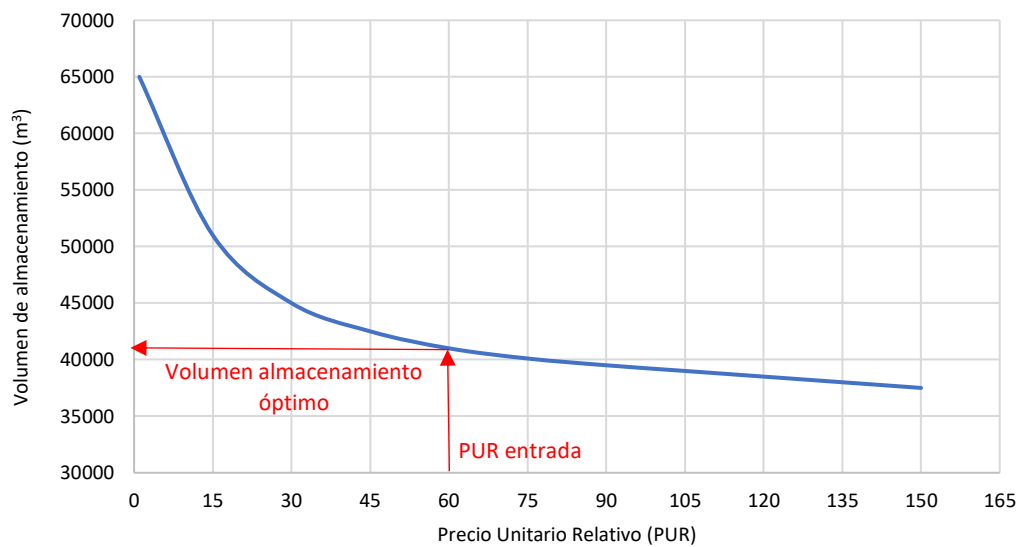
De la forma de la gráfica anterior, puede deducirse que para valores bajos de precio unitario relativo, es decir, cuando el precio del almacenamiento no es muy elevado en comparación con el precio de los paneles, las condiciones óptimas de coste se dan para valores de área de paneles bajos y volúmenes de almacenamiento elevados. Conforme aumenta el PUR, la tendencia va variando, resultando más viable económicamente disponer de áreas de captadores más extensas y menos volumen de almacenamiento.

Se observa que las condiciones de coste óptimo no sobrepasan nunca los 2 000 000 m² de área del campo solar, ya que son áreas muy extensas como para que resulte rentable económicamente.

Para ilustrar con un ejemplo lo explicado anteriormente, se han representado el área de paneles óptima y el volumen de almacenamiento óptimo en función del precio unitario relativo.



Gráfica 30. Área de paneles óptima según el PUR



Gráfica 31. Volumen de almacenamiento óptimo según el PUR

Tal y como ya se ha explicado anteriormente, el área de paneles óptima aumenta conforme aumenta el PUR, hasta estabilizarse por debajo de los 1 600 000 m², como se puede apreciar en la gráfica 30. El volumen de almacenamiento, en cambio, disminuye al aumentar el PUR, con una asíntota horizontal por encima de los 35 000 m³.

A modo de ejemplo se ha tomado un valor de PUR = 60 y se ha determinado la pareja de área del campo y volumen de almacenamiento óptimos, además del coste adimensional que tendría este caso.

PUR = 60	
Coste paneles + almacenamiento (UA)	4 000 000
Área paneles óptima (m²)	1 430 000
Volumen almacenamiento óptimo (m³)	41 000

Tabla 19. Coste, área de paneles y volumen de almacenamiento óptimos con PUR = 60

5.3. CONCLUSIONES

5.3.1. Conclusiones sobre el trabajo

El objetivo de este Trabajo de Final de Grado ha sido realizar un análisis energético de una central termo-solar, mediante la implementación de un modelo en *Microsoft Excel*. Una vez implementado y validado el modelo, se ha utilizado para definir la relación óptima entre el área de captadores solares que posee una central y volumen de almacenamiento térmico necesario para satisfacer la demanda eléctrica.

Después de obtener la curva que relaciona las dos variables anteriores, se puede concluir que conforme mayor sea el área del campo solar que se quiera establecer, menor será el volumen de almacenamiento necesario en la central, dentro de los límites que condicionan el correcto funcionamiento de la central, que han sido establecidos.

Al disponer de un número elevado de captadores solares, se obtiene mucha energía térmica gracias al campo solar, pues la cantidad de aceite térmico que debe circular por el campo aumenta proporcionalmente con el área. El hecho de obtener grandes cantidades de aceite térmico caliente a la salida del campo va a hacer que el tanque de almacenamiento caliente se encuentre lleno durante más tiempo, de manera que cuando haya necesidad de vaciarlo porque el aporte solar sea insuficiente o durante las horas nocturnas, el descenso será menos acusado que si el área del campo solar fuese más reducida. Por tanto con áreas grandes de campo solar, el volumen de almacenamiento necesario desciende.

Además de la obtención de la relación óptima entre área de captadores y volumen de los tanques de la central termo-solar, se ha estudiado el coste óptimo de las diferentes combinaciones de área y volumen teniendo en cuenta el coste unitario relativo entre las dos variables. Se ha concluido que conforme aumenta el precio del sistema de almacenamiento respecto al de los paneles solares, la solución óptima es aumentar el área de captación y disminuir el volumen de almacenamiento, hasta llegar a un punto en el que ambas variables se estabilizan, siendo el área máxima 1 600 000 m² y el volumen mínimo 36 000 m³.

5.3.2. Conclusiones sobre la metodología

La metodología que se ha seguido para la realización del trabajo ha resultado bastante útil y se podría aplicar en multitud de estudios académicos como profesionales.

Al tratarse de un trabajo académico, ha sido importante dedicar una cantidad considerable de tiempo para definir y concretar el problema que se quería estudiar.

Una vez definido el objetivo del trabajo, se ha estudiado el contexto en el que este está ubicado, y se han determinado las características y variables que era necesario estudiar y conocer previamente a la realización del modelo. Cuando se han tenido definidas, se ha realizado un estudio previo que ha permitido, además de conocer características importantes de la central termo-solar, adquirir soltura en el manejo de las ecuaciones y la aplicación informática Excel.

Al realizar el modelo sí que se han detectado metodologías de trabajo que podrían mejorarse, como por ejemplo el método para realizar las iteraciones necesarias para cada hora del año en Excel. Se podría haber programado de manera que para cada hora del día se ajustase el número de iteraciones a las necesidades de esa hora, en lugar de escoger un número fijo de ellas, pues para la mayoría de horas del año, se han realizado cálculos innecesarios que han podido ralentizar los tiempos de cálculo. Se ha utilizado esta metodología por su sencillez, pero si hubiera de repetirse el trabajo sería interesante analizar otras opciones.

Con el modelo finalizado y validado por el tutor la obtención de los resultados finales no ha sido en exceso costosa, si no que se ha empleado mucho más tiempo en conseguir que el modelo de la central arrojarase los resultados correctos.

En general, la metodología utilizada para realizar el trabajo ha sido correcta, salvo alguna pequeña optimización de los tiempos de cálculo, como ya se ha explicado.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

6.1. BIBLIOGRAFÍA

Centrales termo-solares CCP – *Renovetec* – 2012

Santiago García Garrido

Termodinámica técnica – *Editorial UPV* – 2002

J.L. Gómez Ribelles, M. Monleón Pradas y G. gallego Ferrer

6.2. TEMARIO

Centrales térmicas. Cogeneración

Curso 2017/2018

Responsable de la asignatura: Jean Joseph Pierre Arregle

Energías renovables térmicas

Curso 2016/2017

Responsable de la asignatura: David Alfonso solar

Termodinámica técnica

Curso 2016/2017

Responsable de la asignatura: José Luis Gómez Ribelles

6.3. PÁGINAS WEB

PROTERMOSOLAR – Asociación Española para la promoción de la Industria Termo-solar

<https://www.protermosolar.com/proyectos-termsolares/mapa-de-proyectos-en-espana/>

AEMET – Atlas de radiación solar en España

http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf

EnergyPlus- Weather Data

https://energyplus.net/weatherlocation/europe_wmo_region_6/ESP//ESP_Sevilla.083910_SWEC

Red Eléctrica Española (REE)

<http://www.ree.es/es/actividades/demanda-y-produccion-en-tiempo-real>

ESIOS – Sistema de información del operador del sistema

<https://www.esios.ree.es/es>

MODELADO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CENTRAL ELÉCTRICA TERMO-SOLAR DE 30 MW CON ALMACENAMIENTO DE CALOR

PRESUPUESTO

CUADRO DE UNITARIOS

CÓDIGO	CANTIDAD	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
MAT01	5	ud	Material de escritura	0,75	3,75	
MAT02	100	ud	Papel	0,02	2	
MAT03	1	ud	Calculadora científica	35	35	
						40,75
DAT01	1	ud	Archivo epw Sevilla	0	0	
DAT02	1	ud	Archivo demanda peninsular	0	0	
						0
LIC01	1	ud	Licencia de uso X <i>Steam Tables</i>	0	0	
						0
DES01	300	h	Ingeniera de la Energía	15	4500	
DES02	280	h	Ordenador	0,05	14	
						4514

Materiales	40,75
Datos	0
Licencias	0
Desempeño	4514
TOTAL	4554,75