



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 TERMOSOLAR DE 80 MW CON ALMACENAMIENTO TÉRMICO

AUTOR: FRANCISCO JAVIER LÁZARO BUENDÍA

TUTOR: JEAN JOSEPH PIERRE ARRÈGLE

Curso Académico: 2017-18

AGRADECIMIENTOS

“A mi familia y amigos, por apoyarme durante todo este tiempo;
y a mi tutor, por su paciencia y consejos”

RESUMEN

El presente documento se trata del informe del estudio de la modelización y optimización de una central solar térmica con almacenamiento operando en un sistema aislado, para satisfacer una determinada demanda energética, estando la misma sujeta a unas determinadas condiciones climatológicas y técnicas.

En el documento se mostrará pues, todos los planteamientos, metodologías, cálculos, resultados y conclusiones de estos en lo referente a la optimización del modelo de la central solar térmica y de todos sus parámetros de funcionamiento, para con ello poder desarrollar un informe que pueda servir de planteamiento y ayuda a la hora de realizar el propio proyecto de diseño de la central.

Palabras Clave: Central térmica, Central solar térmica, Termosolar, Rankine, Ciclo de vapor, Energía, Energía renovable, Potencia, Inversión, Captación solar, Almacenamiento, Almacenamiento térmico.

RESUM

El present document es tracta del informe del estudi de la modelització y optimització de una central solar tèrmica amb emmagatzematge i operant en un sistema aïllat, per satisfer una determinada demanda energètica, estant la mateixa subjecta a unes determinades condicions climatològiques i tècniques.

Al document es mostraran doncs, tots el plantejaments, metodologies, càlculs, resultats i conclusions d'aquestos en referent a l'optimització del model de la central solar tèrmica i de tots els seus paràmetres de funcionament, envers açò poder desenvolupar un informe que puga servir de plantejament i ajuda a l'hora de realitzar el propi projecte de diseny de la central.

Paraules Clau: Central tèrmica, Central solar tèrmica, Termosolar, Rankine, Cicle de vapor, Energia, Energia renovable, Potencia, Inversió, Captació solar, Emmagatzament, Emmagatzament tèrmic.

ABSTRACT

This document is the report of the study of the modeling and optimization of a Thermal solar power plant with thermal storage and working in an isolated system in order to satisfy a certain electricity demand being influenced by a certain climatological and technical conditions.

The document will show all the approaches, methodologies, calculations, results and conclusions of this results with regard to the optimization of the central model and all its parameters in order to make this study become helpful when it comes to implement the design project of the central.

Keyword: Thermal power plant, Solar thermal power plant, Ranking, Steam cycle, Energy, Renewable Energy, Power, Investment, Solar collection, Storage, Thermal storage.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG:

- Memoria
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA:

Capítulo 1. Introducción

1.1. Objetivo del documento	10
1.2. energía solar térmica.....	11
1.3. Instalaciones solares térmicas de alta temperatura	12
1.3.1. El captador solar.....	13
1.3.1.1. Captación solar mediante colectores cilindro-parabólicos.....	13
1.3.1.2. Captación solar mediante receptor central o de torre	14
1.3.1.3. Captación solar mediante colectores de Fresnel	15
1.3.1.4. Captación solar mediante concentradores disco-parabólicos.....	16
1.3.2. Almacenamiento térmico.....	16
1.3.2.1. Almacenamiento térmico mediante calor sensible	17
1.3.2.2. Almacenamiento térmico mediante calor latente.....	17
1.3.3. Ciclo de Rankine	18
1.3.4. Disipación de calor	20

Capítulo 2. Análisis Previo

2.1. Contexto de la instalación.....	21
2.2. Modelo general de la instalación	26

Capítulo 3. Estudio Previo

3.1. Objetivo del capítulo	29
3.2. Modelo de ciclo para el estudio previo.....	29
3.3. Metodología empleada para obtener los regimenes de funcionamiento de las bombas...	30

3.4. Análisis de resultados del estudio previo del modelo.....	33
3.5. Conclusiones del estudio previo del modelo	35
Capítulo 4. Estudio del Modelo	
4.1. Objetivo del capítulo	37
4.2. Modelo de ciclo para el estudio	37
4.3. Metodología de cálculo.....	40
4.2.1. Desarrollo de ecuaciones del sistema.....	40
4.2.2. Cálculo del número de iteraciones necesarias para estabilizar un parámetro.....	43
Capítulo 5. Análisis de Resultados	
5.1. Objetivo del capítulo	45
5.2. Metodología empleada	45
5.3. Resultados en simulaciones diarias.....	46
5.3. Resultados de la SIMULACIÓN ANUAL	52
5.4. Resultados del estudio paramétrico	54
5.5. Conclusiones.....	58
5.5.1. Conclusiones sobre el estudio paramétrico	58
5.5.1. Conclusiones sobre la metodología	58
Capítulo 6. Referencias	
6.1. Bibliografía	59
6.2. Temario de asignaturas.....	59
6.3. Páginas web.....	60

MEMORIA

MODELADO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA DE 80 MW

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO DEL DOCUMENTO

El presente Trabajo de Final de Grado (TFG), tiene múltiples metas los cuales serán expuestas a continuación. Se podría dividir en dos objetivos diferenciados, por un lado, el objetivo meramente académico y por otro lado un objetivo técnico.

Primeramente, cabe mencionar que el principal objetivo de dicho proyecto es demostrar los conocimientos logrados a lo largo del grado en las diversas asignaturas que como alumno he cursado.

Los conocimientos que se pretenderá demostrar en el documento serán principalmente los adquiridos en las asignaturas de Termodinámica, Termodinámica Técnica, Motores Térmicos, Transmisión de Calor, Energía y Desarrollo Sostenible y Combustión y Generación de Calor.

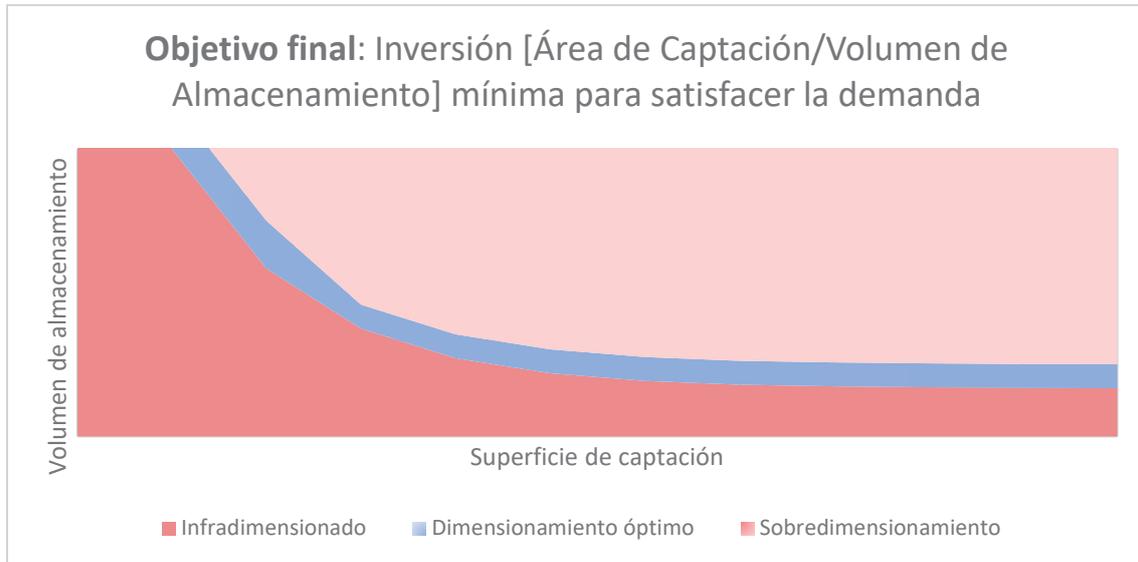
Por otro lado, desde un punto de vista estrictamente técnico, la finalidad del presente TFG será el estudio de las distintas posibilidades de optimización que se nos presentan antes de comenzar a desarrollar un supuesto proyecto ante una determinada demanda eléctrica y una determinada climatología. El objetivo es encontrar un resultado o una serie de resultados a partir de la cual se podría comenzar a desarrollar un proyecto, proporcionando una serie de medidas de optimización paramétrica de los valores fundamentales del determinado ciclo, a la vez que un abanico de posibilidades de dimensión con las cuales se podría satisfacer la mencionada demanda eléctrica y a partir de las cuales se podría realizar el estudio económico para conocer la solución más favorable, trabajando, en la medida de lo posible, dentro de los rendimientos más altos que se puedan dar durante el año alcanzados gracias al control de determinados parámetros a partir de los distintos datos de entrada.

Para el desarrollo de dicha modelización y optimización se utilizará la herramienta *Microsoft Excel* que, aunque sencillo, este software nos proporciona la potencia de computación y las posibilidades necesarias para la realización de los modelos matemáticos indispensables, por un lado, para la optimización de la central, y por el otro lado, para la simulación del comportamiento de esta a lo largo de un año.

En resumidas cuentas, el objetivo de dicho trabajo es desarrollar los cálculos necesarios para obtener las distintas soluciones de dimensionamiento óptimas y energéticamente eficientes de una central solar térmica, partiendo de la forma más simplificada de la misma para así obtener los parámetros más generales e ir desarrollando una forma más compleja de dicha central en la cual se encuentre el mayor número posible de parámetros optimizados, para con ello tener una herramienta una vez conocidos los costes de inversión de los distintos elementos a dimensionar, sirva de base a la hora de estudiar la inversión del correspondiente proyecto.

El resultado esperado de dicho proyecto es la obtención de un abanico de posibles soluciones a partir de las cuales se podría realizar un estudio tanto económico como técnico para obtener

la solución más favorable ante una posible inversión, previo a la realización del correspondiente proyecto atendiendo a todas las variables que pueden afectar a este.



Gráfica 1. Resultado esperado del estudio

Por último, cabe mencionar el objetivo ambiental del trabajo al tratarse del estudio de una central basada en una energía renovable, como lo es la energía solar, para cubrir la demanda energética de una determinada población, dada la más que justificada actual preocupación por el desarrollo sostenible de las formas de obtención de energía.

1.2. ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

La energía solar ha supuesto a lo largo de la última década una de las formas de obtención energética más prometedora, la inversión en dicha tecnología se ha estado viendo fuertemente intensificada, tanto en solar fotovoltaica (en mayor medida), como en solar térmica.

La energía solar podemos definirla como la energía renovable que podemos aprovechar a partir de la radiación electromagnética que llega a la tierra procedente del sol.

El tema en el que nos enfocamos en el presente trabajo es en la energía solar térmica, la cual se define como el aprovechamiento de la radiación solar para la producción de calor.

Para el presente trabajo se ha optado por la utilización de la energía solar térmica debido a que nos ofrece una gran cantidad de posibilidades para la generación “en isla”, es decir, para suplir de forma totalmente independiente una demanda energética que puede ser variable o no, gracias a los sistemas de almacenamiento energético que se pueden implementar en las mismas.

Podemos dividir el aprovechamiento de la energía solar térmica en dos grandes bloques:

- **Instalaciones solares térmicas de baja temperatura**

Se correspondería al aprovechamiento de la energía solar para la producción de agua caliente, tanto ACS (agua caliente sanitaria) como para calefacción. Las temperaturas de operación se encontrarían en un espectro entre 40°C y 60°C. Dicha tecnología sería adaptable tanto para el uso doméstico como para el sector terciario.

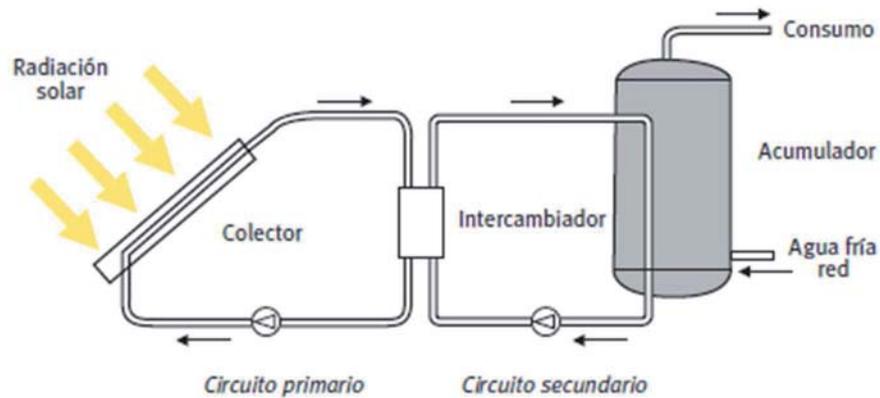


Ilustración 1. Esquema instalación solar térmica de baja temperatura

- **Instalaciones solares térmicas de alta temperatura**

Dicha tecnología, sobre la cual está enfocada el trabajo, se define como el aprovechamiento de la energía procedente de la radiación solar para la producción de potencia eléctrica a través de su previa transformación a energía térmica. Dicha tecnología será expuesta de forma en más profundidad a continuación.

1.3. INSTALACIONES SOLARES TÉRMICAS DE ALTA TEMPERATURA

Como se ha explicado previamente, el principio general de la energía solar térmica de alta temperatura consiste en el aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol para con ella generar energía térmica y mediante esta producir potencia eléctrica, no sin antes pasar por potencia mecánica.

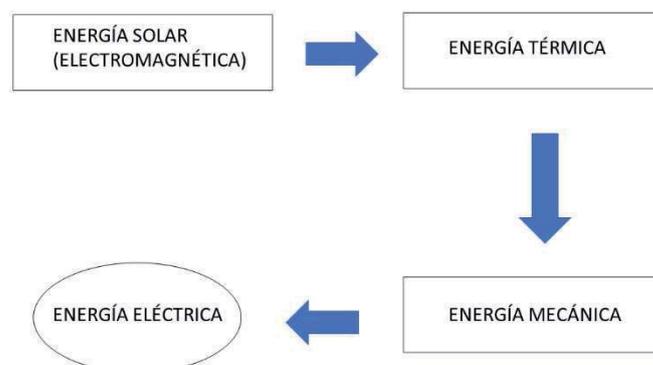


Ilustración 2. Esquema de proceso de la energía solar térmica de alta temperatura

La intención en todos los casos es la de calentar vapor para, mediante un ciclo de Rankine, generar potencia eléctrica a través de una turbina y un generador. Dicho vapor puede ser calentado tanto directamente por la radiación o por aceites o sales térmicas que actúan como proceso intermedio entre la captación solar y la generación de vapor, otorgando así un control mayor sobre el sistema y mayores posibilidades al mismo, las cuales se expondrán más adelante.

1.3.1. El captador solar

Podemos diferenciar los distintos tipos de centrales solares térmicas según su forma de captación y concentración de la radiación solar. El concentrador solar es el elemento encargado de transformar la energía solar, en forma de energía electromagnética, en energía térmica, concentrando los rayos en un punto o un conjunto de puntos para calentar un fluido. Las distintas formas de captación se expresan a continuación:

1.3.1.1. Captación solar mediante colectores cilindro-parabólicos

Es la forma más común de captación en lo respectivo a energía solar térmica de alta temperatura en el mundo actualmente. Se trata de un sistema de captación tipo modular, en el cual mediante espejos con forma de cilindro parabólico se concentran los rayos sobre una línea focal por la cual circula el fluido caloportador, se trata de una tecnología de elevado rendimiento en comparación a las que se expresarán a continuación.

En este sistema, el cual utilizaremos para el desarrollo del presente trabajo, se utiliza dicho fluido caloportador para producir vapor el cual, mediante un ciclo de Rankine, accionará una turbina convencional acoplada a un generador para producir energía eléctrica.

Dicha tecnología de captación solar concentra entre 60 y 80 veces la radiación solar indirecta, valor que se corresponde a lo que posteriormente denominaremos factor de concentración F .

En las centrales basadas en captadores solares cilindro-parabólicos encontramos que se alcanzan unas temperaturas máximas de unos 400 °C.

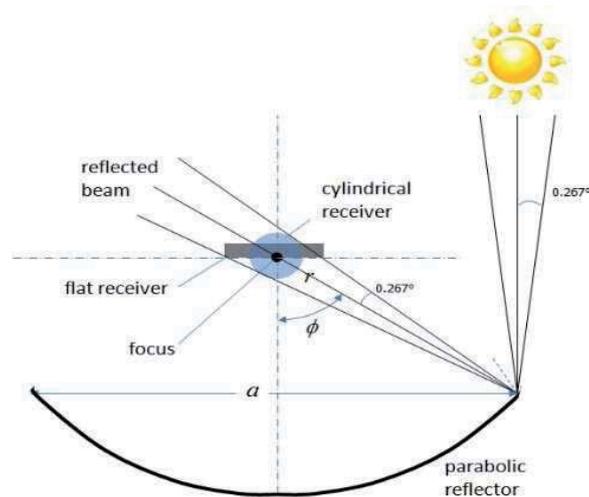


Ilustración 3. Esquema de captación de los captadores cilindro-parabólicos



Ilustración 4. Captadores solares cilindro-parabólicos

1.3.1.2. Captación solar mediante receptor central o de torre

Forma de captación solar basada en la concentración de la radiación solar en un punto, en lugar de una hilera de puntos como era el caso anterior. La tecnología está basada en la implantación de un campo de heliostatos que siguen al sol en dos ejes, estos heliostatos concentran la radiación en un mismo punto, situado por norma general sobre una torre.

En dicha forma de central solar térmica encontramos las temperaturas de operación más altas, alcanzando temperaturas que trabajan desde los 500°C hasta los 800°C .



Ilustración 5. Central Gemasolar, Sevilla

1.3.1.3. Captación solar mediante colectores de Fresnel

Se trata de una tecnología de captación con foco distribuido, donde los heliostatos, que tienen un grado de libertad para rotar sobre su eje y suelen ser planos o con una muy ligera curvatura, concentran la radiación solar sobre un receptor lineal situado sobre los mismos.

El fluido caloportador circula por el receptor lineal llegando a alcanzar temperaturas del orden de 300°C. Dicha tecnología resulta muy interesante para la generación directa de vapor a bajas temperaturas, es decir, sin circuito primario y secundario, sino directamente integrados en el ciclo de Rankine.

Dicha tecnología es utilizada en centrales solares térmicas de menor potencia, comúnmente alrededor de los 30 MW.



Ilustración 6. Línea instalada en la Plataforma Solar de Almería

1.3.1.4. Captación solar mediante concentradores disco-parabólicos

La siguiente tecnología de captación solar es la que presenta mayores rendimientos globales de ciclo. Su sistema de captación está basado en una superficie captadora de forma parabólica que concentra la radiación solar sobre un punto en el que se alcanzan temperaturas muy altas, pudiendo llegar a un máximo de 1000°C aproximadamente.

Generalmente, el fluido caloportador acciona un motor Stirling situado en el mismo foco de concentración, el cual acoplado a un generador produce energía eléctrica dentro del mismo bloque de captación.

Para reducir costes en el reflector, el disco parabólico puede ser sustituido por lentes de Fresnel dispuestas de forma que del mismo modo generan un disco parabólico.



Ilustración 7. Captador solar cilindro-parabólico de la Plataforma Solar de Almería

1.3.2. Almacenamiento térmico

La mayoría de las centrales solares térmicas están provistas de sistemas de almacenamiento térmico para poder producir energía incluso en momentos donde la irradiancia es muy baja o incluso nula.

El almacenamiento térmico resulta especialmente interesante para centrales que trabajen “en isla” permitiendo modular la potencia producida a la demanda energética, liberando dicha energía térmica almacenada cuando existe déficit y almacenándola cuando existe superávit energético.

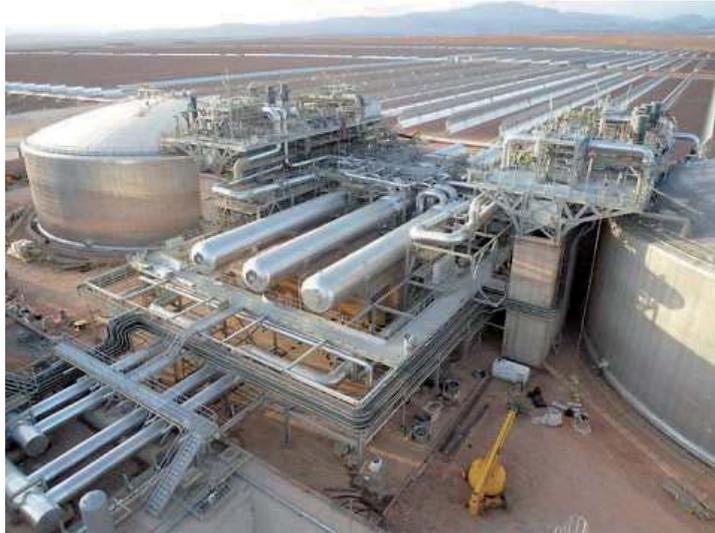


Ilustración 8. Tanques de sales fundidas en NOORo I, Ourzazate, Marruecos

Podemos diferenciar entre tipos de almacenamiento térmico según el método que emplean para almacenar el calor:

1.3.2.1. Almacenamiento térmico mediante calor sensible

Método más sencillo, se trata de calentar un determinado material para aumentar su temperatura y con ello poder utilizar dicho material para calentar el fluido de trabajo cuando se requiera.

Existen varias formas de almacenamiento térmico mediante calor sensible clasificables según el material que se caliente:

- **Aceites orgánicos:** Se trataría de almacenar el propio fluido de trabajo o cualquier otro aceite de calor específico similar a elevadas temperaturas en tanques para su uso posterior.
- **Sales fundidas:** La presente tecnología resulta interesante para centrales térmicas donde el fluido de trabajo alcance elevadas temperaturas, pues, debido a las características térmicas de dichas sales, se mantendrán estables para calentar el fluido de trabajo cuando se requiera.
- **Lecho de rocas:** Este sistema, menos común, consiste en calentar rocas que se mantienen almacenadas en tanques para, cuando sea necesario, calentar aire con el que se calentará el fluido de trabajo.

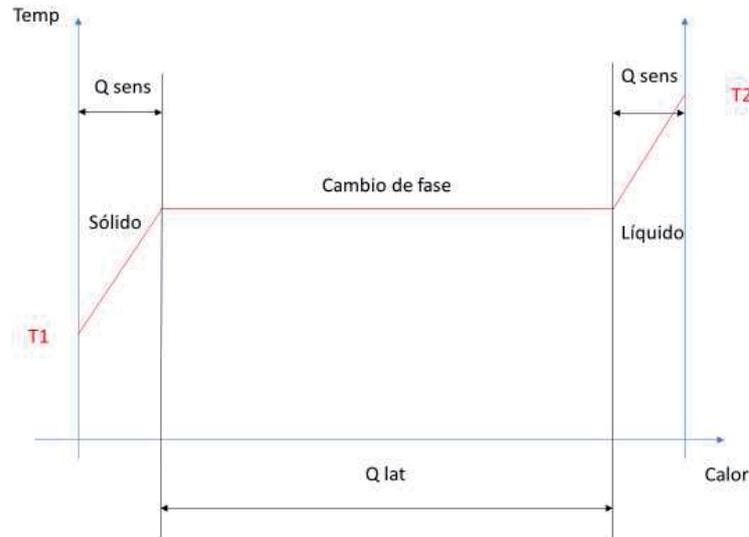
1.3.2.2. Almacenamiento térmico mediante calor latente

El objetivo de dicho sistema es almacenar calor aprovechando el cambio de fase de la materia que se pretenda utilizar, existen determinados materiales que tienen la capacidad de acumular una gran cantidad de calor en los cambios de fase, especialmente en el cambio sólido – líquido, estos materiales son conocidos como PCM (*Phase Change Materials*).

Por lo tanto, cuando existe un exceso de calor en el sistema, este se utiliza para fundir este PCM y cuando existe una elevada demanda energética y es necesario apoyo del sistema de

almacenamiento térmico, este material se congela en un proceso exotérmico para calentar el fluido de trabajo.

Este supone un sistema de almacenamiento interesante desde el punto de vista de la relación del calor almacenado y del volumen de almacenamiento.



Gráfica 2. Esquema de almacenamiento por calor latente

1.3.3. Ciclo de Rankine

El ciclo de Rankine es el ciclo de potencia a partir del cual en las centrales térmicas, entre las que incluimos las centrales solares térmicas (a excepción de las que utilizan el motor Stirling) se convierte la potencia térmica en potencia mecánica para poder transformar ésta en eléctrica.

Este ciclo se basa en el uso del vapor de agua como fluido de trabajo, haciéndose valer del calentamiento y cambios de fase de este para el funcionamiento del ciclo.

El ciclo de Rankine en su forma más elemental consta de los siguientes elementos:

- **Caldera:**

Elemento encargado de aumentar la entalpía del vapor a partir del cambio de fase de líquido a gas y el aumento de la temperatura de éste.

- **Turbina:**

Elemento en el cual, el vapor con altos valores de entalpía y a elevada presión pierde su energía asociada para transformarla en trabajo, a partir de la disminución de la presión del mismo.

- **Condensador:**

Elemento por el cual, mediante la disipación de calor, que puede ser llevada a cabo de distintas formas tal y como se expresará más adelante, el vapor que sale de la turbina cambia de fase hasta llegar a estar en forma de líquido saturado.

Con este elemento aprovechamos el vapor de la turbina pudiéndolo recircularlo de nuevo a la turbina. Por otro lado, al poder el condensador trabajar a presiones inferiores a la atmosférica, aumenta el rendimiento de la turbina.

- **Bomba:**

Bomba hidráulica a partir de la cual se eleva la presión del líquido saturado hasta la que haya establecido como presión de vapor, es decir, la de entrada a la turbina.

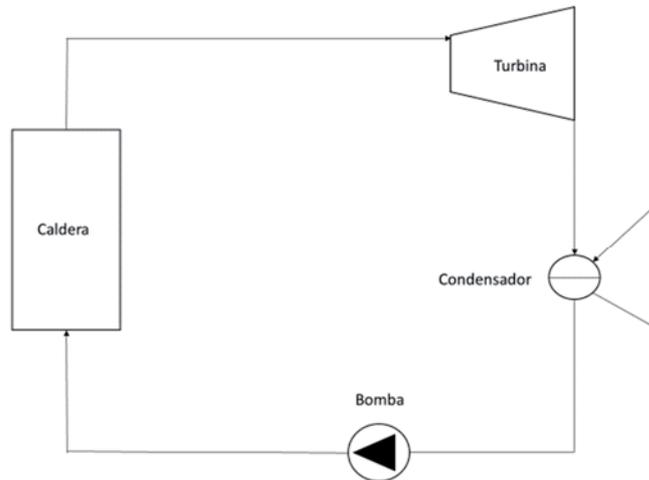
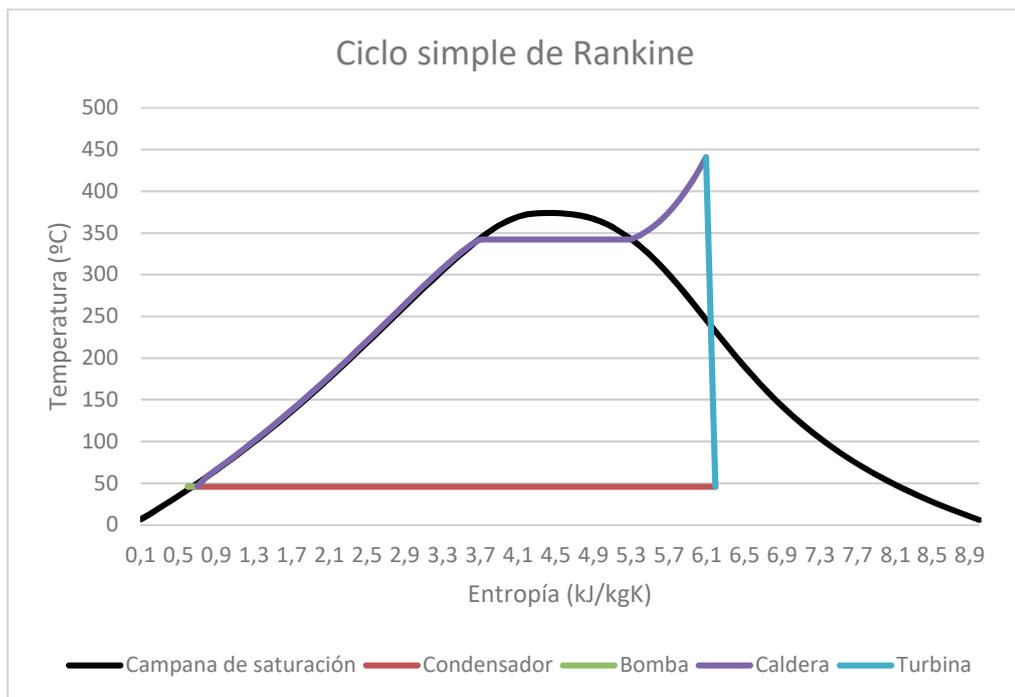


Ilustración 9. Esquema básico de ciclo de Rankine



Gráfica 3. Diagrama T-S del Ciclo de Rankine simple

Al ciclo de Rankine básico se le pueden añadir una serie de modificaciones para mejorar el funcionamiento y el rendimiento global del ciclo, las cuales se exponen a continuación:

1.3.4. Disipación de calor

En todo ciclo de Rankine es necesario un sistema de disipación de calor para realizar el cambio de fase a líquido saturado en el condensador.

El condensador es un elemento de gran potencia térmica, en el cual, como se ha explicado previamente, se produce el cambio de fase gas-líquido para recircular el vapor de trabajo a la caldera, cerrando así el ciclo del agua.

Existen diversas formas de llevar a cabo dicha disipación, con un circuito abierto, de existir masas de agua de elevado caudal, por ejemplo, porque la central está implantada en las cercanías del mar, donde la temperatura anual del agua se puede considerar constante. La condensación puede ser llevada a cabo circulando elevados caudales de dicha agua para disipar el determinado calor. Gracias al uso del efecto Venturi, las bombas de circulación de dichos caudales de agua solo tienen que superar las pérdidas de carga en las respectivas tuberías.

Por otro lado, si por la orografía sobre la que está dispuesta la central no se dispusiesen dichas masas de agua, el sistema más efectivo para disipar dicho calor son las torres de refrigeración, en las que se aprovecha la reacción endotérmica que supone el cambio de fase líquido – gas aprovechando así tanto el calor sensible como el calor latente.



Ilustración 9. Torres de refrigeración de la Central Nuclear de Cofrentes

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS PREVIO

2.1. CONTEXTO DE LA INSTALACIÓN

En el siguiente apartado se mostrarán las características particulares del problema al que nos enfrentamos, comenzando por un análisis del contexto general sobre el que se pretende actuar y se seguirá introduciendo la metodología que se va a emplear en los siguientes capítulos para llegar a las distintas soluciones.

Para el presente trabajo se ha tomado un contexto geográfico inspirado en las zonas de economía mayormente turística del mediterráneo, dato que como observaremos más adelante se reflejará en las representaciones anuales de datos climatológicos y de demanda energética.

Los valores de las distintas variables climatológicas se han obtenido a partir de valores históricos almacenados en las bases de datos del *U.S. Department of Energy* y dispuestos en la página web del programa de simulación de cargas térmicas *Energy Plus*.

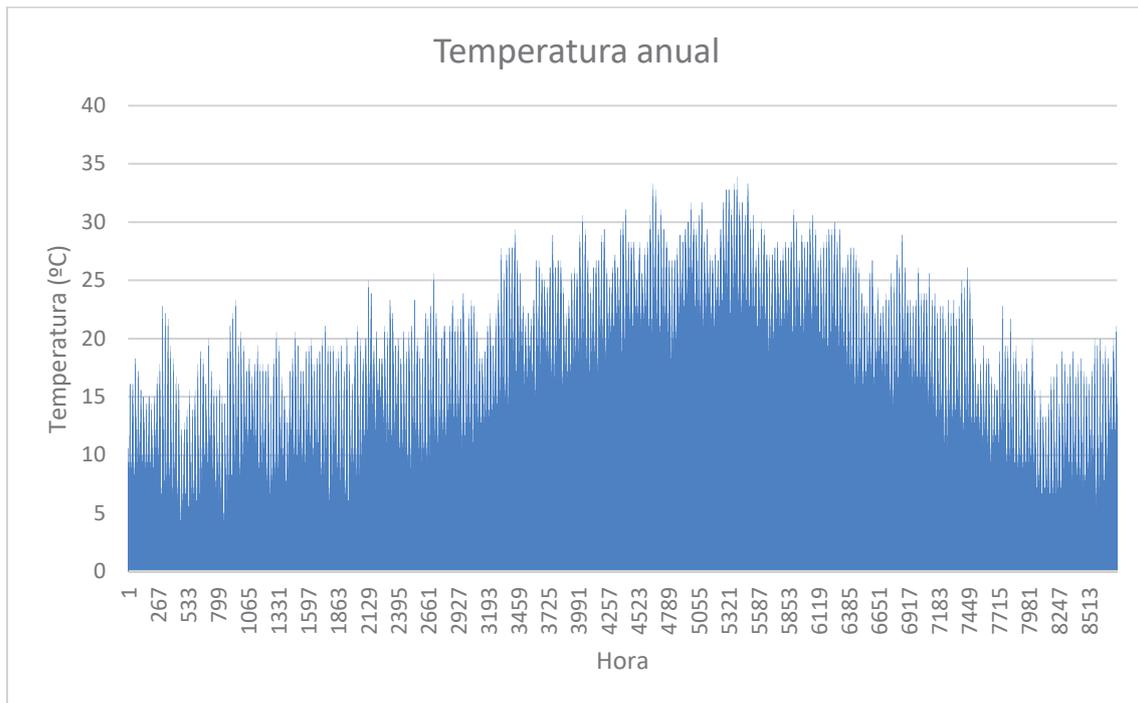
Los valores que se considerarán importantes para el desarrollo serán la irradiancia global incidente y la temperatura ambiental. En otras circunstancias la humedad relativa del ambiente resultaría un parámetro de vital importancia atendiendo al funcionamiento de la torre de refrigeración, pero en nuestro caso al situar la central en lugares del mediterráneo, en los que se prevé proximidad a la costa, como de desarrollará en el apartado de contexto técnico de la instalación, dicho valor no resultará determinante pues se supondrá proximidad a la costa y con ello capacidad de poder bombear grandes cantidades de agua del mar (que se supondrá de temperatura constante a lo largo del año) para la refrigeración del condensador del ciclo de Rankine que se va a desarrollar.

Por otro lado, en el presente apartado se hablará también sobre el perfil de demanda al que se someterá la instalación, este perfil de demanda supondrá un valor principal para el dimensionado de la misma pues esta se calibrará de forma que dicha demanda sea satisfecha de forma ininterrumpida por la central, todo ello sin hacer uso de elementos auxiliares como calderas de apoyo.

Este perfil energético se ha tomado como una demanda variable con una potencia máxima de 80 MW en un sistema aislado de la red. Los distintos valores horarios se han obtenido siguiendo un método de escalado, dado que resulta imposible acceder a valores históricos reales de lugares muy específicos lo que se ha hecho ha sido obtener los perfiles históricos de demanda en España anual de forma horaria que nos proporciona REE (Red Eléctrica de España) en su base de datos de ESIOS (Sistema de Información del Operador de Sistema) y a partir de estos valores se ha escalado para obtener un máximo de 80 MW y dimensionar

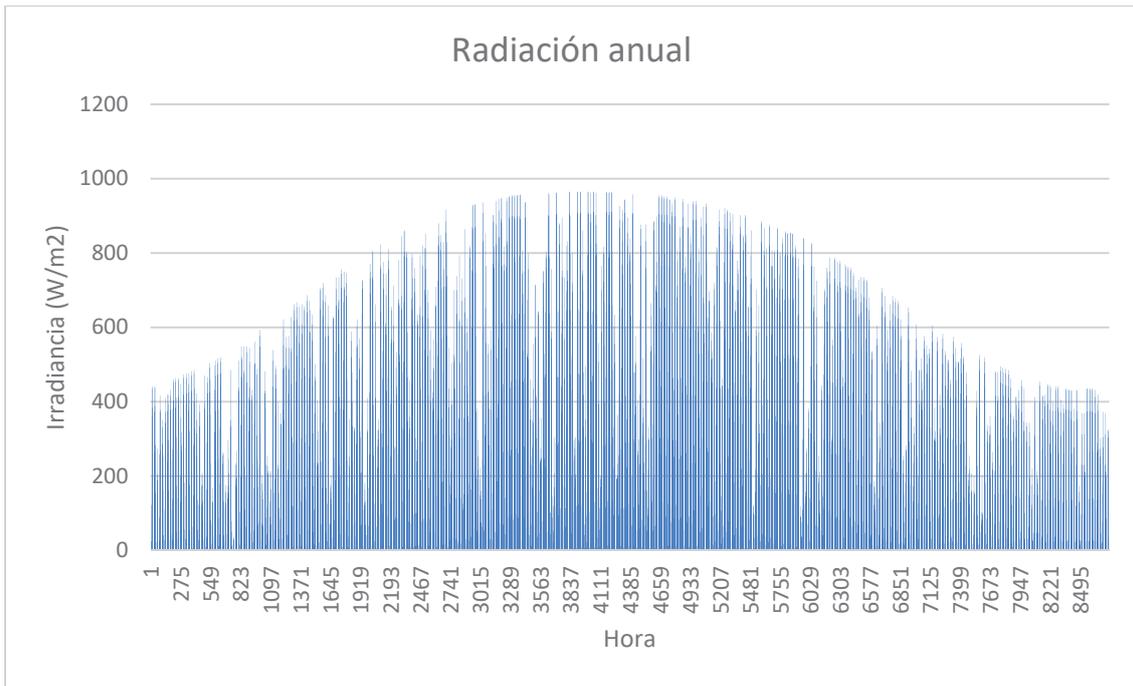
proporcionalmente el resto de horas. Atendiendo al contexto geográfico de la instalación se ha escalado la curva de demanda por partes, aplicando factores de ponderación en función del mes que se trata, pretendiendo así poder obtener un perfil de demanda lo más realista posible para una zona turística como ya se ha comentado.

A continuación, se representan los valores anuales tanto de datos climatológicos como de demanda energética para el caso de estudio:



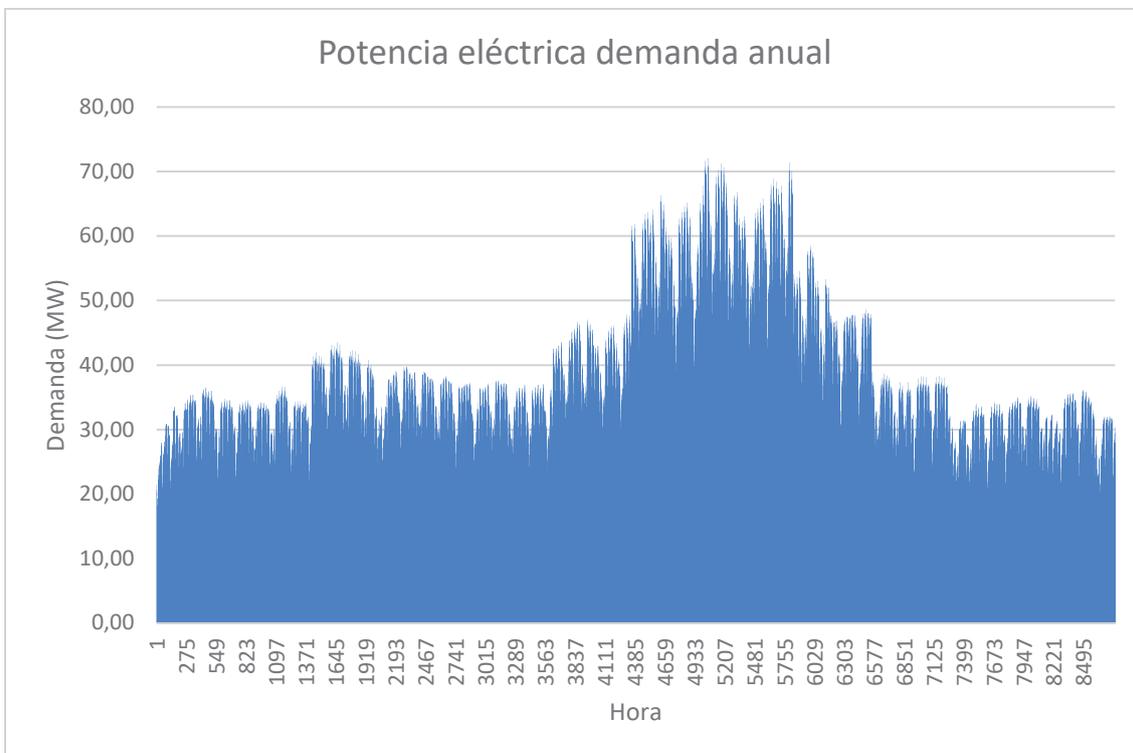
Gráfica 4. Temperatura ambiental anual

Se puede observar que en la zona en la que se pretende implementar la instalación la temperatura no tiene grandes variaciones a lo largo de año, teniendo temperaturas muy altas en los meses de verano, que llegan a alcanzar valores muy próximos a los 35 °C y viendo que en invierno estas se sitúan en valores medios en torno a los 10 °C. Se trata de un clima cálido y como veremos más adelante afectará, aunque en pequeña medida, positivamente al rendimiento de los colectores solares.



Gráfica 5. Irradiancia incidente anual

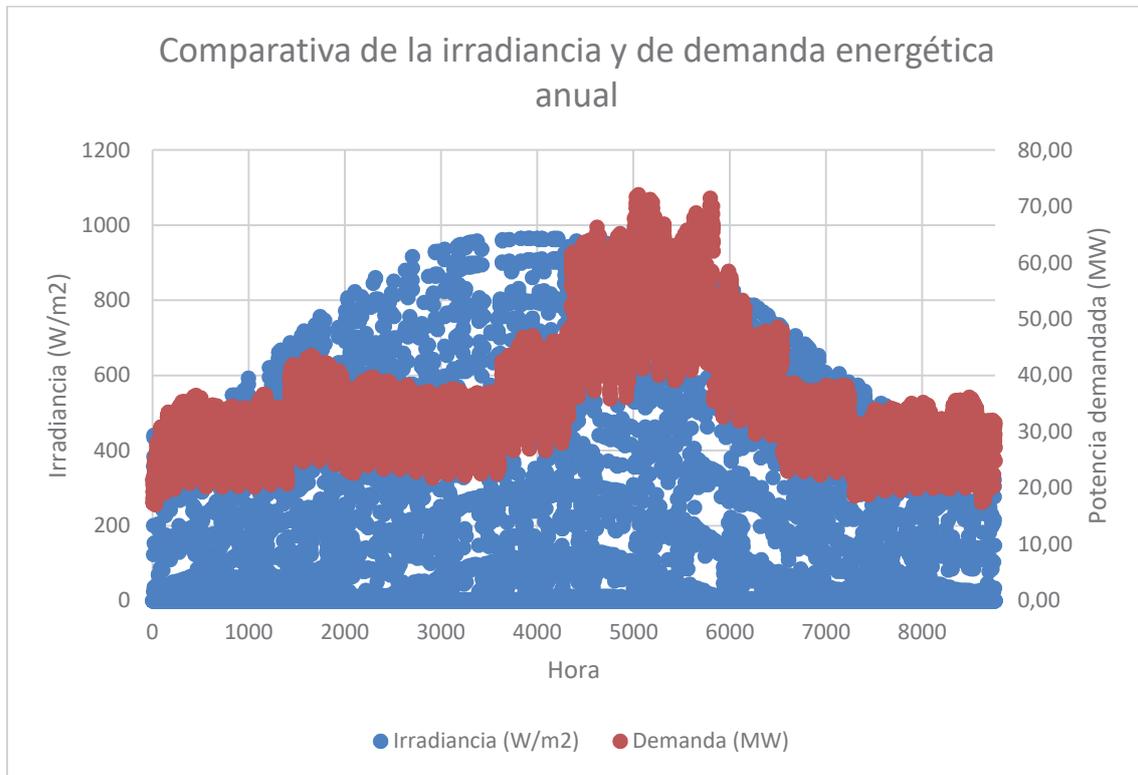
En cuanto a la radiación anual, podemos observar el elevado valor de irradiancia que se alcanza en los meses cálidos, lo que hace óptima la producción energética en los mismos, pues la irradiancia supone la “materia prima” de la producción energética de las centrales solares.



Gráfica 6. Potencia eléctrica anual demandada

Al tratarse de una zona turística podemos observar una clara tendencia a aumentar considerablemente la demanda energética en verano, más concretamente en los meses de julio y agosto, que es cuando la actividad turística se intensifica.

A continuación, se ha considerado interesante realizar una comparativa entre la potencia eléctrica demandada y la irradiación anual para intentar aportar la solución técnica más conveniente para satisfacer dicha demanda:

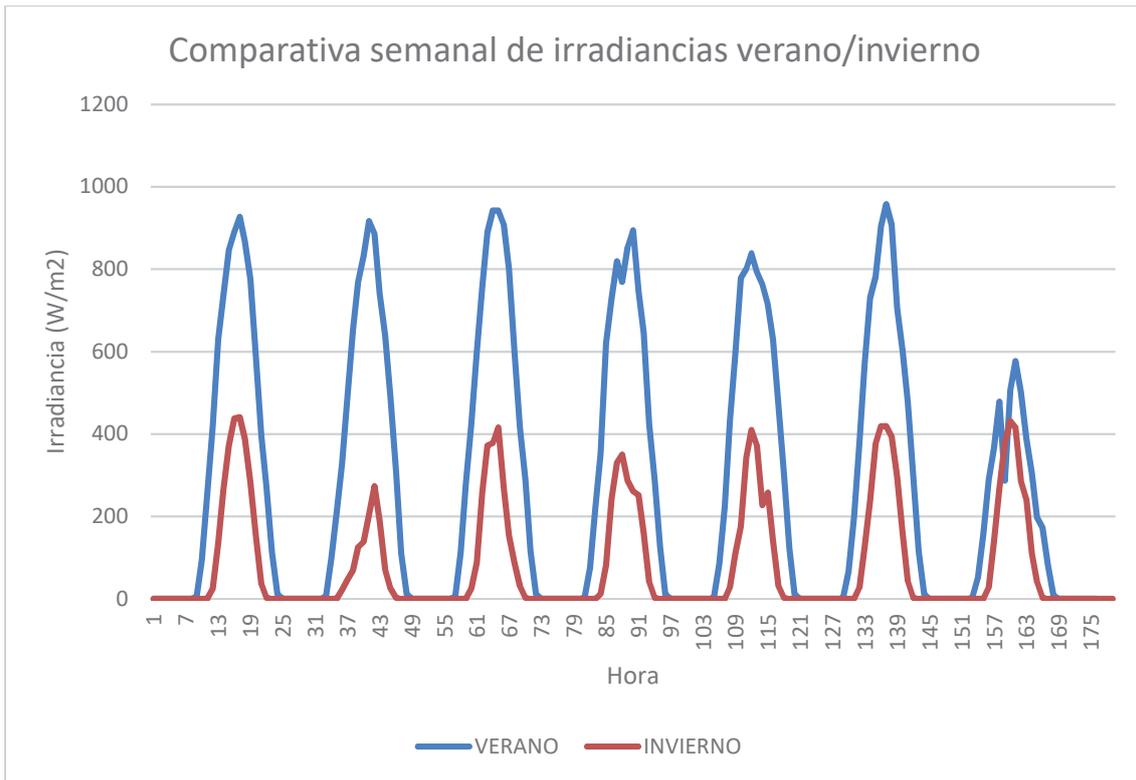


Gráfica 7. Comparativa de la irradiación y la demanda energética anual

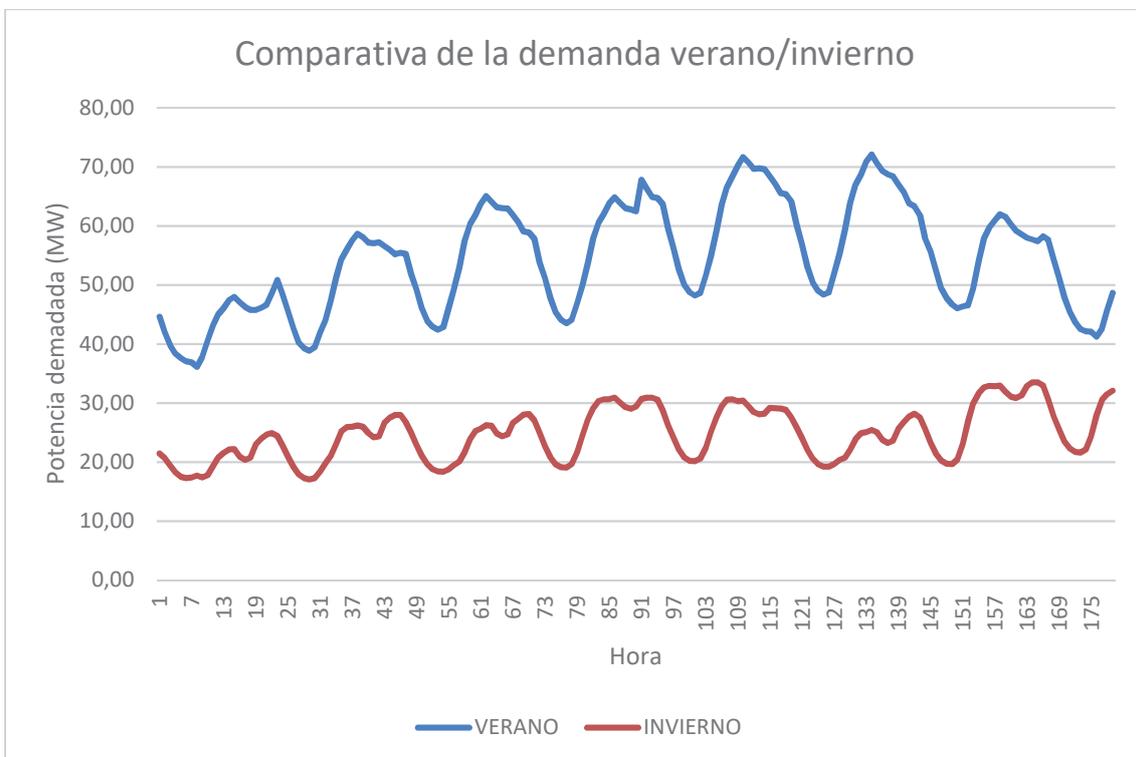
El interés de mostrar dicha comparativa reside en la observación de que el periodo de demanda máxima es casi coincidente con el de irradiación máxima, es decir, en los meses de verano tenemos elevadas irradiaciones, lo cual resulta favorable para el aprovechamiento energético mediante energía solar y además coincide con el periodo de mayor demanda del año, como he explicado previamente, debido a la actividad turística de la zona geográfica.

Como conclusión a esta observación podemos determinar que la implantación de una central solar supone una solución *a priori* muy favorable para satisfacer esta determinada demanda anual.

Por otro lado, también resulta de vital importancia para el análisis del contexto el estudio del comportamiento diario tanto de la demanda como de la irradiación, es por ello que a continuación se muestra el comportamiento de dichas variables a lo largo de un periodo de una semana, mostrando también una comparativa de cómo es este comportamiento en invierno y en verano.



Gráfica 8. Comparativa semanal de la distribución de la irradiancia invierno/verano



Gráfica 9. Comparativa semanal de la distribución de la demanda invierno/verano

Observamos que la demanda se reduce por las noches hasta un determinado valor, mientras que la irradiancia, como era de esperar, a partir del ocaso pasa a tener valor cero, o lo que es

lo mismo, los captadores solar no podrían generar energía térmica, es por ello que se deduce que la instalación deberá de estar provista de un sistema de almacenamiento térmico, para poder satisfacer esta mencionada demanda nocturna, dado que trabajamos en sistema aislado y toda la demanda deberá ser satisfecha con la presente central.

2.2. MODELO GENERAL DE LA INSTALACIÓN

Habiendo explicado previamente que para cubrir la demanda energética ininterrumpidamente en sistema aislado a lo largo del año resultará muy favorable la implantación de una central solar térmica con almacenamiento, se desarrolla el siguiente modelo:

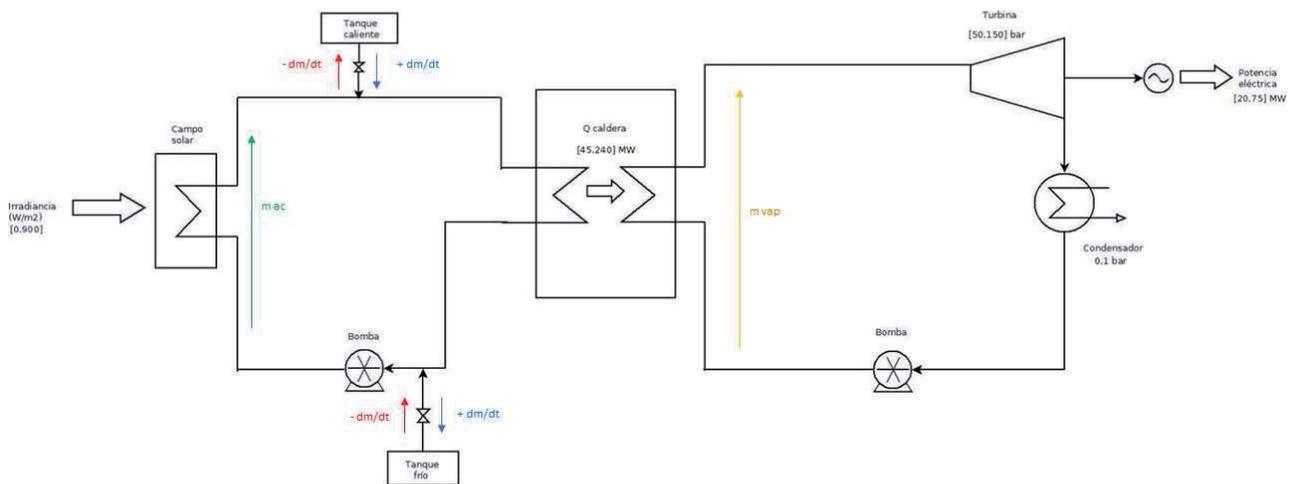


Ilustración 10. Modelo general de la central

Como se puede ver en el esquema adjunto, se han acotado ciertos valores para tener una idea de distintos rangos de valores que nos resultará útil para el posterior estudio.

El calor absorbido en la caldera ha sido determinado a partir de la suposición de un rendimiento del ciclo $\eta_{cv}=0,3$.

A continuación, se realizará un predimensionamiento del volumen de los tanques, lo cual será de ayuda para obtener un orden de magnitud de los mismos que servirá de referencia para los estudios paramétricos. Tomando una suposición de diferencia de temperatura en los tanques frío y caliente de 200°C , se calculará la masa de aceite necesaria, y por lo tanto el volumen de almacenamiento de los mismos para suplir unas demandas de invierno que se puedan considerar altas y bajas, se tomarán 40 y 15 MW constantes que satisfacer en 3 días sin irradiancia. Para calcular dicha masa se empleará la siguiente fórmula:

$$\frac{P_{demandada} * 24 * 3600 * 3}{\eta_{cv}} = m_{tanques} * Cp * \Delta T_{tanques} ; v_{almacenamiento} = \frac{m_{tanques}}{\rho_{aceite}}$$

Sea:

- $Cp_{aceite} = 2500 \text{ J/kgK}$
- $\rho_{aceite} = 850 \text{ kg/m}^3$

Obtenemos el siguiente predimensionamiento:

Volumen máximo de los tanques (aprox.)	120.000 m ³
Volumen mínimo de los tanques (aprox.)	41.000 m ³

Tabla 1. Valores de volúmenes del predimensionamiento de los tanques

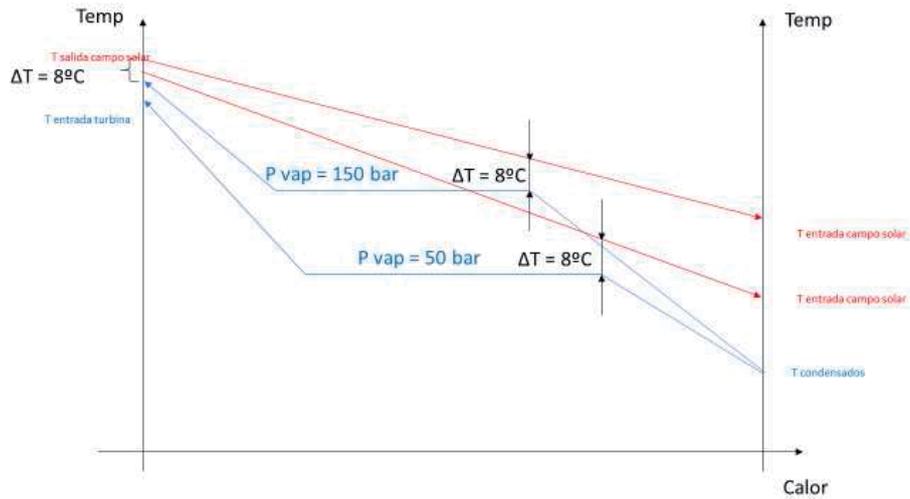
Cabe mencionar que dichos valores son muy aproximados y por lo tanto no se pueden tomar más que como referencia de orden de magnitud, de ningún modo como ningún tipo de resultado.

Por otro lado, las posibles presiones de trabajo de la turbina han tomadas como el rango de presiones de trabajo en los que puede operar una turbina convencional, los cuales se han tomado como de entre 50 y 150 bar.

Por último, el valor de la presión del condensador sí que se corresponde con un valor real del modelo, al suponer la temperatura del mar como un valor que tiene una variación mínima a lo largo del año, se ha tomado una presión de condensador constante e igual a 0,1 bar.

El elemento crítico sobre el cual habrá que centrar el estudio para obtener los mejores rendimientos será el intercambiador, en el cual se han establecido una serie de criterios respecto a las temperaturas de aceite y vapor que se dan en los mismos para con ello obtener los rendimientos globales más óptimos.

Se considera que la mínima diferencia de temperatura entre aceite y vapor para que se produzca un intercambio de calor efectivo será $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$.



Gráfica 10. Distribución de temperaturas en el intercambiador en función de la presión de vapor

Observamos en la gráfica, la cual está expresada en función de la presión de vapor de entrada a la turbina, que los dos puntos críticos en el intercambiador se dan en el estado de líquido saturado y en el vapor a la salida del mismo, o lo que es lo mismo, a la salida del economizador y del sobrecalentador. Serán estos puntos pues, bases para el desarrollo de los modelos matemáticos para la resolución del ciclo en los siguientes apartados.

CAPÍTULO 3. ESTUDIO PREVIO

3.1. OBJETIVO DEL CAPÍTULO

El objeto del presente capítulo será el desarrollo de un modelo inicial sobre el cual comenzar a determinar una serie de criterios de funcionamiento de la planta que nos sirvan de base para el desarrollo del modelo final en los siguientes capítulos sobre el cual se realizará el estudio paramétrico para obtener los resultados y conclusiones las cuales son el objetivo general del presente proyecto.

3.2. MODELO DE CICLO PARA EL ESTUDIO PREVIO

Para empezar, comenzaremos proponiendo un modelo simple sobre el cual poder realizar un estudio paramétrico para obtener las soluciones más energéticamente eficientes del mismo.

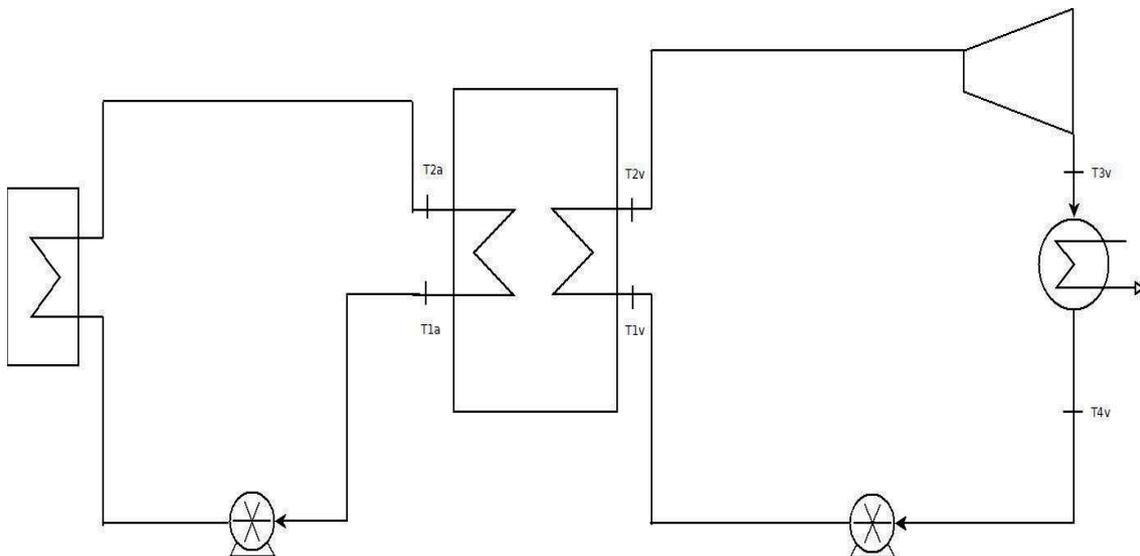


Ilustración 11. Esquema básico del sistema

En dicho esquema se pueden identificar principalmente dos elementos sobre los que se puede actuar para la regulación de dicho sistema, dichos elementos son las bombas de circulación tanto de aceite térmico como de vapor y son estos valores los que previsiblemente modificaremos para el estudio paramétrico.

3.3. METODOLOGÍA EMPLEADA PARA OBTENER LOS REGIMENES DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS

Primeramente, podemos deducir que en el ciclo todas las variables están relacionadas las unas con las otras y por lo tanto la modificación de una supondrá la modificación de todas las demás, es por ello que sabemos que controlar el régimen de giro de la bomba del ciclo de vapor será equivalente a controlar cualquier otra variable del sistema. Dicho esto, se decide controlar la temperatura de entrada y a partir de esta veremos cómo se modifica el gasto de vapor circulado por la bomba.

Se ha desarrollado un modelo matemático para el estudio paramétrico del modelo, las ecuaciones del mismo son una forma simplificada de las ecuaciones que se mostrarán en el modelo final expresado en el Capítulo 4, "Estudio del Modelo".

Como se ha explicado, se va a realizar un estudio paramétrico para recoger los distintos rendimientos globales de ciclo que se obtienen al modificar dichos parámetros ante unas condiciones de entrada, los parámetros a estudiar serán por lo tanto los siguientes:

- Gasto de aceite circulante (kg/s)
- Temperatura de entrada al campo solar (°C)

A continuación, pues, se mostrarán los rangos de valores parámetros de control a estudiar, que se van a implementar al estudio paramétrico:

Temperatura de entrada al campo solar (°C)									
200	210	220	230	240	250	260	270	280	290

Tabla 2. Rango de temperaturas de entrada al campo solar sobre las que se ha realizado el estudio paramétrico

Gasto másico de aceite circulante (kg/s*m ²)							
0,085	0,255	0,425	0,595	0,765	0,935	1,105	1,275

Tabla 3. Rango de gastos másicos de aceite sobre los que se ha realizado el estudio paramétrico

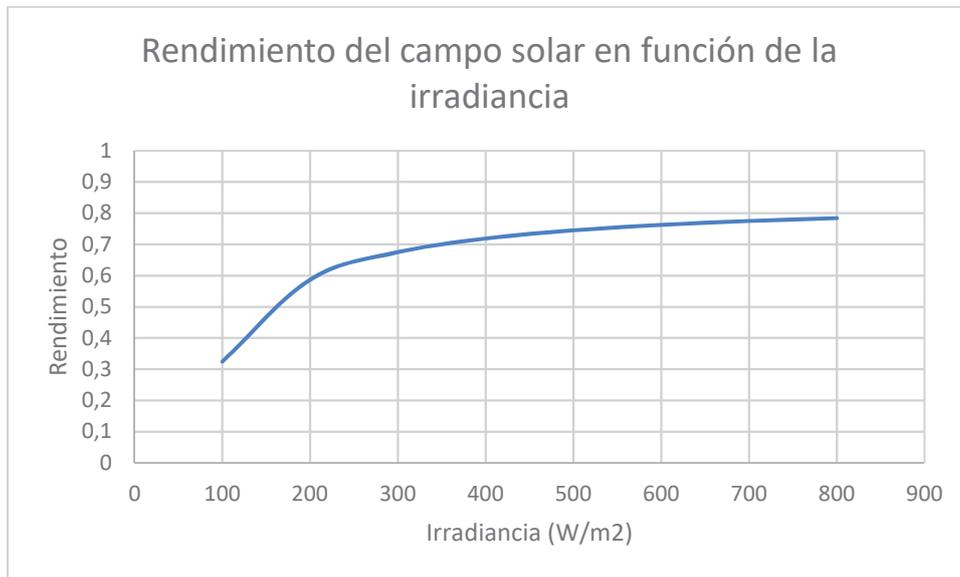
Dichos gastos másicos han sido obtenidos a partir de la suposición de que la temperatura de salida del campo solar debe rondar los 400°C y la de entrada los 200°C y con un calor específico del aceite e igual a 2500 J/kgK. Aplicando la siguiente ecuación se obtendrían dichos valores de gasto másico:

$$Q = \dot{m} * C_p * (T_{sal\ cs} - T_{ent\ cs})$$

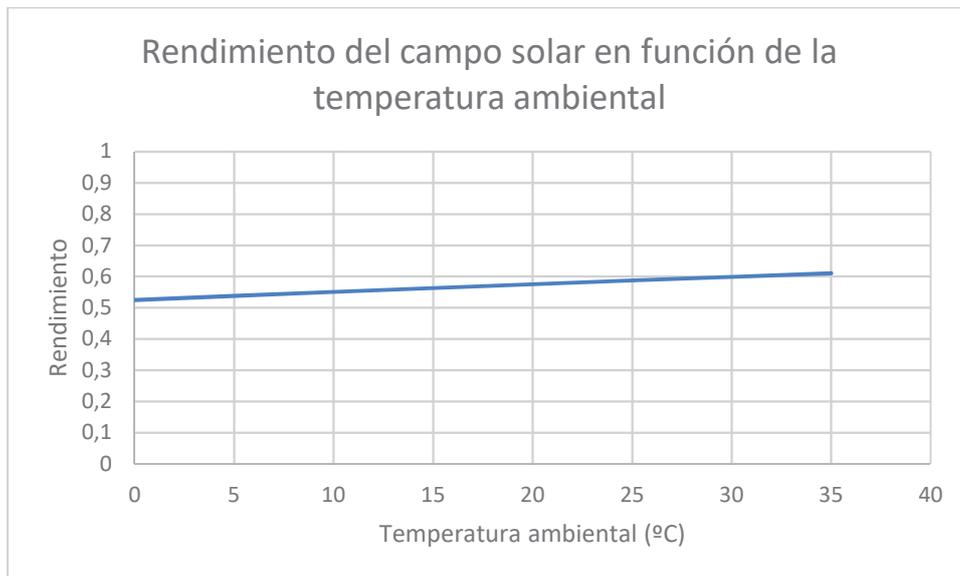
También cabe mencionar que el valor de entrada que se modificará para observar la variación del rendimiento de ciclo será la irradiancia, pues, como se muestra a continuación, su influencia sobre el rendimiento de los captadores solares será mucho mayor que la de la otra variable de entrada que podríamos implementar, la temperatura.

Sea la ecuación del rendimiento del captador solar:

$$\eta_{cs} = \eta_{\text{óptico}} - \frac{1}{Ir * F_{\text{captación}}} * (K_1 * (T_{\text{med cs}} - T_{\text{amb}}) + K_2 * (T_{\text{med cs}} - T_{\text{amb}})^2)$$



Gráfica 11. Evolución del rendimiento del campo solar en función de la irradiancia



Gráfica 12. Evolución del rendimiento del campo solar en función de la temperatura ambiental

Las siguientes graficas sirven de justificación para realizar el estudio paramétrico en base a la irradiancia como dato de entrada, manteniendo así una temperatura ambiental constante, que tomaremos como 25°C, ahorrando así tiempo de computación y facilitando el análisis de resultados.

Por último, habrá un parámetro que se tratará como dato de entrada para evitar la necesidad de realizar iteraciones para obtener valores reales de rendimiento, dicho parámetro es la presión de vapor de trabajo del ciclo de vapor.

A continuación, pues, se mostrarán los rangos de valores de datos de entrada que se han tomado para el estudio paramétrico:

Irradiancia (W/2)		
300	550	800

Tabla 4. Valores de irradiancia implementados para el estudio paramétrico

Presión de vapor (bar)		
50	100	150

Tabla 5. Valores de presión de vapor implementados para estudio paramétrico

Por último, cabe mencionar todos los valores impuestos para el desarrollo del modelo matemático, los cuales, a excepción de la superficie de captación, que será como 1 m² debido a que se pretende obtener un resultado de gasto másico en función de la determinada radiación, se mantendrán constantes para los posteriores modelos que se irán desarrollando a lo largo del proyecyo.

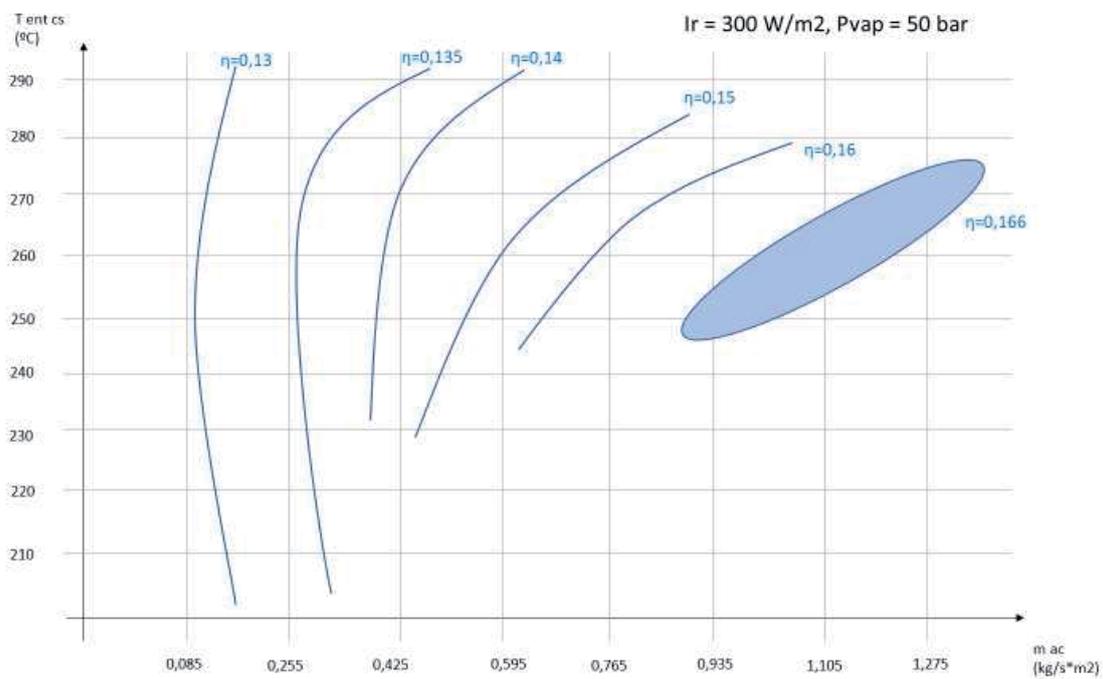
Calor específico del aceite	2500 J/kgK
Superficie del campo solar	1 m ²
Factor solar	60
Rendimiento óptico	85%
K1	7,5
K2	0,06
Rendimiento isentrópico de la turbina	90%
Presión de condensador	0,1 bar

Ya con todos los valores de control y de entrada definidos y con el modelo matemático desarrollado, se puede proceder al estudio paramétrico. Para el análisis de los datos estos se recogerán en mapas donde en función de la temperatura de entrada al campo solar y del gasto de aceite circulante por el mismo se puedan representar curvas de "isorendimiento", para así intentar buscar los puntos (o nube de puntos) óptimo para obtener el máximo rendimiento en función de los parámetros de control.

3.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ESTUDIO PREVIO DEL MODELO

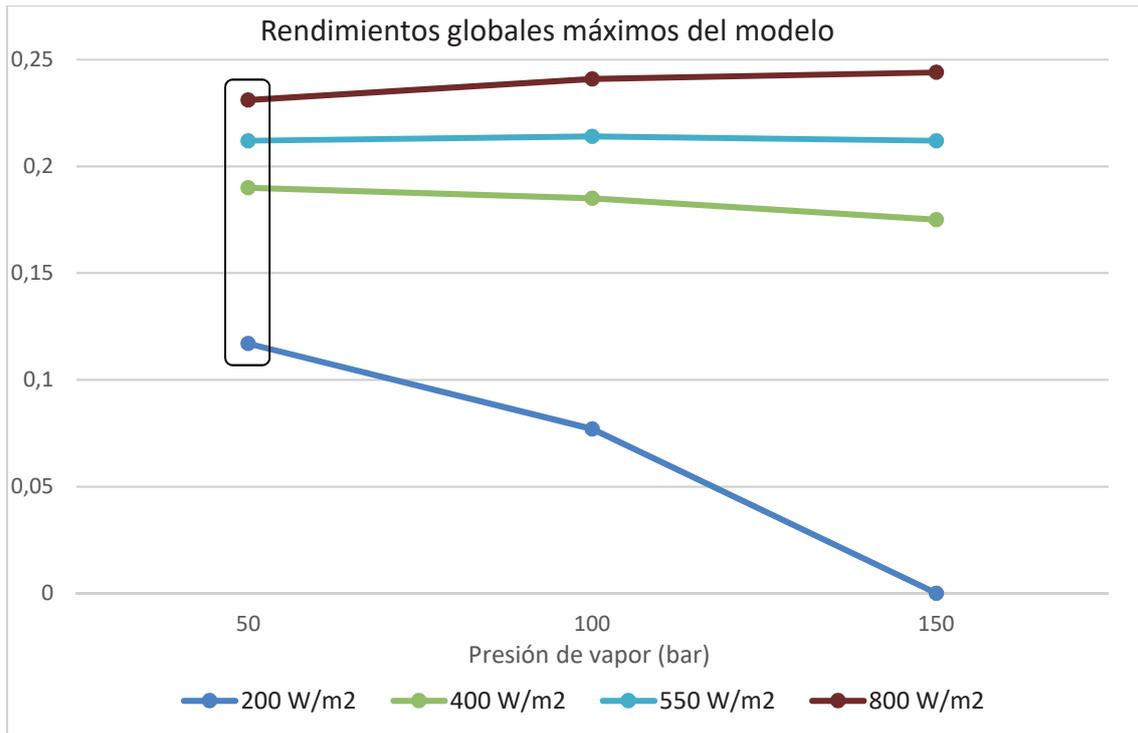
Como se ha comentado previamente, se desarrollará un estudio paramétrico a partir de los parámetros de control de gasto de aceite circulante por el ciclo y de temperatura de aceite a la entrada del ciclo se desarrollarán mapas donde se muestre la distribución de los distintos rendimientos globales de ciclo en función de dichos parámetros y de los datos de entrada, que se corresponden en este caso a la irradiancia incidente y a la presión de vapor de trabajo del ciclo de Rankine correspondiente.

A modo descriptivo, a continuación, se muestra un ejemplo de mapa de curvas de “isorendimiento”, en este caso, en el caso de irradiancia incidente igual a 300 W/m^2 y presión de vapor igual a 50 bares:



Gráfica 13. Mapa de rendimientos en función de los parámetros de control

Desarrollando el mismo tipo de mapa para todos los casos de irradiancia incidente y presión de vapor de trabajo y analizando los puntos de máximo rendimiento de los mismos, obtenemos la siguiente gráfica donde se presentan los rendimientos máximos que se dan en el modelo en función de su presión de vapor:



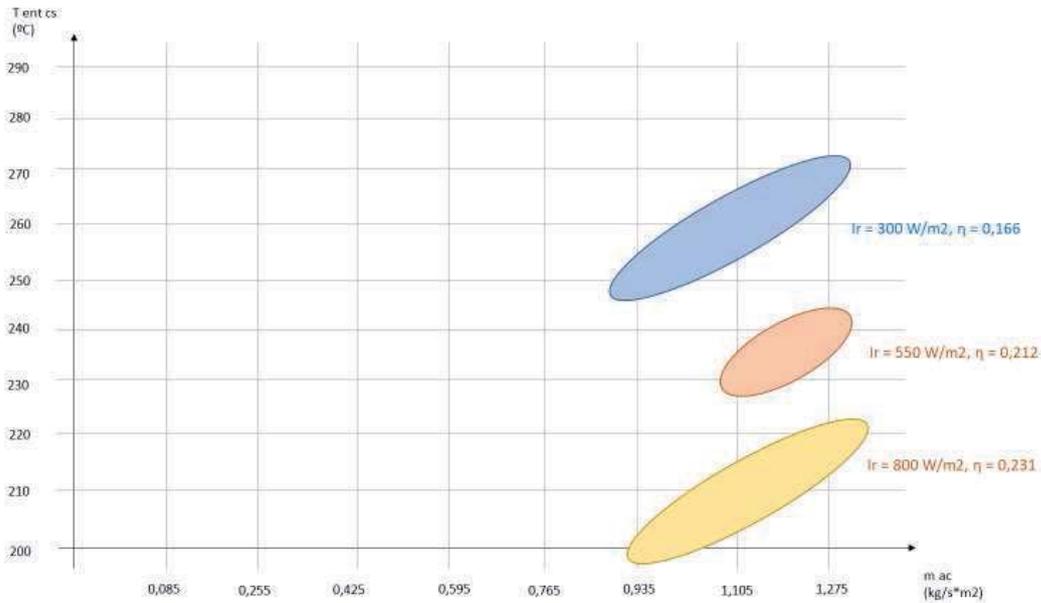
Gráfica 14. Rendimientos globales del modelo en función de la presión de vapor y de la irradiancia

De dicha gráfica se puede deducir que, a irradiancias altas, las cuales definimos como las mayores a 600 W/m^2 el aumento de la presión de vapor supone un aumento del rendimiento global del ciclo, aunque en una proporción muy baja, por ejemplo, un aumento de 50 bares a 150 bares en la presión de vapor a una irradiancia de 800 W/m^2 , la cual es realmente elevada, sólo supone un incremento del 1% en el rendimiento del ciclo.

Es por ello que se decide operar a presión de vapor constante e igual a 50 bares independientemente de la irradiancia incidente, es decir, la mínima a la que podemos trabajar sin problemas en el ciclo de vapor.

Dicha presión de vapor será mantenida mediante el control de la bomba del ciclo de vapor y por lo tanto ya tenemos el régimen de trabajo de la misma definido, es por ello que ya no será necesario modular la temperatura de entrada al campo solar, pues esta vendrá definida por los parámetros ya mencionados.

Por otro lado, faltaría por modular el régimen de trabajo de la bomba de aceite térmico. Una vez definida la presión de vapor, pasaremos a comparar los mapas previamente desarrollados de rendimientos a dicha presión de vapor y a distintas irradiancias, el resultado de dicha comparación es el siguiente:



Gráfica 15. Rendimientos máximos a distintas irradiancias y presión de vapor 50 bar

Vemos en gráfica adjunta que existen una serie de valores del gasto de aceite circulante por metro cuadrado de superficie de captación en los que coinciden todas las “nubes” de rendimiento máximo a las distintas irradiancias, se podría deducir que cualquier valor de gasto de aceite comprendido en ese espacio coincidente nos proporcionaría rendimientos máximos a esta determinada presión de vapor. Por otro lado, desde el punto de vista de una supuesta inversión, el dimensionamiento mínimo de los distintos elementos del ciclo supondrá la opción más favorable desde un punto de vista económico, por lo tanto, se considerará que el gasto másico de aceite por unidad de superficie de captación óptimo será el mínimo de esta nube de puntos, es decir, $1,105\ g/s \cdot m^2$.

3.5. CONCLUSIONES DEL ESTUDIO PREVIO DEL MODELO

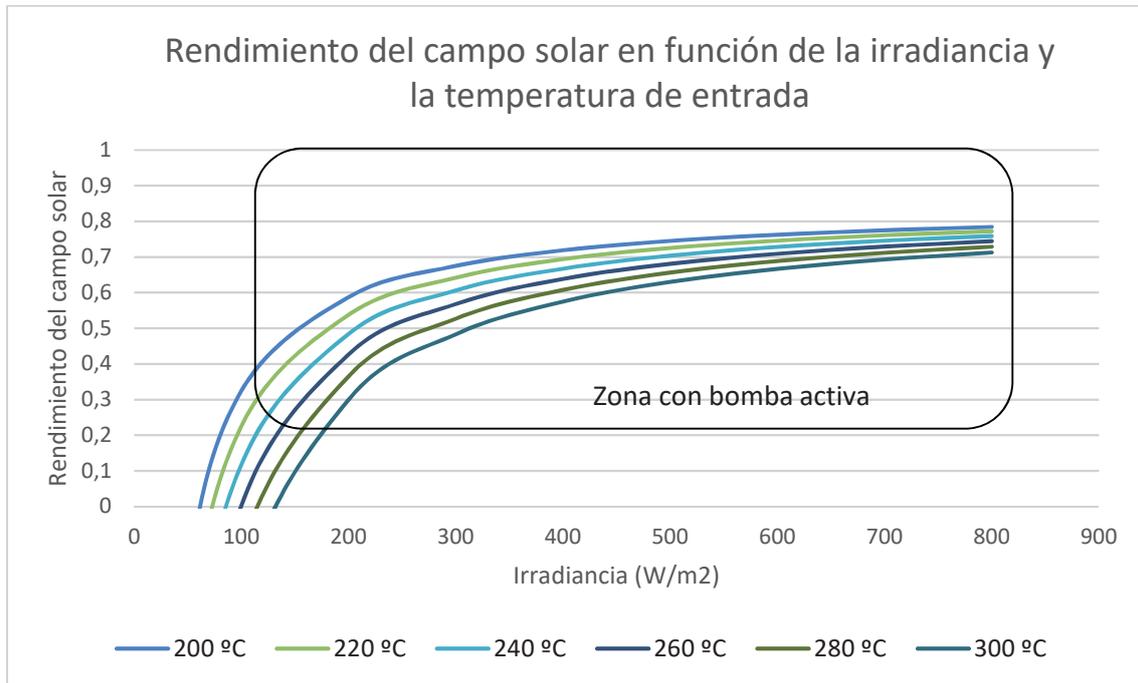
En el presente apartado se intentarán resumir las conclusiones que se han ido deduciendo del análisis de las distintas gráficas del apartado anterior.

Se ha concluido que se va a establecer una presión de vapor constante e igual a 50 bares, pues la modificación de la misma afecta sólo positivamente a irradiancias muy altas y en una proporción tan mínima que no se considera necesario el control de este parámetro en función de la irradiancia.

Por otro lado, se ha tomado un valor, constante también, para el gasto de aceite por unidad de superficie de captación igual a $1,105\ g/s \cdot m^2$, dado que es un gasto que proporciona rendimientos máximos para irradiancias superiores a $300\ W/m^2$, a 50 bares de presión de vapor y probando en el modelo a irradiancias más bajas, como $200\ W/m^2$, observamos que, aunque no máximos, se obtienen rendimientos muy altos.

No obstante, todavía hay que establecer un parámetro de control más sobre dicho gasto másico de aceite. Existe una determinada irradiancia a partir de la cual el rendimiento pasa a

ser negativo, es decir, el aceite circulante se enfría en los captadores, es por ello que se presenta la siguiente gráfica:



Gráfica 16. Rendimiento del campo solar en función de la irradiancia y la temperatura de entrada

Atendiendo a los resultados obtenidos, se puede establecer un valor de seguridad a partir del cual se debe de dejar de circular aceite por lo captadores solares, dicho valor se va a establecer de forma visual en 180 W/m^2 .

A continuación, se aporta una tabla resumen de los criterios de control de ciclo que se han establecido en el presente capítulo:

Presión de vapor	50 bares
Gasto de aceite térmico	$1,105 \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$
Irradiancia de parada de la bomba de aceite	180 W/m^2

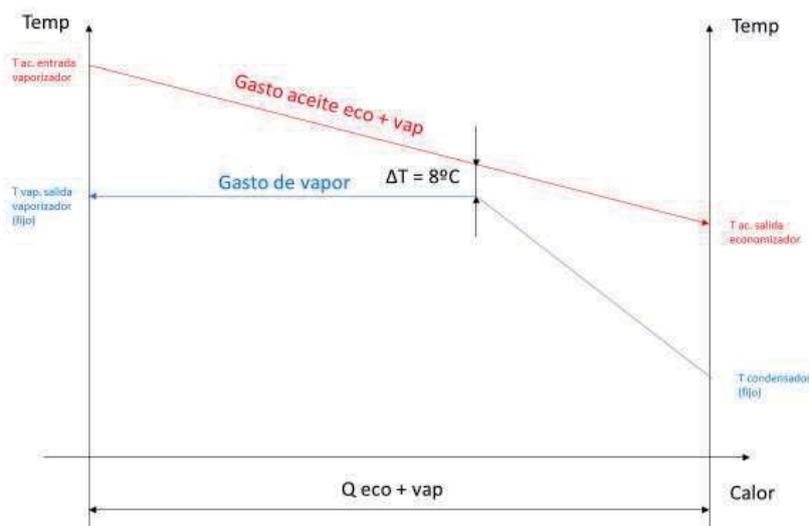
CAPÍTULO 4. ESTUDIO DEL MODELO

4.1. OBJETIVO DEL CAPÍTULO

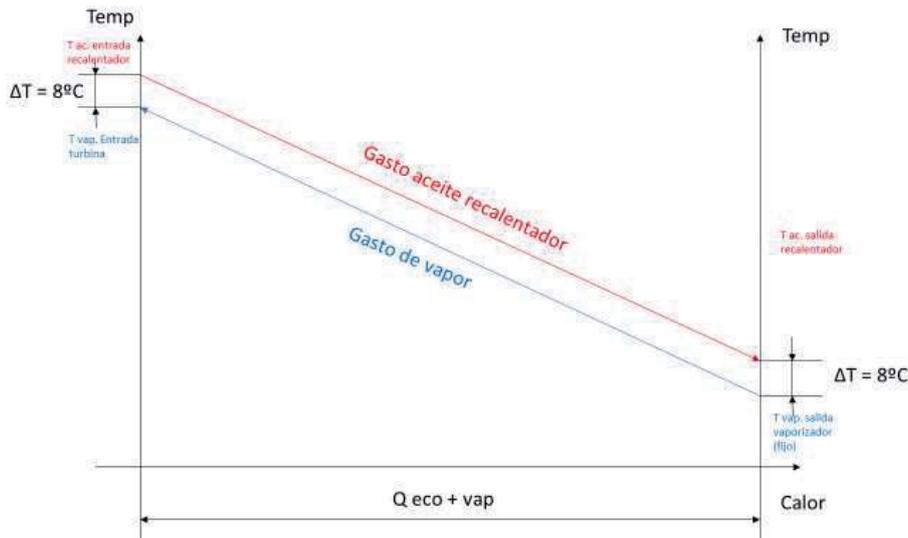
En el presente capítulo se expondrán todos los cálculos necesarios y sus respectivas soluciones para la modelización definitiva de la central y su simulación anual, para con ello poder desarrollar la solución que se exponía en el objetivo de la memoria, es decir, la relación óptima de la superficie de captación y el volumen de almacenamiento sobre la cual realizar el estudio económicos con los costes unitarios de los mismos.

4.2. MODELO DE CICLO PARA EL ESTUDIO

Atendiendo a los criterios de control de ciclo que se han establecido en el capítulo anterior, se tiene que la presión de vapor es constante independientemente de las variables de entrada e igual a 50 bares. El parámetro del ciclo de vapor que sí que varía su valor es la temperatura de salida del intercambiador, pues esta está directamente relacionada con la temperatura de aceite de entrada al intercambiador, pues esta dependerá tanto de la temperatura de salida del campo solar y de la temperatura del tanque caliente en el momento del cálculo. Es por ello que se requiere un control de gastos másicos de aceite tanto en el sobrecalentador como en el conjunto de economizador más vaporizador.



Gráfica 17. Distribución de temperaturas en el conjunto economizador + vaporizador



Gráfica 18. Distribución de temperaturas en el sobrecalentador

Consiguiendo así poder trabajar con temperaturas de entrada al recalentador mucho menores y aumentar la eficiencia general del intercambiador del intercambiador. Por lo tanto, se operará con dos circuitos a la entrada al circuito, una para llevar a cabo el precalentamiento y el cambio de fase, en el economizador y en el vaporizador y otra para llevar a cabo el sobrecalentamiento del vapor antes de entrar a la turbina.

Por otro lado, en lo referente al almacenamiento, es previsible que en los momentos de mayor irradiancia el tanque caliente alcance su valor máximo de llenado, es decir que el aceite ocupe todo su volumen y por lo tanto el tanque frío esté vacío. Debido a esto, será necesario implementar en nuestro modelo un sistema de vaciado del tanque caliente cuando este alcance su máximo. La intención será vaciar el tanque caliente sin perder, o perdiendo el mínimo posible de, energía almacenada. Para ello se establecerá un lazo entre el tanque caliente y el tanque frío mediante el cual se descargará el aceite almacenado en el tanque caliente sobre el tanque frío cuando el caliente haya alcanzado su máximo de carga. De este modo se puede aliviar el tanque caliente sin necesidad de perder energía almacenada, pues al aumentar la temperatura del tanque frío, cuando vuelva se vuelva a cargar el tanque caliente lo hará a una temperatura mayor. También cabe mencionar el nuevo peligro que genera dicha solución, el tanque caliente puede sobrepasar un valor de temperatura con el cual el sistema deja de ser seguro, sobre todo en el campo solar, que representa el elemento menos preparado para soportar elevadas temperaturas, en comparación con el intercambiador o los tanques. Por lo tanto, el esquema definitivo para realizar el estudio queda del siguiente modo:

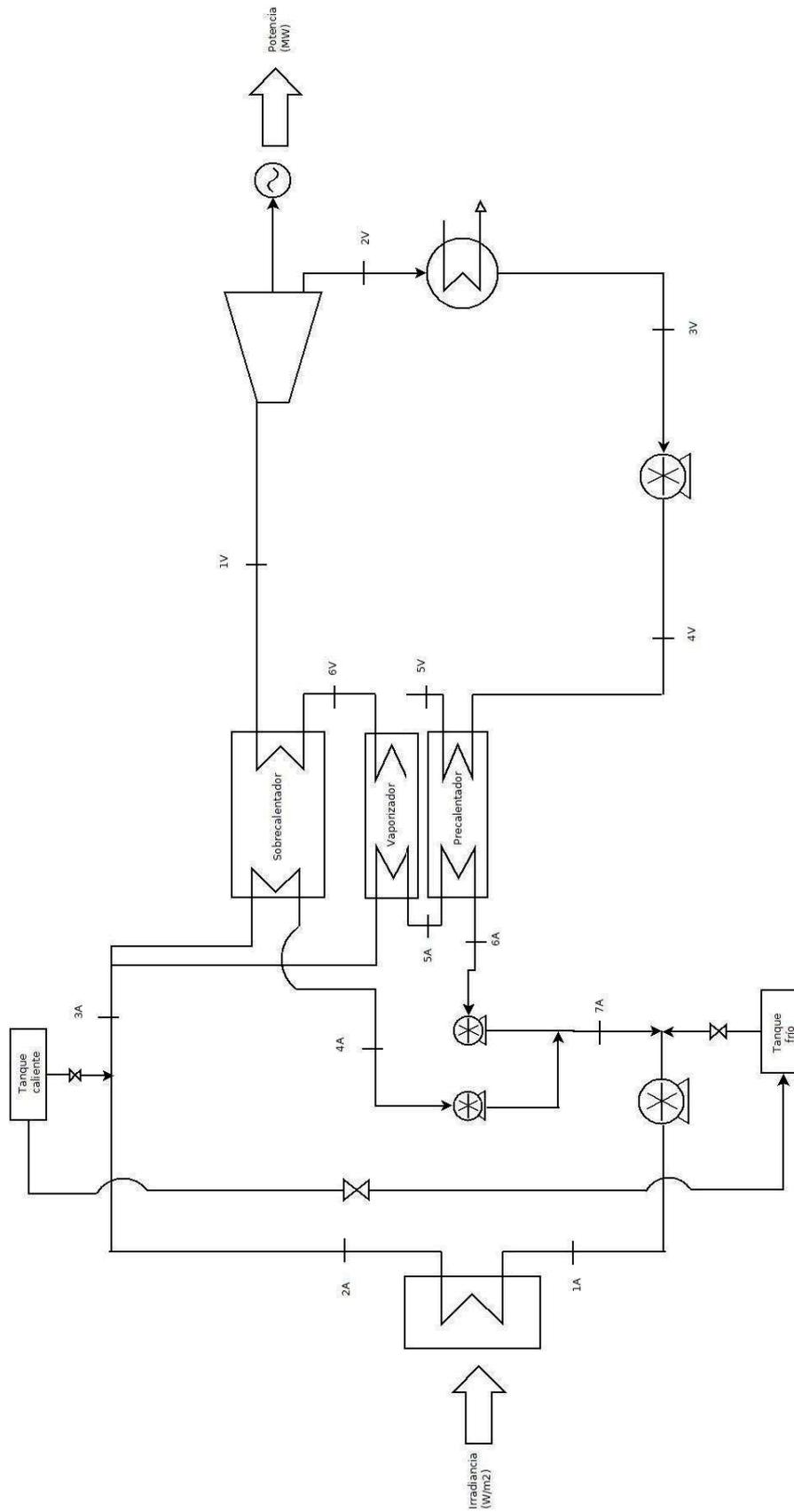


Ilustración 12. Esquema del modelo de campo solar

4.3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

Para desarrollar la relación entre el área de captación y volumen óptimos se llevará a cabo un proceso de cálculo iterativo a partir del modelo que se ha descrito en el apartado anterior. Los resultados obtenidos en los distintos parámetros del ciclo serán realmente cálculos de estacionarios hora a hora, que se consideran suficientes para obtener las conclusiones que pretendemos. Por otro lado, para el caso del llenado de los tanques sí que se llevará un proceso de cálculo transitorio para ver la evolución de las cargas en función del tiempo en los mismos.

4.2.1. Desarrollo de ecuaciones del sistema

Para comenzar a desarrollar las ecuaciones, se definirán las distintas variables del ciclo de aceite térmico:

PUNTO	TEMPERATURA	GASTO MÁSIICO
1A	$\frac{T_{tanque\ frio} * \left(-\frac{dm}{dt}\right) + T_{7A}}{m_{ac}} \text{ si } \frac{dm}{dt} < 0$ $T_{7a} \text{ si } \frac{dm}{dt} > 0$	\dot{m}_{ac}
2A	$T_{1a} + \frac{I_r * S_{cs} * \eta_{cs}}{C_p * m_{ac}}$	\dot{m}_{ac}
3A	$\frac{T_{2a} * m_{ac} + T_{tanque\ caliente} * \frac{dm}{dt}}{m_{ac} + \frac{dm}{dt}} \text{ si } \frac{dm}{dt} > 0$ $T_{2a} \text{ si } \frac{dm}{dt} < 0$	$m_{ac} + \frac{dm}{dt}$
4A	$T_{6v} + 8^{\circ}C$	m_{sc}
5A	$T_{5v} + 8^{\circ}C$	$m_{eco+vap}$
6A	$T_{5a} - \frac{Q_{eco}}{m_{eco+vap} * C_p}$	$m_{eco+vap}$
7A	$\frac{T_{4a} * m_{sc} + T_{6a} * m_{eco+vap}}{m_{sc} + m_{eco+vap}}$	$m_{sc} + m_{eco+vap}$

Tabla 19. Temperaturas del ciclo de aceite

Aclaración: Sea $\frac{dm}{dt}$ el diferencial de masas en los tanques; se toma como positivo cuando se vacía el tanque caliente y se llena el frío y se toma como negativo en el caso contrario.

ELEMENTO DEL INTERCAMBIADOR	GASTO MÁSCICO DE ACEITE
Sobrecalentador	$\frac{Q_{sc}}{Cp * (T_{3a} - T_{4a})}$
Economizador y vaporizador	$\frac{Q_{vap}}{Cp * (T_{3a} - T_{5a})}$

Tabla 6. Gastos de aceite en los elementos del intercambiador

Aclaración: Los valores de potencia térmica de los intercambios de calor en el intercambiador serán expuestos más adelante

TANQUE	TEMPERATURA	CARGA
Caliente	$\frac{T_{cal_{t-1}} * m_{tanque\ caliente_{t-1}} - T_{2a_{t-1}} * \frac{dm}{dt}_{t-1}}{m_{tanque\ caliente_{t-1}} - \frac{dm}{dt}_{t-1}}$ si $\frac{dm}{dt}_{t-1} < 0$ $T_{cal_{t-1}}$ si $\frac{dm}{dt}_{t-1} > 0$	$m_{tanque\ caliente_{t-1}} - \frac{dm}{dt}_{t-1}$
Frío	$\frac{T_{frio_{t-1}} * m_{tanque\ frio_{t-1}} + T_{7a_{t-1}} * \frac{dm}{dt}_{t-1}}{m_{tanque\ frio_{t-1}} + \frac{dm}{dt}_{t-1}}$ si $\frac{dm}{dt}_{t-1} > 0$ $T_{frio_{t-1}}$ si $\frac{dm}{dt}_{t-1} < 0$	$m_{tanque\ frio_{t-1}} + \frac{dm}{dt}_{t-1}$

Tabla 7. Cálculo de transitorios de temperatura y carga en los tanques

A continuación, se presentarán las ecuaciones que definirán los parámetros del ciclo de potencia o ciclo de vapor.

PUNTO	PRESIÓN (bar)	TEMPERATURA	ENTALPÍA	ENTROPÍA	ESTADO
1V	50	$T_{3a} - 8^{\circ}C$	h_{1v}	s_{1v}	Vapor
2V'	0,1	T_{2v}'	h_{2v}'	s_{1v}	Líqu-Vap
2V	0,1	T_{2v}	$h_{1v} - \eta_s * (h_{v1} - h'_{v2})$	s_{2v}	Líqu-Vap
3V	0,1	T_{3v}	h_{3v}	s_{3v}	Líqu. Sat.
4V	50	T_{4v}	h_{4v}	s_{4v}	Líquido
5V	50	$T_{5a} - 8^{\circ}C$	h_{5v}	s_{5v}	Líqu. Sat.

6V	50	T_{6v}	h_{6v}	s_{6v}	Vap. Sat.
----	----	----------	----------	----------	-----------

Tabla 8. Estados termodinámicos de los puntos del ciclo de vapor

ELEMENTO DEL INTERCAMBIADOR	CALOR INTERCAMBIADO
Economizador	$m_{vap} * (h_{5v} - h_{4v})$
Vaporizador	$m_{vap} * (h_{6v} - h_{5v})$
Sobrecalentador	$m_{vap} * (h_{1v} - h_{6v})$

Tabla 9. Potencia térmica absorbida en los elementos del intercambiador de calor

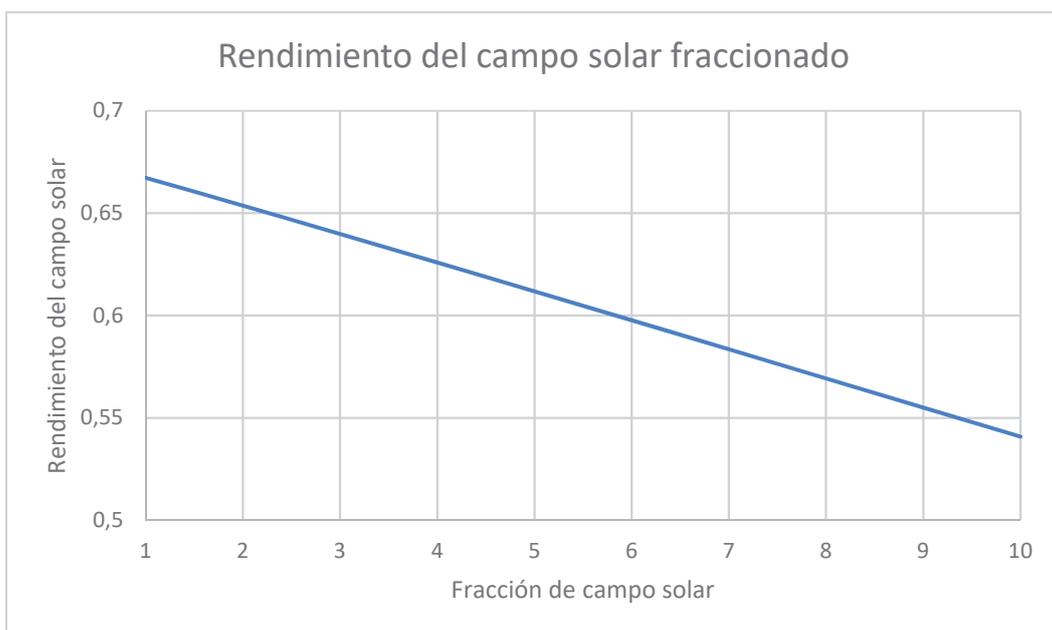
La última variable que quedaría por analizar en el ciclo sería el gasto de vapor que vendría determinado por la demanda:

$$m_{vap} = \frac{\frac{P_{electrica}}{\eta_{generador}}}{h_{1v} - h_{2v}}$$

También, a modo aclaratorio del proceso empleado para el cálculo del rendimiento el campo solar η_{cs} , se mencionará que se ha dividido el campo solar en 10 partes y se ha calculado el rendimiento en cada una de ellas para obtener un resultado mucho más fiel a la realidad, mediante la fórmula descrita anteriormente:

$$\eta_{cs} = \eta_{\text{óptico}} - \frac{1}{Ir * F_{\text{captación}}} * (K_1 * (T_{\text{med cs}} - T_{\text{amb}}) + K_2 * (T_{\text{med cs}} - T_{\text{amb}})^2)$$

A continuación, se presenta el comportamiento del rendimiento del campo solar en función de la fracción del mismo en la que se encuentra, o lo que es lo mismo, en función de la temperatura media dentro de él:



Gráfica 20. Rendimiento del campo solar en función de la fracción que represente

Cabe, por último, mencionar los valores de entrada que condicionarán el funcionamiento del ciclo:

- Demanda eléctrica (MW)
- Irradiancia incidente (W/m^2)
- Temperatura ambiental ($^{\circ}C$)

Y además de estos valores de entrada, también influirán los parámetros de estudio:

- Superficie de captación (m^2)
- Carga de almacenamiento (kg)

4.2.2. Cálculo del número de iteraciones necesarias para estabilizar un parámetro

En el siguiente apartado se mostrará el cálculo de las iteraciones que se considerarán necesarias para estabilizar cualquier parámetro del ciclo una vez desarrollado el modelo.

Para ello, se tomará un valor el cual esté sujeto a variaciones con las iteraciones y aplicándole una entrada escalón, tanto de irradiancia como de temperatura y demanda y observaremos gráficamente cuántas iteraciones se llevan a cabo hasta la estabilización de dicho parámetro.

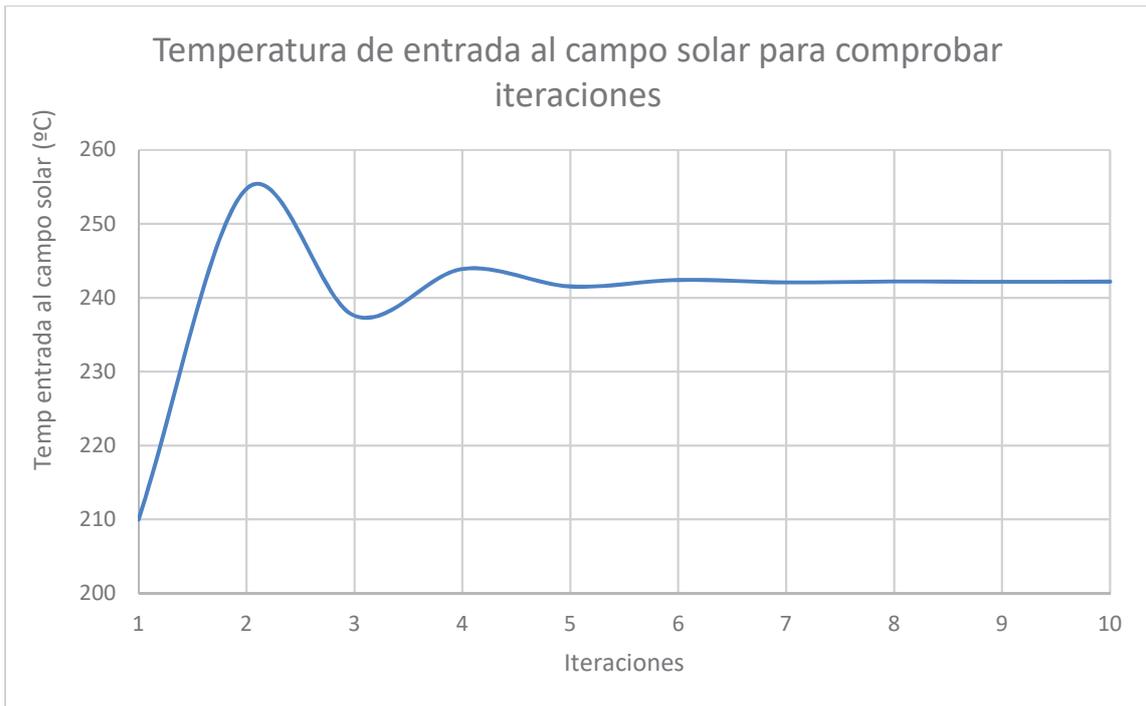
Se tomará como parámetro representativo la temperatura de entrada al ciclo, al igual que se podría haber tomado otro tipo de valor como el gasto de aceite en el sobrecalentador o la temperatura de entrada a la turbina.

Por lo tanto, aplicando el siguiente escalón:

Demanda	80 MW
Irradiancia	400 W/m^2
Temperatura ambiental	27 $^{\circ}C$

Tabla 10. Datos de entrada para el cálculo de iteraciones necesarias

Y la respuesta que tenemos por parte del modelo a dicha entrada en lo referente a la temperatura al campo solar tiene el siguiente comportamiento:



Gráfica 21. Temperatura de entrada al campo solar en función de las iteraciones del modelo

Observamos que a partir de la séptima iteración el parámetro se ha estabilizado; para comenzar a iterar se ha tomado un valor inicial que se situaba previsiblemente alejado del valor final de las iteraciones para generar así un caso lo suficientemente desfavorable.

Como conclusión, se podría decir que con 7 iteraciones podríamos asegurarnos estabilizar un valor, pero con el objetivo de que no se genere ningún problema inesperado en los futuros cálculos tanto horarios como diarios o anuales, se tomará un número de iteraciones de seguridad de 10 iteraciones.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. OBJETIVO DEL CAPÍTULO

El objetivo del presente capítulo reside en, primeramente, la muestra de los resultados obtenidos en las distintas simulaciones que se van a realizar para comprender en profundidad el comportamiento del modelo frente a los distintos datos de entrada. Por otro lado, el objetivo principal del capítulo es el desarrollo de la gráfica que muestre la relación óptima de superficie de captación y tamaño de los tanques de almacenamiento para el correcto dimensionamiento de la central solar térmica, dicho objetivo ya se había postulado como objetivo principal del proyecto.

5.2. METODOLOGÍA EMPLEADA

Para el análisis de los resultados obtenidos se aplicarán simulaciones de distintos periodos para observar los parámetros más relevantes de los mismos.

En las simulaciones de periodos más cortos se mostrará un mayor número de parámetros, que en estos casos sí serán analizables en contraposición a las simulaciones anuales.

Así mismo, en las simulaciones anuales el único parámetro que resulta analizable es la carga de los tanques, dicho resultado será analizado anualmente para con ello encontrar las horas críticas del determinado año.

Para la simulación anual, será necesario realizarla a periodos de tres meses para después combinar los resultados, esto es porque la herramienta que utilizamos para la simulación, *Microsoft Excel*, carece de potencia de cálculo y de espacio cálculo para realizar una simulación anual con sus 10 iteraciones por hora.

Se podría considerar que la central se encuentra infradimensionada cuando el tanque caliente no tiene carga de aceite térmico, que nosotros lo visualizaremos en el modelo como un grado de carga negativo en este, o lo que es lo mismo, que no se puede satisfacer la demanda, lo que en el sistema generaría un *blackout* en el sistema eléctrico.

Se realizará un estudio paramétrico a partir de la modificación tanto de los valores de superficie de captación como de los de volumen de almacenamiento, o la propia carga de almacenamiento dado que están relacionados por una constante que es la densidad del propio aceite térmico. Se observarán las combinaciones que nos permiten suplir la demanda con el dimensionamiento mínimo de ambas partes, es decir, que en la hora más crítica del año el tanque caliente no alcance valores negativos, pero alcance valores cercanos a cero.

Para dicho estudio paramétrico se tomarán diez valores de superficie de captación, que estando suficientemente espaciados se considerarán suficientes, y se hallarán con ello los valores mínimos de volumen de almacenamiento suficientes para cubrir la radiación anual.

Con la recopilación de una serie de combinaciones de dimensionamiento mínimo pero suficiente para satisfacer la demanda anual, se representarán en una gráfica como se ha expresado previamente en la que se mostrará dicha relación.

Por último, y con el objetivo de obtener un resultado que proporcione información directamente aplicable al diseño de la central, se desarrollará una gráfica que muestre la superficie de captación y el tamaño de los tanques óptimo en función de la relación de precios de ambos.

5.3. RESULTADOS EN SIMULACIONES DIARIAS

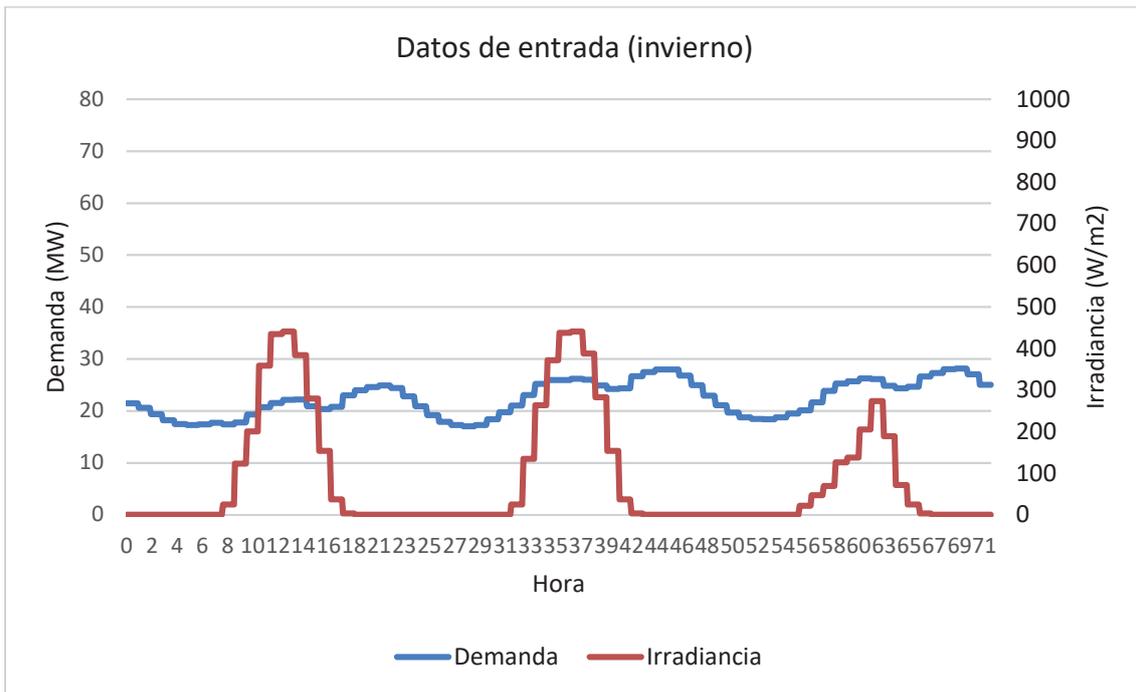
En el presente apartado se mostrará y analizará el comportamiento de las variables que se han considerado más significativas de la central solar térmica para un período de tres días de invierno y un período de tres días de verano, con el objetivo de conocer más en profundidad el comportamiento de esta.

Para empezar, se mostrarán los datos que se han tomado como fijos para la presente simulación:

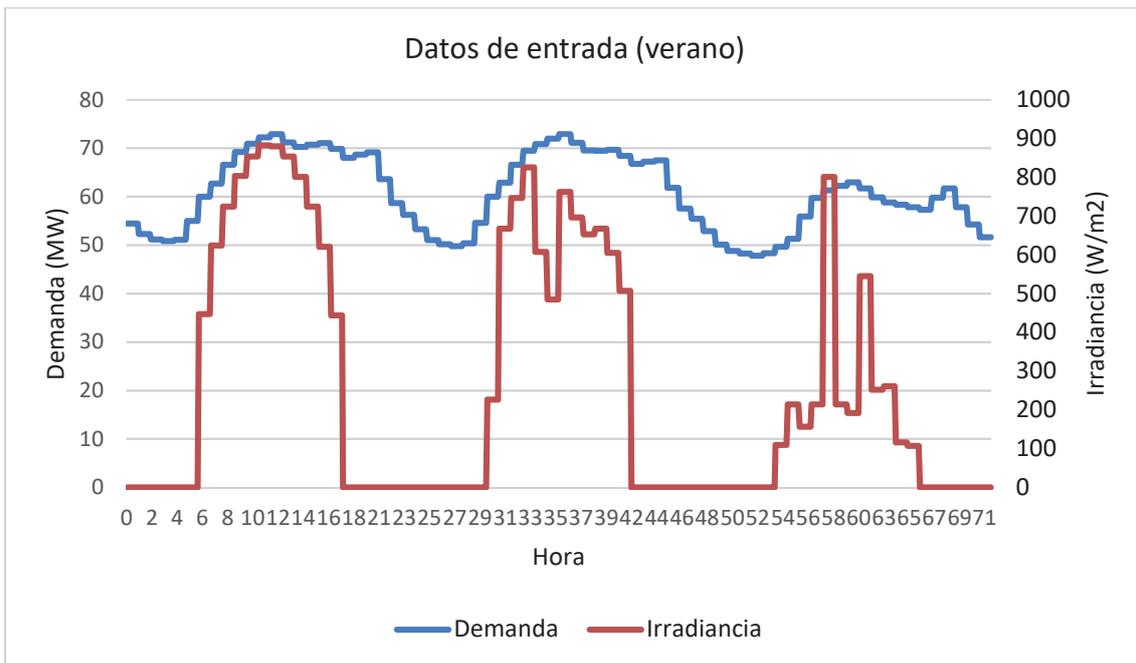
Calor específico	2500 J/kg*K
Superficie del campo solar	30.000.000 m ²
Fracciones del campo solar	10 %
Factor de concentración	60
Rendimiento óptico	0,85
K1	7,5
K2	0,06
Presión de condensador	0,1 bar
Rendimiento isentrópico de la turbina	90 %
Rendimiento del generador	90 %
Carga máxima de los tanques	30.000.000 kg

Tabla 11. Constantes tomadas para la simulación de tres días de invierno y verano

Se comenzará exponiendo las variables de entrada significativas para la central, en la siguiente gráfica se muestra la variación de la irradiancia incidente y de la potencia eléctrica demandada en el período de tres días de invierno y en el período de tres días de verano.



Gráfica 22. Irradiancia y demanda para la simulación diaria de tres días de invierno

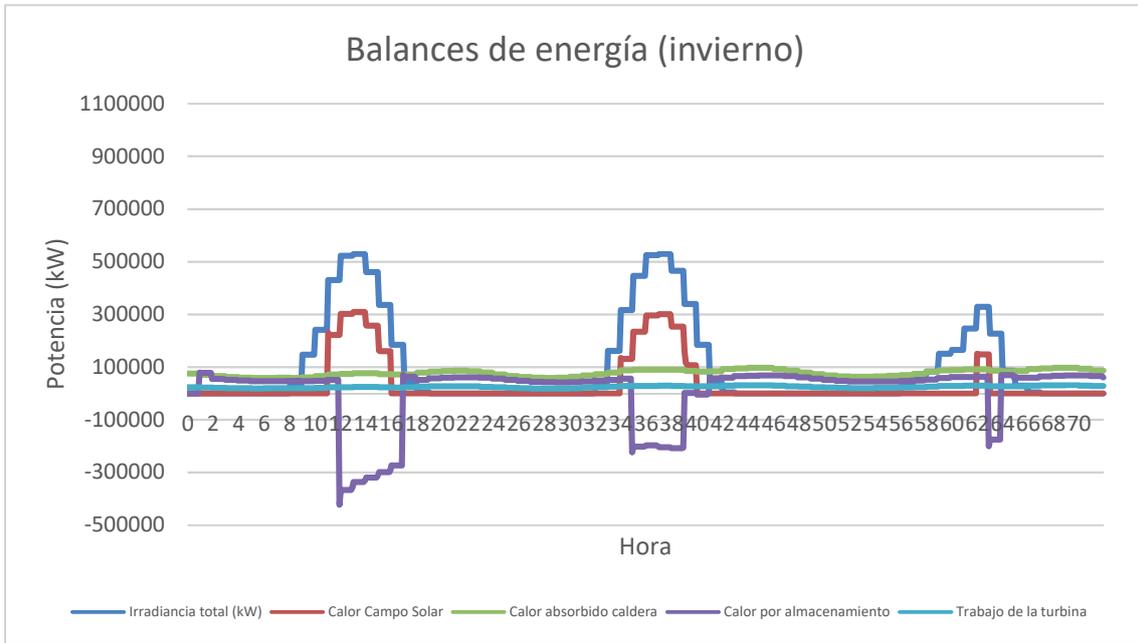


Gráfica 23. Irradiancia y demanda para la simulación diaria de tres días de invierno

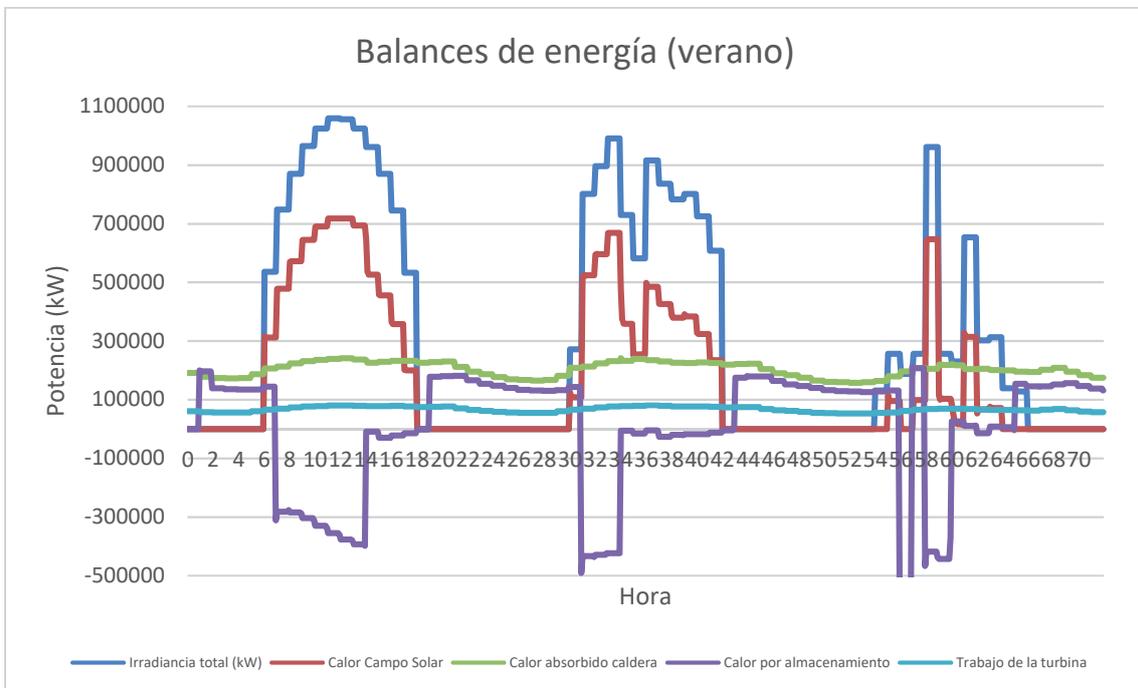
Analizando las gráficas de los datos de entrada, es decir, irradiancia y demanda, que implementamos para la simulación observamos que en invierno tenemos irradiancias que oscilan entre los 0 y los 500 W/m² aproximadamente mientras que en verano llegan a alcanzar los 900 W/m², lo que supondrá una mayor capacidad de producir potencia. Por otro lado, mientras que en invierno sólo se tiene que satisfacer una demanda comprendida entre los 15 y

los 30 MW en verano la demanda oscila entre los 50 y los 75 MW, en estos días en particular, lo que generará una exigencia mayor sobre el ciclo.

A continuación, se mostrarán las gráficas que representan los balances de energía del ciclo, tanto en invierno como en verano, en las cuales se puede ver en que se emplea toda la energía obtenida mediante los captadores solares en cada momento:



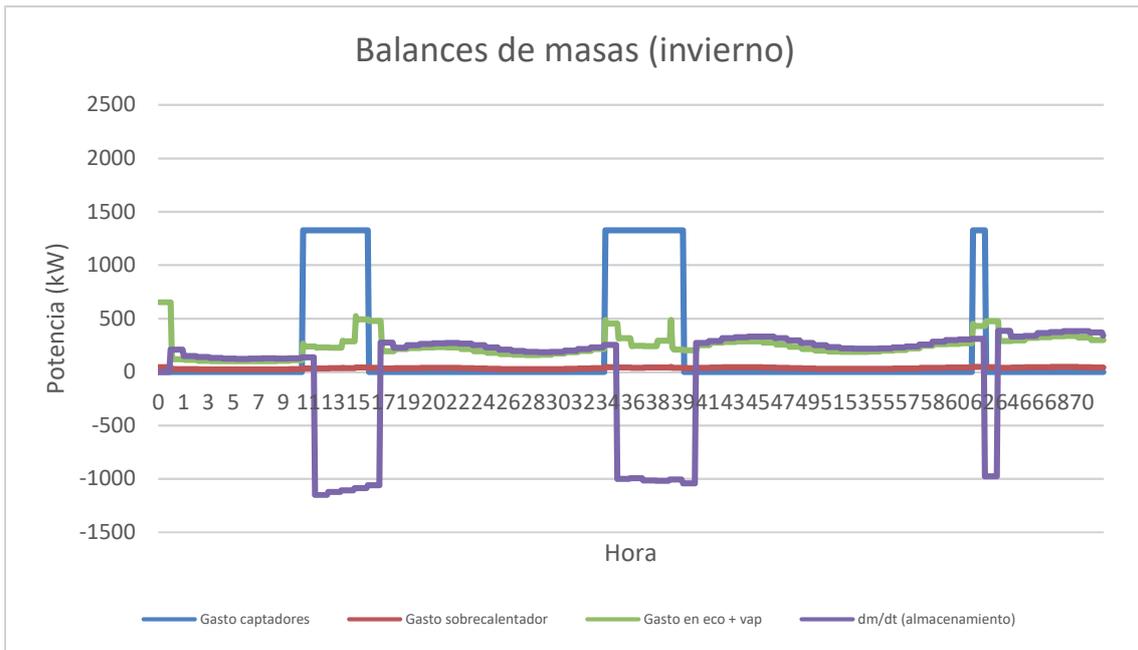
Gráfica 24. Balance de energía del ciclo para la simulación de tres días de invierno



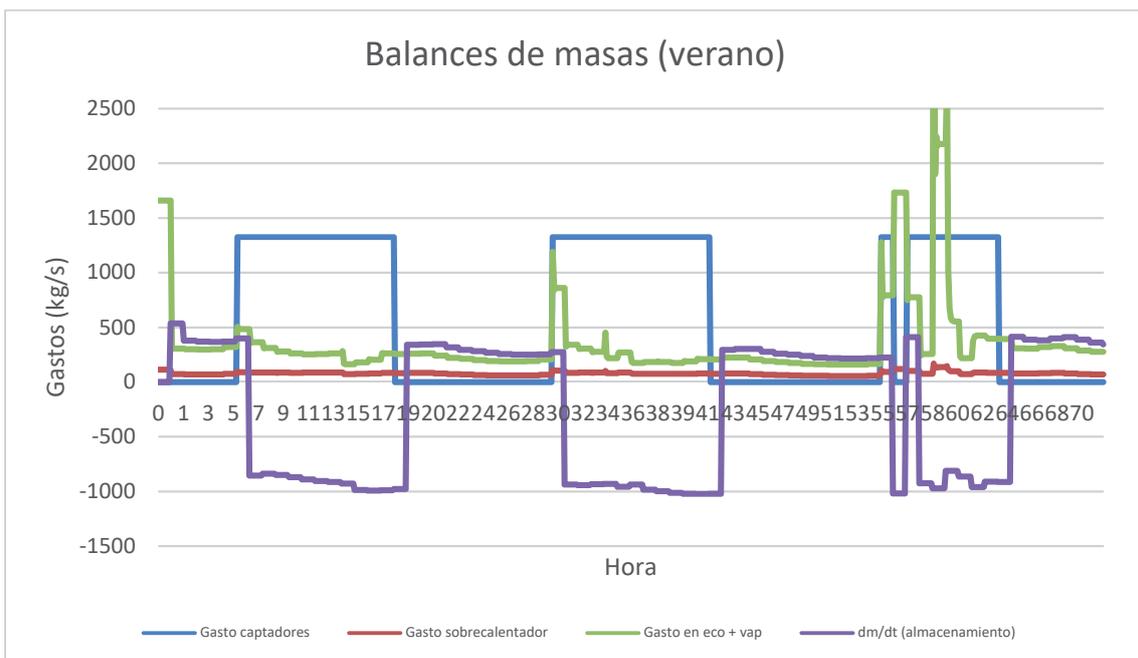
Gráfica 25. Balance de energía del ciclo para la simulación de tres días en verano

En la comparativa de las presentes gráficas de balance de masas podemos destacar, por un lado, la diferencia de magnitud de potencia térmica con la que se trabaja en invierno y en verano. En verano, aún teniendo una demanda muy elevada, observamos que a determinadas horas del día se están utilizando grandes cantidades de energía térmica para ser almacenada, hasta incluso el punto de tener que utilizar el sistema de vaciado del tanque caliente como se ha explicado anteriormente y como se verá más detalladamente cuando se analicen las gráficas de vaciado y llenado de los tanques.

Seguidamente, se expresarán las gráficas en las que se comparan los balances de masa que se producen en el ciclo en los tres días de verano y en los tres días de invierno:



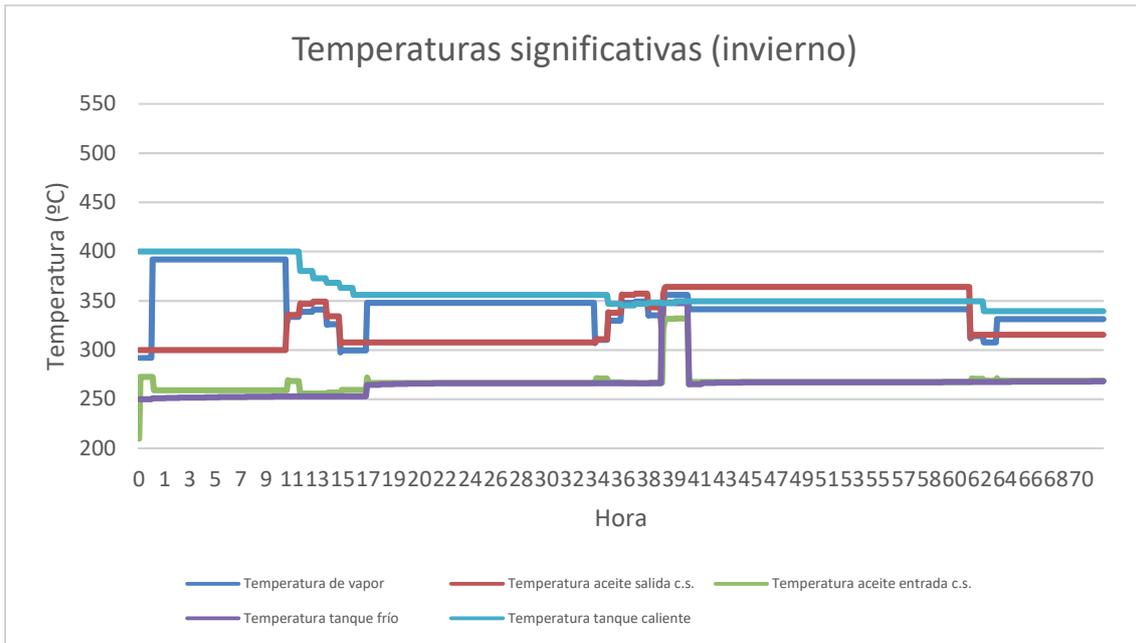
Gráfica 26. Balance de masas para la simulación de tres días de invierno



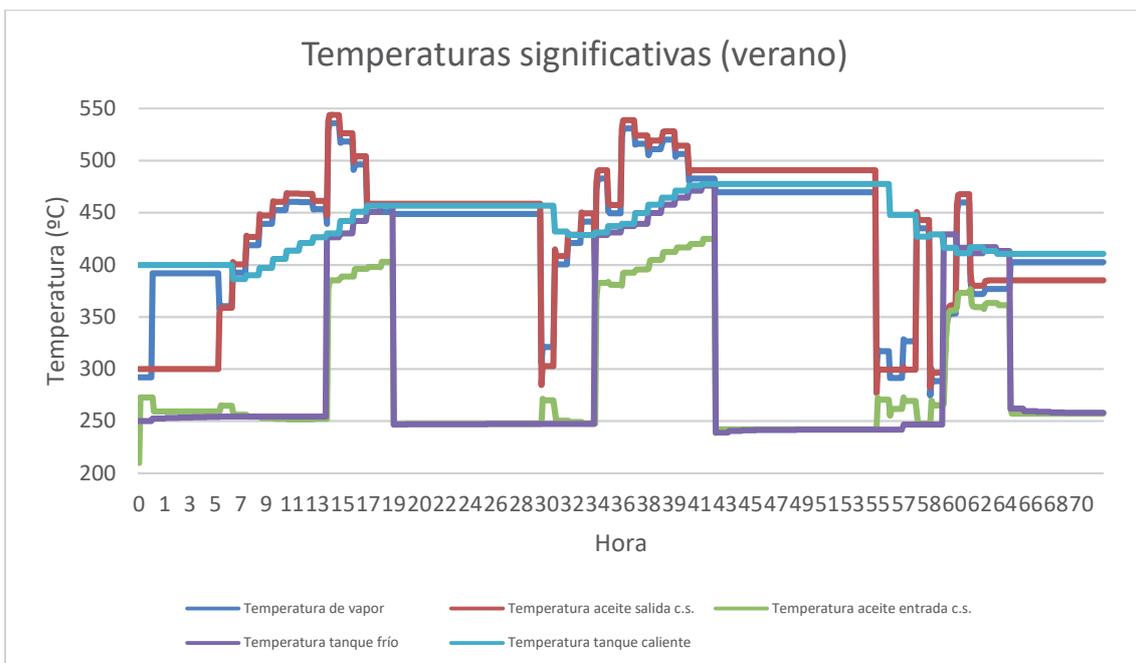
Gráfica 27. Balance de masas para la simulación de tres días de verano

Las conclusiones que se pueden llegar a obtener de las gráficas de balances de masas son similares a las de balance de energía, observando como el periodo de llenado del tanque frío (dm/dt positivo) es en verano mucho más corto porque además de no ser necesario tanto apoyo de la energía almacenada de los tanques, se tienen más horas de sol, en las que en la mayoría de ellas se está llenando el tanque caliente.

A continuación, se muestran las gráficas de la evolución de las temperaturas que se consideran más representativas del ciclo, en los periodos de simulación que ya se han indicado previamente:



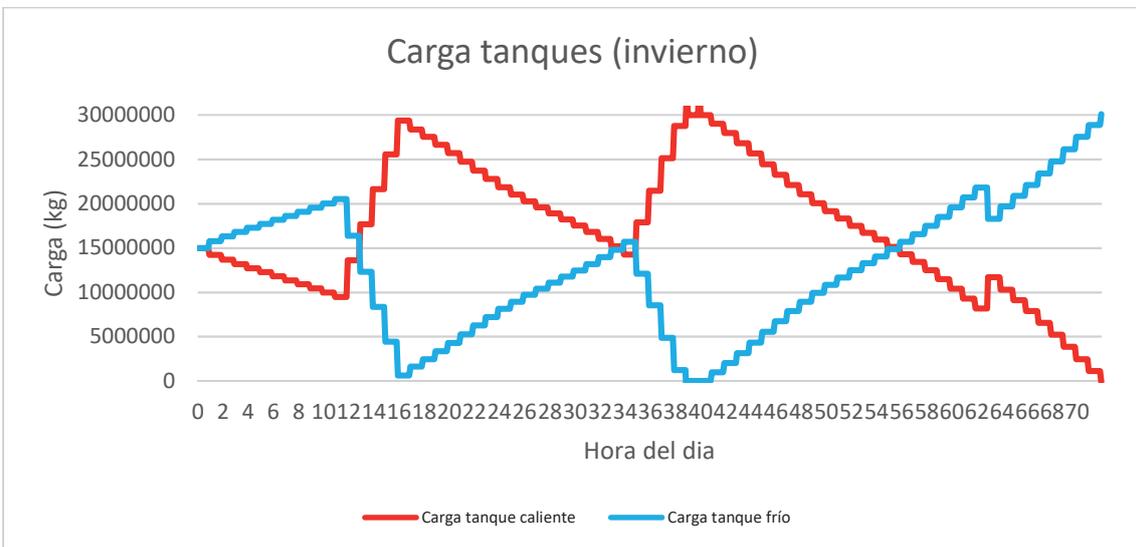
Gráfica 28. Temperaturas representativas del ciclo para la simulación de 3 días de invierno



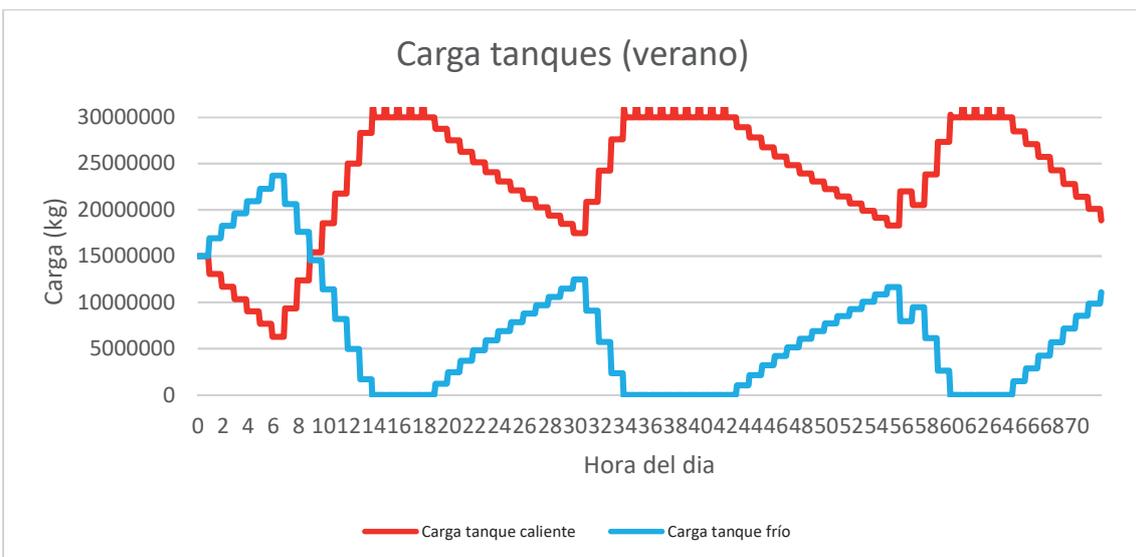
Gráfica 29. Temperaturas representativas del ciclo para la simulación de 3 días de verano

Comparando ambas gráficas podemos observar como en los días de verano se alcanzan temperaturas mucho más altas que en los días de invierno, diferencia que se hace sensible principalmente en la temperatura de salida de aceite del campo solar, temperatura que influye directamente al funcionamiento del intercambiador; observamos que en verano dicha temperatura queda muy cerca de alcanzar los 550°C mientras que en invierno apenas sobrepasa los 350°C. Por otro lado, cabe puntualizar que la temperatura del tanque caliente, al menos en estos días de verano, no llegan a alcanzar temperaturas que pudiésemos considerar peligrosas, por lo tanto, no se activa el sistema de seguridad que se había implementado, en el cual se dejaba de circular aceite por el campo solar para trabajar sólo con la energía almacenada en los tanques.

Por último, se mostrará la gráfica del parámetro que se considerará determinante para el dimensionamiento del ciclo, la carga del tanque:



Gráfica 30. Carga de los tanques para la simulación de tres días de invierno



Gráfica 31. Carga de los tanques para la simulación de tres días de verano

Se comenzará analizando la gráfica referente a los días de invierno, observamos que llegando a la última noche el tanque caliente pasa a estar prácticamente vacío, es previsible que, si se permitiesen en la simulación una o dos horas más, el tanque pasase a estar totalmente vacío, esto querría decir que la combinación de superficie de captación y volumen de almacenamiento es insuficiente y por lo tanto habría que aumentar alguno de los dos parámetros o ambos.

Por otro lado, en el caso de la simulación de los días de verano, vemos que los tanques son más que suficientes para satisfacer la demanda. También observamos que el tanque caliente alcanza su máximo de carga durante varias horas, en las cuales podemos ver que se vacía hacia el tanque frío, es por ello que dicha gráfica resulta representativa para conocer comportamiento del ciclo en verano.

5.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN ANUAL

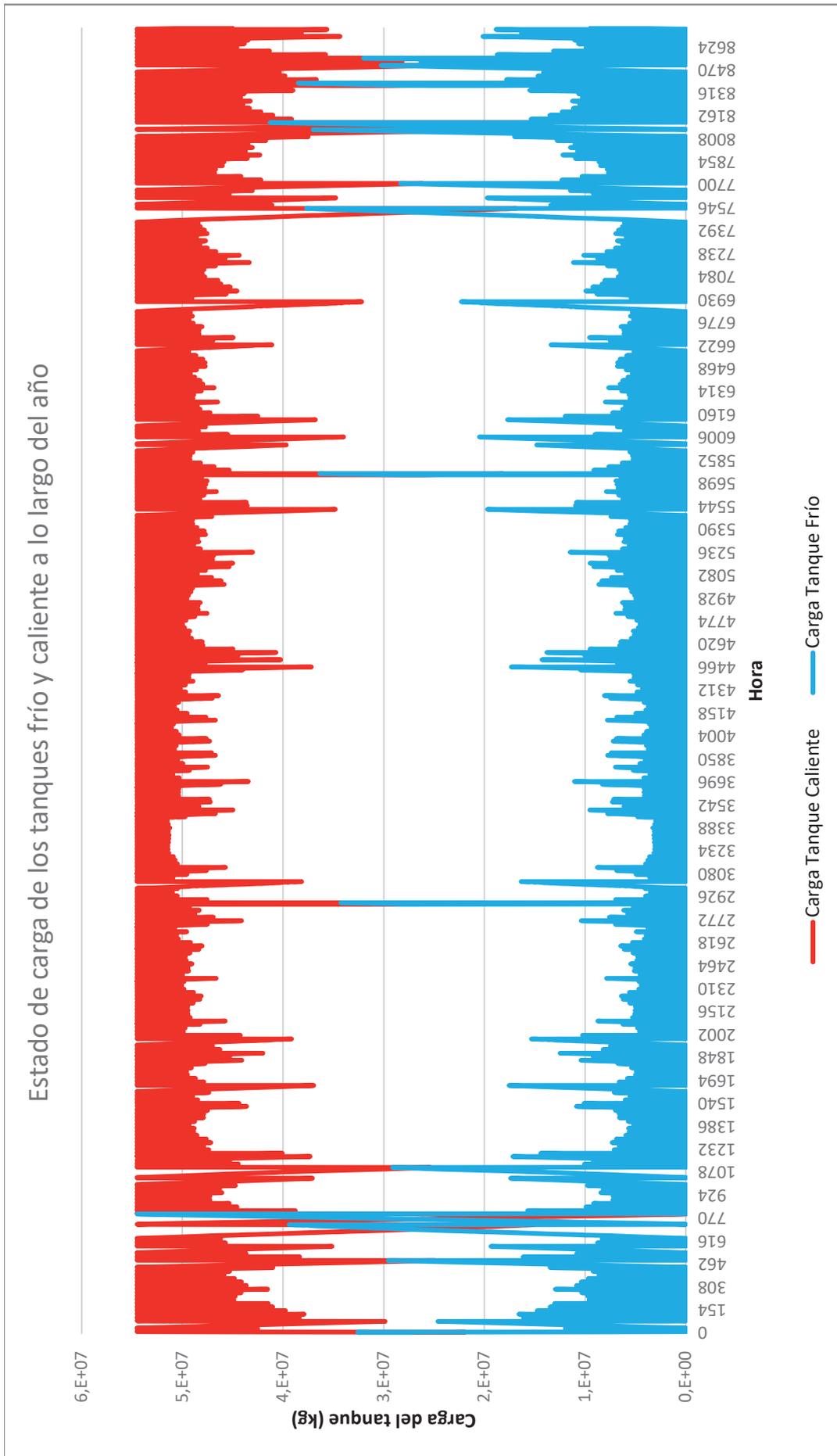
En el presente apartado se va a presentar y analizar un ejemplo de resultado de simulación anual, más concretamente la gráfica de estado de carga de los tanques, pues es la que servirá para el dimensionamiento de la central.

Al igual que en el actual ejemplo, como se ha mencionado previamente, se desarrollarán más combinaciones de área de captación y volumen de almacenamiento para con ello poder representar la gráfica que relaciona ambas variables para obtener la combinación óptima.

Los valores de entrada del resultado que se va a presentar son lo que se han expuesto en el apartado 2.1. de la Memoria.

A continuación, se presenta el grado de carga de los tanques en función de la hora del año para el siguiente caso:

Superficie de captación	6.000.000 m ²
Carga máxima de almacenamiento	54.500.000 kg



Gráfica 32. Estado de la carga de los tanques en una simulación anual

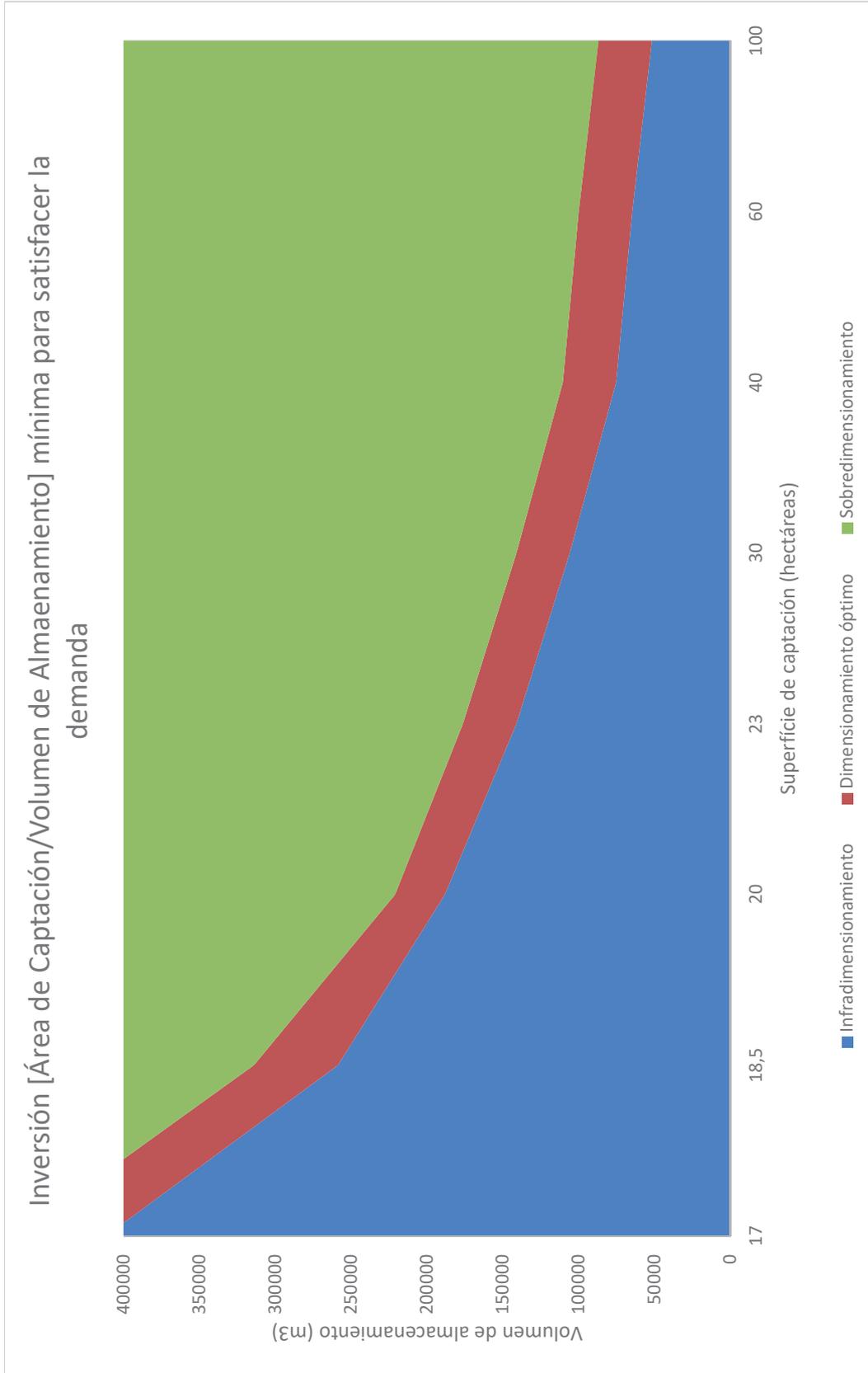
De la presente gráfica se puede concluir que las horas más desfavorables del año se corresponden a las comprendidas entre las 806 y 808 horas, consiguiendo que en estas horas no se alcancen valores negativos de carga del tanque caliente. Gracias a esta suposición, se consigue un ahorro de tiempo de computación debido a que deja de ser necesaria la simulación del año completo cada vez que se quiera realizar un cálculo paramétrico, ahorrando así un gran número de cálculos a la hora de realizar el estudio.

5.4. RESULTADOS DEL ESTUDIO PARAMÉTRICO

En el siguiente apartado, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos en el estudio paramétrico. Como se ha explicado anteriormente, el estudio se ha realizando tomando diez valores de superficie de captación y mediante una simulación como la de la anterior gráfica, se analiza el punto más desfavorable del año, si el tanque caliente no alcanza valores negativos en el mismo se puede concluir que dicho punto sí que cumple la demanda. La relación óptima será pues la que cumpla la demanda con el menor volumen de almacenamiento posible.

Como se expuso en los objetivos del proyecto el resultado esperado tendrá forma de exponencial negativa y en ella se aplicará un determinado factor para obtener un determinado rango de valores sobre el cual no se considere que se esté sobredimensionando la central.

A continuación, se muestra, pues, la relación entre el área de captación y el volumen de almacenamiento, es decir, el objetivo principal del presente proyecto:



Gráfica 33. Relación entre la superficie de captación y el volumen de almacenamiento para obtener un dimensionamiento óptimo

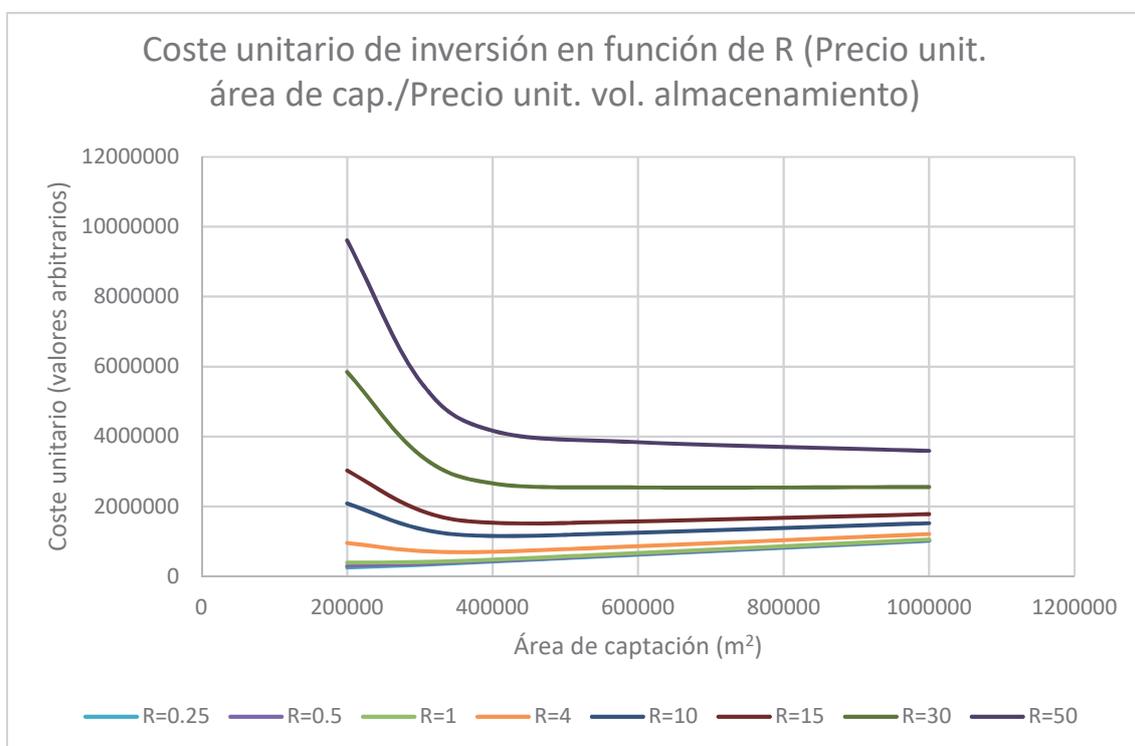
Observamos que, como era predecible, obtenemos una gráfica descendente que se asemeja mucho a una exponencial negativa, en la cual se puede identificar como la zona más interesante la que se encuentra entre 18,5 hectáreas y 40 hectáreas de superficie de captación, esto es porque, por debajo de dicho valor de 18,5 hectáreas para reducir una hectárea de superficie de captación habría que aumentar de forma muy considerable el volumen de almacenamiento; pasa lo mismo pero al contrario en el caso de superficies de captación mayores de 40 hectáreas, la reducción del volumen de almacenamiento viene condicionada por un aumento muy elevado de la superficie de captación.

Por otro lado, dicha gráfica no resulta muy operativa de analizar a la hora de realizar un estudio económico previo al proyecto, es por ello que se decide desarrollar un nuevo par de gráficas que nos permitan realizar un análisis mucho más directo de dichos parámetros a la hora de realizar el estudio sobre la inversión.

Para ello comenzaremos introduciendo un parámetro que denominaremos “R”, el cual se presenta a continuación:

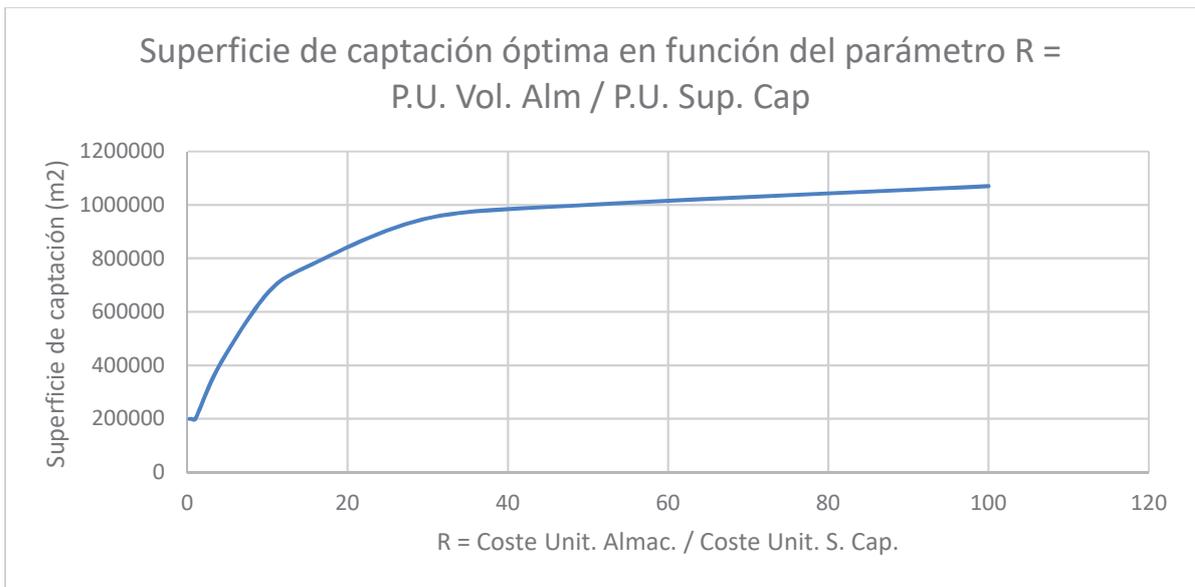
$$R = \frac{\text{Precio unitario del volumen de almacenamiento } \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3} \right]}{\text{Precio unitario de la superficie de captación } \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^2} \right]}$$

Una vez definido dicho parámetro “R”, se desarrollará una gráfica en la que se muestre el precio en función del coste unitario de la superficie de captación, haciendo uso de la relación área/volumen expresada previamente.

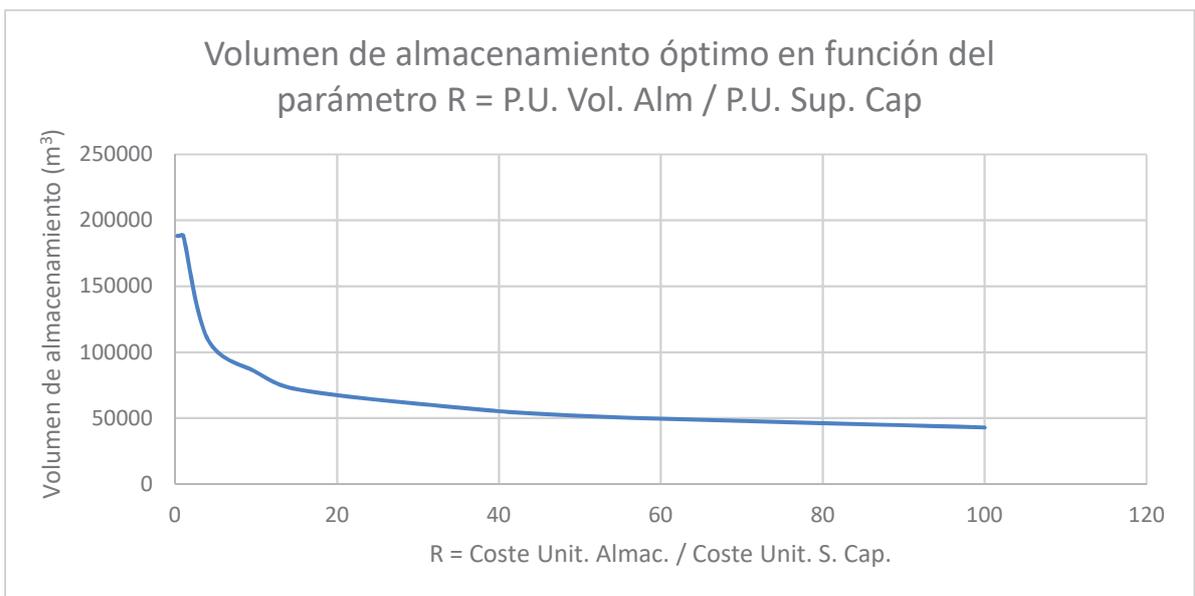


Gráfica 34. Coste unitario de inversión en función del parámetro R

De esta gráfica resulta de importancia el valor de los mínimos de las curvas mostradas en función de su respectivo parámetro "R", para así obtener un valor óptimo de superficie de captación en función de la relación del valor de los precios unitarios de volumen de almacenamiento y superficie de captación; del mismo modo, con ayuda de la Gráfica 34, la cual nos ofrece un valor de volumen de almacenamiento asociado a un valor de superficie de captación para obtener un dimensionamiento óptimo, se desarrollan las siguientes gráficas las cuales nos proporcionan los dimensionamientos óptimos de la superficie de captación y del volumen de almacenamiento en relación a la relación de los precios unitarios de ambas.



Gráfica 35. Superficie de captación óptima en función del parámetro R



Gráfica 36. Volumen de almacenamiento óptimo en función del parámetro R

5.5. CONCLUSIONES

5.5.1. Conclusiones sobre el estudio paramétrico

Mediante el estudio paramétrico se ha comprobado la existencia de un rango de valores de relación entre la superficie de captación y el volumen de almacenamiento en el cual se puede asegurar la satisfacción de la demanda con un dimensionamiento mínimo de ambos parámetros de la central solar térmica.

Mediante la observación de la gráfica que relaciona ambos parámetros, se ha concluido que el rango entre 18,5 hectáreas y 40 hectáreas de superficie de captación y sus homólogos en volumen de almacenamiento resultan los rangos de dimensionamiento más interesantes, porque fuera de estos rangos para la disminución del tamaño de uno de los dos parámetros supondría un aumento mucho mayor del otro.

Por último, las gráficas 36 y 37 nos proporcionan por otro lado, información directamente aplicable en caso de conocer los precios unitarios tanto de la superficie de captación como del volumen de almacenamiento, podemos observar que a llega un momento que el aumento del precio unitario del volumen de almacenamiento por encima de 40 veces el precio unitario de la superficie de captación no supone apenas ningún cambio en la relación volumen superficie de dicha central.

5.5.1. Conclusiones sobre la metodología

Se ha considerado importante realizar el siguiente apartado para aportar una serie de comentarios sobre la metodología empleada para realizar el cálculo del estudio paramétrico.

La forma de cálculo iterativo ha resultado realmente útil para obtener resultados estacionarios lo más próximos a la realidad, no obstante, cabe mencionar que, debido a la herramienta de cálculo que se ha utilizado, en este caso *Microsoft Excel*, ha resultado especialmente difícil la simulación de grandes períodos de tiempo dado que, para simular un año, o lo que es lo mismo, 8760 horas, mediante el método iterativo hay que realizar un número muy elevado de operaciones las cuales hacían que el terminal sobre el que se está trabajando dejase de funcionar en varias de las ocasiones o tardase periodos de tiempo demasiado elevados en la simulación total, es por ello que se concluye que habría resultado interesante el estudio de otras vías de cálculo, lo cual no se ha podido efectuar, entre otras cosas, por falta de tiempo.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

6.1. BIBLIOGRAFÍA

Termodinámica Técnica

Editorial: Universidad Politécnica de Valencia, Autores: José Luis Gómez Ribelles, Manuel Monleón Pradas, Gloria Gallego Ferrer.

6.2. TEMARIO DE ASIGNATURAS

Física II – 12930

2014, Responsable de la asignatura: Jorge Curiel Esparza

Termodinámica - 12942

2015, Responsable de la asignatura: Manuel Monleón Pradas

Termodinámica Técnica – 12941

2016, Responsable de la asignatura: José Luis Gómez Ribelles

Energía y Desarrollo Sostenible – 12958

2016, Responsable de la asignatura: Sofía Carlos Alberola

Máquinas Térmicas – 12953

2017, Responsable de la asignatura: Francisco José Arnau Martínez

Combustión y Generación de Calor – 12951

2016, Responsable de la asignatura: Raúl Payri Marín

Transmisión de Calor – 12943

2016, Responsable de la asignatura: Jorge Payá Herrero

Proyectos – 12945

2017, Responsable de la asignatura: Víctor Cloquell Ballester

Centrales Térmicas y Cogeneración – 12959

2017, Responsable de la asignatura: Jean Joseph Pierre Arrègle

6.3. PÁGINAS WEB

ESIOS – Red Eléctrica de España

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

Operador de Mercado Ibérico de la Energía

<http://www.omie.es>

U.S. Department of Energy

<https://www.energy.gov/>

Plataforma Solar de Almería

<http://www.psa.es/es/index.php>

Torresol Energy - Gemasolar

<http://torresolenergy.com/en/gemasolar>

Wikipedia - Andasol

<https://es.wikipedia.org/wiki/Andasol>

Sener – NOOro III

<http://www.poweroilandgas.sener/es/proyecto/planta-termosolar-torre-central-nooro-iii>

Tablas X-Steam para Microsoft Excel

<http://xsteam.sourceforge.net/>

PRESUPUESTO

MODELADO Y OPTIMIZACIÓN DE UNA CENTRAL SOLAR TÉRMICA DE 80 MW

CUADRO DE UNITARIOS

Licencias

Código	Descripción	Unidades	Precio unitario	Subtotal
L01	Suite Microsoft Office (v. estudiante)	1	0,00 €	0,00 €
L02	Tablas X-Steam para Microsoft Excel	1	0,00 €	0,00 €
TOTAL LICENCIAS				0,00 €

Material

Código	Descripción	Unidades	Precio unitario	Subtotal
M01	Material de escritura	5	0,10 €	0,50 €
M02	Soporte de escritura	300	0,03 €	9,00 €
M03	Impresiones	400	0,15 €	60,00 €
TOTAL MATERIAL				69,50 €

Trabajos realizados

Código	Descripción	Horas	Precio unitario	Subtotal
T01	Equipo Informático	300	0,02 €	6,00 €
T02	Honorarios ingeniero junior	300	15,00 €	4.500,00 €
TOTAL TRABAJOS R.				4.506,00 €

Datos

Código	Descripción	Unidades	Precio unitario	Subtotal
D01	Datos climatológicos	1	0,00 €	0,00 €
D02	Datos de la demanda eléctrica	1	0,00 €	0,00 €
TOTAL DESEMPEÑO				0,00 €

RESUMEN	
LICENCIAS	0,00 €
MATERIAL	69,50 €
TRABAJOS REALIZ.	4.506,00 €
DATOS	0,00 €

PPTO TOTAL	4.575,50 €
(IVA excluido)	

CUADRO DE DESCOMPUESTOS

Capítulo 1: Análisis Previo

Materiales, herramientas y trabajos referidos al análisis previo del contexto de la central solar térmica

Código	Descripción	Unidades	Precio unitario	Subtotal
M01	Material de escritura	1	0,10 €	0,10 €
M02	Soporte de escritura	50	0,03 €	1,50 €
M03	Impresiones	100	0,15 €	15,00 €
D01	Datos climatológicos	1	0,00 €	0,00 €
D02	Datos de la demanda eléctrica	1	0,00 €	0,00 €
T01	Equipo Informático	50	0,02 €	1,00 €
T02	Honorarios ingeniero junior	50	15,00 €	750,00 €
L01	Suite Microsoft Office (v. estudiante)	1	0,00 €	0,00 €

TOTAL CAP. 1	767,60 €
---------------------	-----------------

Capítulo 2: Estudio Previo

Materiales, herramientas y trabajos referidos al estudio previo del modelo de la central solar térmica

Código	Descripción	Unidades	Precio unitario	Subtotal
M01	Material de escritura	1	0,10 €	0,10 €
M02	Soporte de escritura	50	0,03 €	1,50 €
M03	Impresiones	100	0,15 €	15,00 €
T01	Equipo Informático	50	0,02 €	1,00 €
T02	Honorarios ingeniero junior	50	15,00 €	750,00 €
L01	Suite Microsoft Office (v. estudiante)	1	0,00 €	0,00 €
L02	Tablas X-Steam para Microsoft Excel	1	0,00 €	0,00 €

TOTAL CAP. 2	767,60 €
---------------------	-----------------

Capítulo 3: Estudio del Modelo

Materiales, herramientas y trabajos referidos al estudio y desarrollo del modelo de la central solar térmica

Código	Descripción	Unidades	Precio unitario	Subtotal
M01	Material de escritura	1	0,10 €	0,10 €
M02	Soporte de escritura	100	0,03 €	3,00 €
M03	Impresiones	100	0,15 €	15,00 €
T01	Equipo Informático	100	0,02 €	2,00 €
T02	Honorarios ingeniero junior	100	15,00 €	1.500,00 €
L01	Suite Microsoft Office (v. estudiante)	1	0,00 €	0,00 €
L02	Tablas X-Steam para Microsoft Excel	1	0,00 €	0,00 €
TOTAL CAP. 3				1.520,10 €

Capítulo 4: Análisis de Resultados

Materiales, herramientas y trabajos referidos a la generación de resultados y análisis de los mismos del modelo de la central solar térmica

Código	Descripción	Unidades	Precio unitario	Subtotal
M01	Material de escritura	2	0,10 €	0,20 €
M02	Soporte de escritura	100	0,03 €	3,00 €
M03	Impresiones	100	0,15 €	15,00 €
T01	Equipo Informático	100	0,02 €	2,00 €
T02	Honorarios ingeniero junior	100	15,00 €	1.500,00 €
L01	Suite Microsoft Office (v. estudiante)	1	0,00 €	0,00 €
L02	Tablas X-Steam para Microsoft Excel	1	0,00 €	0,00 €
TOTAL CAP. 4				1.520,20 €

RESUMEN	
Capítulo 1	767,60 €
Capítulo 2	767,60 €
Capítulo 3	1.520,10 €
Capítulo 4	1.520,20 €
PPTO TOTAL	4.575,50 €
(IVA excluido)	

