



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

MODELADO Y ANÁLISIS DE UNA CENTRAL SOLAR TERMOELÉCTRICA PARA LA ISLA DE EL HIERRO

AUTOR: LUIS CARRERAS NAVARRO

TUTOR: JEAN J. P. ARREGLE

Curso Académico: 2015-16

AGRADECIMIENTOS

“A mi familia, por permitirme haber realizado los estudios;
a mi tutor, por enfocar y potenciar mis ideas del trabajo
y a mis compañeros, por respaldarme estos cuatro años.”

RESUMEN

El presente documento es el desarrollo académico del estudio de la sustitución de una central que opera con combustibles fósiles para proveer a una región aislada de una determinada cantidad de energía, por distintas opciones basadas en tecnología termosolar. Se estudian en este documento las distintas características técnicas de las diferentes opciones para como conclusión obtener una comparativa eficaz y equitativa de los parámetros técnicos, proporcionando de esta manera una serie de pautas para que en una futura implantación de la nueva planta, únicamente la labor restante sea la aplicación de parámetros económicos. Para la evaluación de dicha comparativa, se presenta además una aplicación ofimática en *Microsoft Excel*, con la que se puede visualizar la operatividad de las distintas opciones termodinámicas.

Palabras Clave: Termosolar, Central térmica, Captadores solares, Ciclo de vapor, *Fuel-oil*, Comparativa, Aplicación ofimática, Energía, Potencia y Generación.

RESUM

El present document és el desenvolupament acadèmic de l' estudi de la substitució d'una central que opera amb combustibles fòssils per proveir a una regió aïllada d'una determinada quantitat d'energia, per diferents opcions basades en tecnologia termosolar. S'estudien en aquest document les diferents característiques tècniques de les diferents opcions per com a conclusió obtenir una comparativa eficaç i equitativa dels paràmetres tècnics, proporcionant d'aquesta manera una sèrie de pautes perquè en una futura implantació de la nova planta, únicament la tasca restant siga l'aplicació de paràmetres econòmics. Per a l'avaluació d'aquesta comparativa, es presenta a més una aplicació ofimàtica en *Microsoft Excel*, amb la qual es pot visualitzar l'operativitat de les diferents opcions termodinàmiques.

Paraules clau: Termosolar, Central tèrmica, Captadors solars, Cicle de vapor, *Fuel-oil*, Comparativa, Aplicació ofimàtica , Energia , Potència i Generació.

ABSTRACT

This document is the academic development of the study of the replace of a plant that operates with fossil fuels to provide an isolated region of a certain amount of energy, by different options based on solar thermal technology. Technical characteristics of the different options are studied in this paper, in order to obtain for conclusion an effective and fair comparison of the technical parameters, thereby providing a set of guidelines for a future implementation of the new plant, where only the remaining work is the application of economic parameters. For the evaluation of the comparative, it also has an office automation application in *Microsoft Excel*, which allow you to view the operation of the various thermodynamic parameters.

Keywords: Solar thermal, Thermic power plant, Solar collectors, Steam cycle, Fuel oil, Comparative, Office automation application, Energy, Power and Generation.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Aplicación ofimática
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. Introducción	2
1.1. Objetivo del trabajo	2
1.2. Teoría de las centrales solares termoeléctricas	3
1.2.1. Aprovechamiento de la energía solar térmica	3
1.2.2. Clasificación de las centrales solares termoeléctricas	3
1.2.3. Sistemas de captación solar	4
1.3. Teoría del ciclo de Rankine	6
1.4. Contexto del trabajo	8
1.4.1. Contexto geográfico de la instalación	9
1.4.2. Contexto técnico de la instalación	11
1.5. Metodología del trabajo	16
2. Desarrollo de los modelos matemáticos	17
2.1. Esquema y puntos termodinámicos	17
2.2. Estados termodinámicos	19
2.3. Balance de masas y energía	23
2.4. Sistema de condensación	26
2.4.1. Proceso de iteración	26
2.5. Sistema de captación solar	29
2.5.1. Proceso de discretización	30

2.6.	Sistema de soporte con caldera	32
2.7.	Definición del rendimiento del ciclo	34
3.	Proceso de desarrollo del modelo	35
3.1.	Notas sobre el proceso	35
3.2.	Validación del modelo	36
4.	Aplicación del modelo.....	45
4.1.	Tratamiento del recalentamiento	45
4.2.	Metodología de uso de la aplicación	46
4.3.	Análisis comparativo de un catálogo de captadores	48
4.4.	Análisis comparativo de la operatividad en función de regeneración y superficie	53
4.5.	Análisis comparativo anual con ejemplo de aplicación económica	55
4.6.	Conclusión de la aplicación del modelo para el caso planteado	63
5.	Referencias	64
5.1.	Temario	64
5.2.	Bibliografía	65
5.3.	Páginas web	65

MODELADO Y ANÁLISIS DE UNA CENTRAL SOLAR TERMOELÉCTRICA PARA LA ISLA DE EL HIERRO

MEMORIA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVO DEL TRABAJO

La propuesta académica que se presenta en este Trabajo Final de Grado (TFG) se ve enmarcada en una multiplicidad de objetivos. Por una parte, la meta innata de un trabajo de este carácter, es decir, la demostración de que los conocimientos impartidos durante el grado y cursos lectivos han sido aprendidos y puestos en práctica por el alumno.

En este caso, dado el carácter relativo a la energía del propio grado, la temática versará sobre los temas de termodinámica, transmisión de calor, energías renovables térmicas, máquinas térmicas, máquinas hidráulicas, centrales térmicas, combustión y generación de calor. Como es apreciable, todos los temas han sido impartidos durante los cuatro cursos de la titulación, y por tanto serán múltiples las referencias hacia el temario de cada uno de dichos campos.

Por otra parte, el objetivo del contenido del trabajo será el estudio académico y teórico de la implantación de una planta de generación energética basada en la tecnología termosolar. Se tratará por tanto de la emulación de una fase de anteproyecto en la que dado un conjunto de condiciones ambientales y energéticas, a un ingeniero de la energía se le encarga preparar un método comparativo eficaz que permita la distinción de distintas configuraciones de central para la implantación de dicha planta, que será la sustituta de una planta anterior que operaba con *fuel-oil*. Del mismo modo, para lograr este objetivo de comparativa se interpondrá la elaboración de una herramienta ofimática mediante *Microsoft Excel* de fácil uso para el posterior responsable, que incorpore el desarrollo de un modelo matemático capaz de emular los criterios de operación de una planta basada en tecnología termosolar.

Pero sin duda, el objetivo que mayor representa el alcance de este trabajo es la obtención de un resultado que permita la comparativa entre los distintos tipos de tecnología termosolar y de generación que se estudiarán. Dado el distinto grado de complicidad técnica y económica de las distintas optativas de diseño, se pretende como objetivo de los últimos capítulos realizar los ajustes necesarios para buscar la equidad entre opciones (con ánimo de poder compararlas en igualdad de condiciones) y presentar como resultado de este trabajo una serie o listado de posibles tipos de instalaciones, comparables entre sí, para que posteriormente un supuesto encargado de la implantación de la nueva planta pueda añadir criterios económicos que permitan decidir qué opción es la mejor en cuanto a la implantación.

En resumen, el objetivo final de este trabajo es estudiar distintos modelos de instalaciones termosolares y compararlas entre sí de una manera equitativa, para que un futuro encargado de implantación pueda aplicar los criterios económicos necesarios para la sustitución de una anterior planta de generación basada en *fuel-oil*, para una ubicación geográfica concreta (la isla de El Hierro), junto al desarrollo de la metodología de comparación.

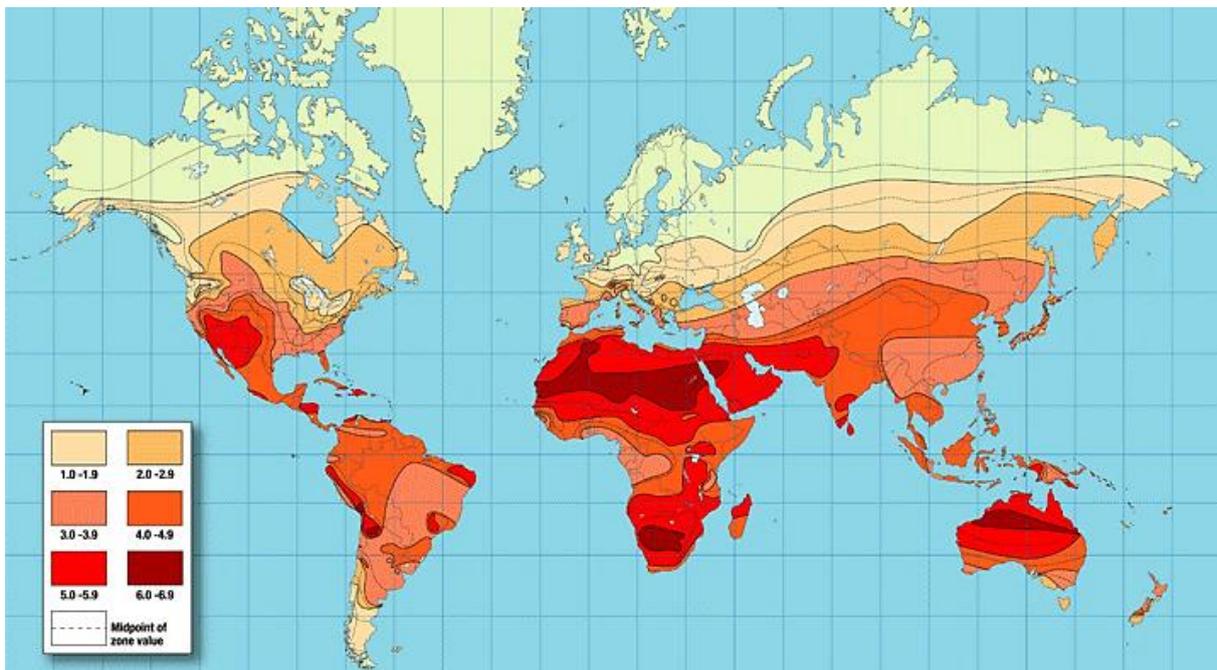
1.2. TEORÍA DE LAS CENTRALES SOLARES TERMOELÉCTRICAS

En el presente apartado la pretensión se enmarca en el aporte de la información básica de la descripción de las centrales que operan en base a energía termosolar.

1.2.1. Aprovechamiento de la energía solar térmica

El aprovechamiento de la energía solar térmica es el uso de la radiación solar para calentar un fluido, que en función de su temperatura, se utilizará para producir agua caliente, vapor o energía eléctrica. Las centrales solares termoeléctricas emplean el aprovechamiento para rangos medios y altos de temperatura. El potencial energético de un área geográfica mide la capacidad de uso de la radiación solar. Tal como puede verse en la imagen inferior, a nivel mundial, el mayor aprovechamiento se da en la zona desértica del Sáhara.

Imagen 1. Niveles de radiación mundial.



1.2.2. Clasificación de las centrales solares termoeléctricas

Según el número de componentes que transforman la energía solar en energía térmica para el fluido caloportador se encuentran las siguientes modalidades:

- **Receptor central.** Solo existe un único componente para toda la planta. Por ejemplo, las centrales de torre.
- **Colectores distribuidos.** Cada elemento catador de energía solar posee su propio dispositivo de transformación en energía térmica.

Además de esta clasificación, las centrales termosolares se pueden clasificar por rangos de temperatura, pero esta distinción será descrita más adelante.

1.2.3. Sistemas de captación solar

Los sistemas de captación solar o captadores requieren el uso de radiación directa, ya que no permiten el aprovechamiento de la difusa. Por tanto se hace necesario el seguimiento solar para cada uno de los tipos de captadores siguientes:

- **Concentración puntual (foco único).** Concentran la radiación en un solo punto llegando por tanto a muy altas temperaturas, aunque se hace necesario el seguimiento respecto a dos ejes por parte de los heliostatos (espejos). Las configuraciones típicas de esta configuración son las centrales tipo torre y la configuración disco-parabólica (tipo Stirling).

Imagen 2. Central de torre PS10 – Sanlúcar la Mayor [Sevilla, España]



Imagen 3. Plataforma solar discoparabólica de Almería [España]



- **Concentración lineal (foco distribuido).** Se emplea la concentración de toda la radiación solar en un receptor lineal situado encima de los espejos, utilizando en este caso temperaturas no tan altas como en la concentración puntual, pero empleando únicamente seguimiento a un eje. El enfoque del trabajo empleará este tipo de configuraciones, en las que destacan los captadores tipo Fresnel y tipo cilindroparabólicos.

Imagen 4. Central tipo Fresnel 30 MW – Puerto Errado [Murcia, España]



Imagen 5. Captadores cilindroparabólicos de NSO 250 MW – Boulder City [Nevada, Estados Unidos]

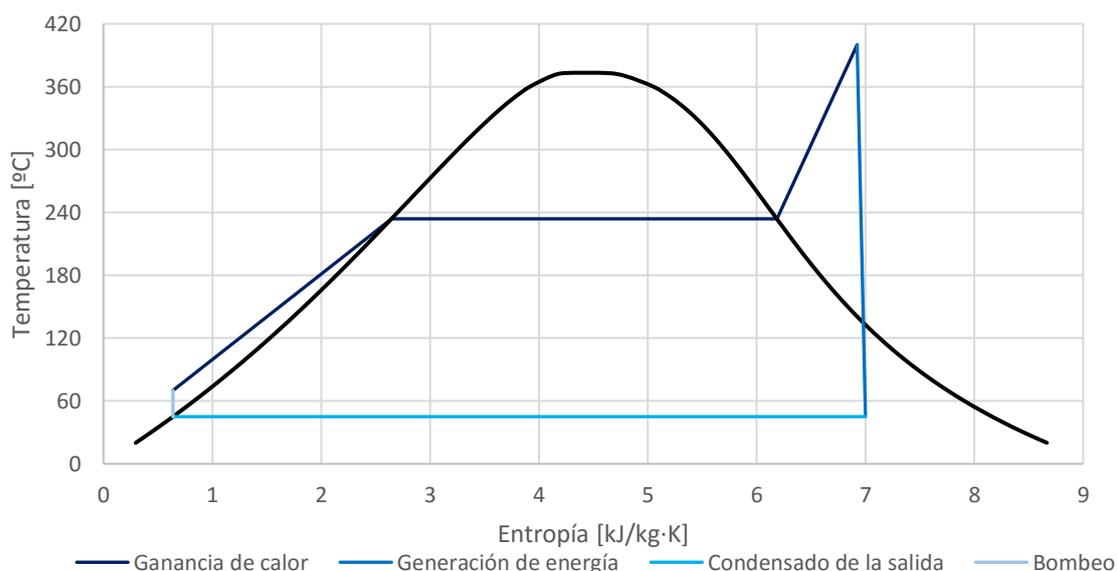


1.3. TEORÍA DEL CICLO DE RANKINE

El ciclo que se emplea en cualquier sistema de generación por turbinas de vapor es el ciclo de Rankine, y aunque las bases son considerablemente sólidas, el avance de la tecnología ha permitido el devenir de numerosas maneras de mejorar la explotación y rendimiento de la configuración básica. Se planteará en las siguientes líneas la manera de proceder para poder evaluar dichas mejoras y su implicación en el modelo de central que se intenta evaluar o comparar.

Ante todo, previo al comentario sobre las mejoras se hace necesario comentar las bases del ciclo de Rankine. Este ciclo se compone de cuatro etapas fundamentales: ganancia de calor (campo de captadores y/o soporte en este estudio académico), generación de potencia mediante turbinado, condensación de la salida de las productoras de potencia y bombeo para reequilibrar los niveles de presión. En el siguiente esquema puede verse la evolución entrópica y térmica del proceso:

Gráfico 1. Ciclo de Rankine básico.



A dicha configuración básica se le han adherido numerosas mejoras técnicas, pero que quedan representadas en las propuestas siguientes y que serán objeto de estudio en los apartados respectivos:

- **Recalentamiento.** La pretensión que conlleva utilizar etapas de recalentamiento se debe al aumento de la cantidad de calor recibida por el vapor en las etapas en las que la temperatura es más alta. A la salida de la primera etapa de expansión en la turbina de alta presión, el vapor es reconducido nuevamente al sistema de ganancia de calor, en este caso, se haría pasar nuevamente por una parte del circuito de captadores solares. Con esto se consigue que la entrada a la segunda parte de la expansión se realice con mayor temperatura, y por tanto, que a la salida haya mayor título de vapor, evitando así problemas de erosión en los últimos álabes de la turbina en dicha etapa. En lo referente al trabajo, para validar el efecto del recalentamiento y si un desempeño técnico-económico es necesario, se estudiará en una modificación de la aplicación ofimática la variación del título de vapor entre las opciones con recalentamiento y las opciones sin recalentamiento, tomando como criterio si la evaluación del aumento del mismo es suficiente como para favorecer lo más posible a los álabes.

• **Regeneración.** La transmisión de calor desde temperaturas bajas y temperaturas altas es la parte más desfavorable del ciclo termodinámico, y por tanto, el campo de captadores al realizar dicha función, será la etapa más desfavorable. Por tanto, el ciclo con regeneración permite la extracción de pequeñas cantidades de vapor de las turbinas a presiones intermedias que al mezclarse o intercambiar calor con el retorno del condensador permite aumentar la temperatura de entrada a los captadores. En la práctica industrial hay dos tipos de regeneradores: de mezcla (aireador) y de superficie. En el estudio, se presentarán distintas opciones de regeneración, categorizadas como *Alta* cuando se tengan incorporados los regeneradores por intercambiadores de superficie y el regenerador por mezcla, y *Baja* cuando solo se integre el de mezcla.

Gráfico 2. Ciclo de Rankine con recalentamiento.

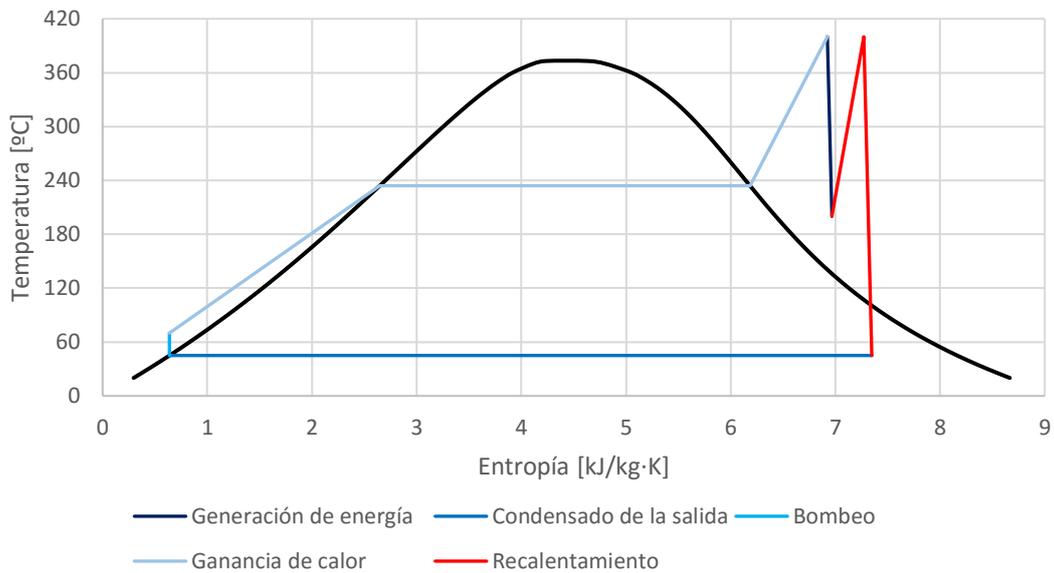
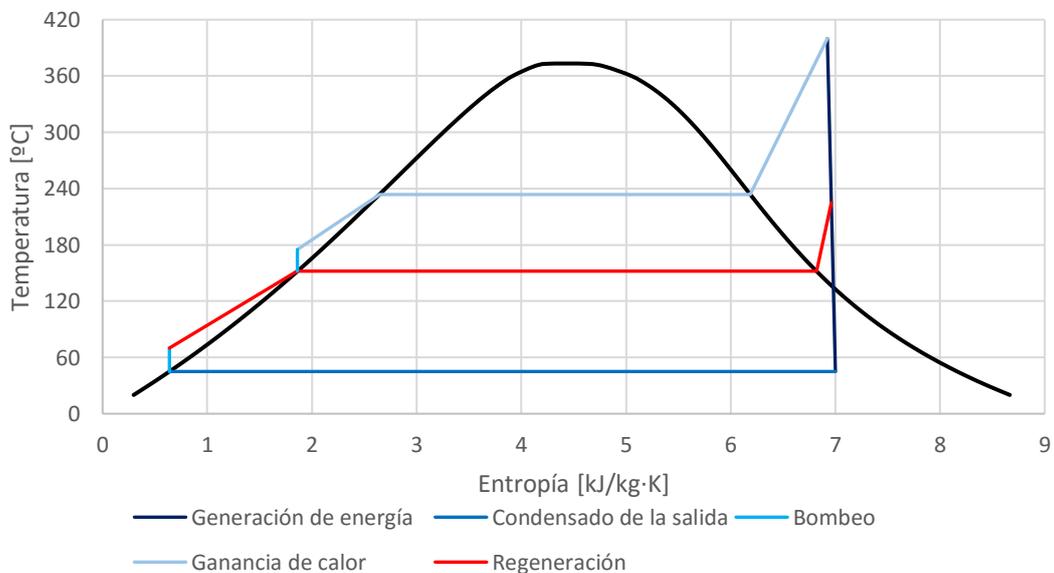


Gráfico 3. Ciclo de Rankine con regeneración.



1.4. CONTEXTO DEL TRABAJO

A la luz de una nueva actualidad en que la optimización del consumo energético es más que necesaria, se estudiará en los siguientes desarrollos y capítulos cómo una instalación de generación basada en tecnologías de energías renovables termosolares puede suplantar a una instalación de generación clásica con *fuel-oil*. El contexto propio de este trabajo se enmarca dentro de un supuesto pre-estudio de la sustitución de dicha planta. La empresa responsable únicamente tiene dominio sobre los criterios económicos, no sobre los técnicos; por lo que contactan con un ingeniero de la energía para que establezca el diseño de varias opciones y las condiciones de comparativa equitativa entre dichas opciones.

Para el caso estudiado, la planta origen será ubicada intencionadamente en una región de carácter aislado, de manera que hasta el momento de la decisión de estudio de reemplazamiento por termosolar, no se tiene otra capacidad de generación. De esta manera se crea, con fines académicos, el contexto idóneo para estudiar el funcionamiento de la planta origen, y posteriormente las posibles sustituciones, independientemente de cualquier conexión a la red eléctrica o la sujeción a los parámetros de maniobrabilidad que organismos como Red Eléctrica de España marcan para la distribución energética del recurso.

En esta situación ideal, se plantea ubicar el estudio en una región insular del territorio español, por varios motivos. El primero de ellos es la obtención de ese carácter independentista respecto a la red nacional, ya que las infraestructuras de conexión serían excesivas y dificultarían un enlace al sistema ibérico. El segundo, decidir la ubicación en un territorio insular permite aumentar el grado de disponibilidad del recurso solar, ya que por climatología, hay muchas más horas de sol en territorios como Canarias, en contra de climas sujetos a nubosidades como los del norte de España. Sin embargo, ya que se pretende crear un modelo virtual de las distintas opciones, puede realizarse esta comparativa, sin mucha índole académica más que la evidencia. Es por estos motivos, que la ubicación geográfica tomada para el estudio académico será la zona de la isla del Hierro, que además, cuenta con un historial de producción por energías renovables muy vanguardista.

En conclusión, el contexto de este trabajo es un supuesto encargo de estudio técnico de las distintas opciones de planta termosolar aptas para la sustitución de una central de generación por *fuel-oil* en un entorno aislado e insular, y su respectiva comparación equitativa; con el ánimo de que posteriormente la empresa que ha realizado el encargo pueda aplicar criterios económicos para la correspondiente decisión final. Cabe destacar que dado el carácter académico de este trabajo, tanto la empresa involucrada como la propia instalación origen con ficticias, y que los resultados obtenidos únicamente proporcionarán comparativas técnicas, no económicas.

Una vez se tienen definidas las cotas del trabajo, el procedimiento sucesivo será estudiar qué serie de parámetros, tanto técnicos como climatológicos, son los que afectan al desarrollo de la idea, del conjunto de ecuaciones y finalmente del modelo de la instalación. Para ello se presenta en los siguientes subapartados una serie de descripciones que enmarcan el contexto de la situación geográfica de la planta y de los equipos que componen la instalación.

1.4.1. Contexto geográfico de la instalación

Una vez ya se ha decidido la ubicación, se procede a la mención del conjunto de técnicas que permiten la obtención de datos climatológicos de la región, tales como temperatura ambiente, radiación incidente o humedad relativa; todos ellos parámetros que serán utilizados en los cálculos de diseño, tanto del ciclo de vapor como del circuito de captadores. El primer ítem a salvar para la obtención de estos datos es el acceso a una base de datos fiable y preferiblemente de uso gratuito. Para este caso, se empleará la misma referencia que se utilizó durante la asignatura *Eficiencia energética de edificios 4OE1* del grado de Ingeniería de la Energía. En dicha asignatura se empleaba el programa *EnergyPlus* para el cálculo de cargas térmicas en edificios gracias a una base de datos climatológicos de las distintas regiones del territorio español. Es a esta base de datos a la que nuevamente se requiere la referencia. Este conglomerado de datos se encuentra disponible en la página web del programa antes citado y han sido recopilados por el Departamento de Energía de Estados Unidos (U.S. Department of Energy). Con el debido tratamiento de estos ficheros se pueden conocer todos los datos climatológicos de la zona de las Islas Canarias, que serán muy parecidos a la fenomenología de la isla de El Hierro.

Gráfico 4. Temperatura ambiente a lo largo de un año para las Islas Canarias.

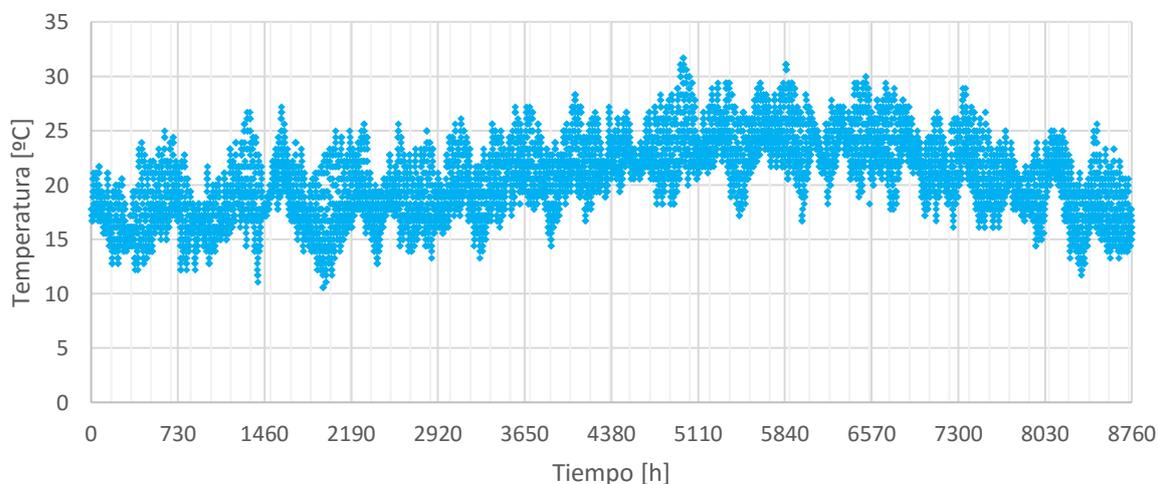
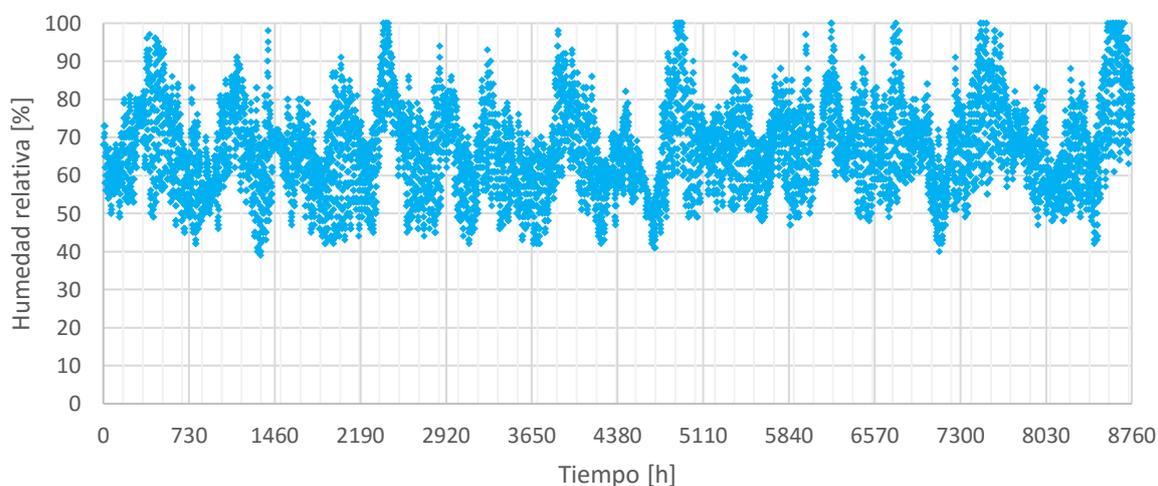
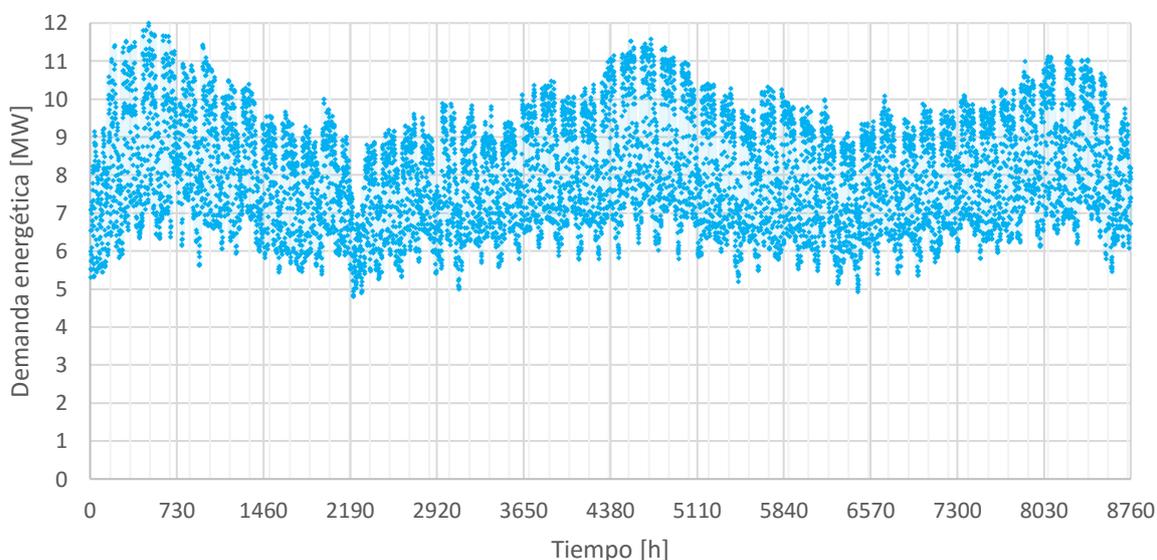


Gráfico 5. Humedad relativa ambiente a lo largo de un año para las Islas Canarias.



Sin embargo, el conocimiento de los datos del clima de las islas no es el único ítem representativo de la región en cuanto a índole energética se refiere. Además de la necesidad de conocer la temperatura ambiente, la radiación solar incidente o la humedad relativa, será crucial obtener un conocimiento del patrón de demanda de la isla. Sin embargo, el acceso a los datos de la demanda de energía eléctrica para el territorio español no es tan sencillo como la obtención de datos climatológicos, por lo que se debe recurrir a la simulación de estos datos. La emulación más efectiva sería por simetría, es decir, equiparar el nivel de demanda energética ibérica máximo para un año con el máximo de demanda que pueda tener la isla de El Hierro, que sí es un valor que se puede conocer. Actualmente, el mayor pico de demanda de la isla ronda los 12 MW, tal como se describe en las referencias indicadas sobre Red Eléctrica de España, por lo que el valor de potencia nominal de las distintas configuraciones estudiadas será de 12 MW. Por tanto, si se atiende a los datos de demanda del sistema ibérico que pueden ser encontrados en las referencias de la página web del operador del mercado, OMIE, ya se está en la disposición de concretar un escalado del comportamiento de la demanda de todo el sistema español, pero con el valor máximo establecido en la indicación antes comentada de la demanda máxima de la isla de El Hierro, asumiendo que el comportamiento de todo el sistema sea representativo de una zona de él, lo cual no es una hipótesis muy díscola.

Gráfico 6. Demanda de la isla de El Hierro obtenida por escalado.



Habiendo obtenido las distintas series de datos para los componentes que caracterizan la situación geográfica de la instalación, tanto a nivel climatológico como energético, ya se han establecido las variables de entrada al modelo que diferenciarán una hora de otra, y por tanto, se habrá dispuesto la variabilidad anual del comportamiento de la instalación, o al menos, el conjunto de datos que la produce.

1.4.2. Contexto técnico de la instalación

Dentro de este apartado se pretende la definición del conjunto de equipos que compondrán la instalación. Se presentarán por tanto sistemas relativos a la central y a la parte de producción de energía, como a la parte de ganancia de calor del ciclo.

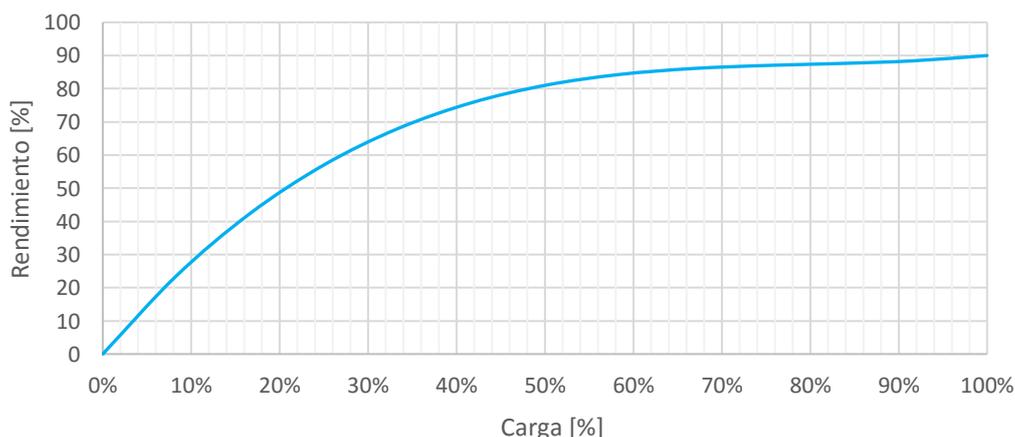
El primer elemento que se pretende definir es la turbina. El equipo de turbinado es el responsable de transformar la energía térmica del vapor que lo atraviesa en energía cinética a un eje que estará unido al generador eléctrico. Si bien se está realizando un estudio académico, los valores tomados en el tratamiento de los distintos equipos serán extraídos por analogía a la realidad o de catálogos reales. En este caso, para el orden de magnitud de la potencia tomada, se ha identificado un modelo por parte del proveedor *Chakravarti Energy Equipments* que se ajusta al rango de potencia decidido, del catálogo del cual se tomará el orden de magnitud de las características de entrada al equipo:

Tabla 1. Catálogo de la turbina seleccionada.

Capacidad [MW]	14.6	Tensión [kV]	6.6
Fabricación	Francia	Frecuencia [Hz]	50
Tipo	Condensación con extracción controlada	Régimen giro [RPM]	1500
		Presión entrada [bar]	31
Régimen giro [RPM]	6800	Temp. entrada [°C]	400

No obstante, este conjunto de datos de catálogo de la turbina no es suficiente para la modelización de la misma. Resta conocer un parámetro crucial, que es el comportamiento del rendimiento de la turbina respecto de la carga. Si bien no se puede obtener del catálogo, el proceso respectivo es la modelización del mismo. Es conocido que el rendimiento de la turbina es aproximadamente el nominal cuando se trabaja a carga total, y que disminuye lentamente (10%) hasta parámetros de trabajo a mitad de carga. Sin embargo, cuanto más se reduce la carga desde la mitad de la misma, el rendimiento empeora con mayor rapidez, hasta ser nulo cuando la carga también lo es. Dicho comportamiento se tendrá en cuenta a la hora del estudio matemático del modelo, pero puede visualizarse en la gráfica inferior.

Gráfico 7. Comportamiento del rendimiento de la turbina con la carga.



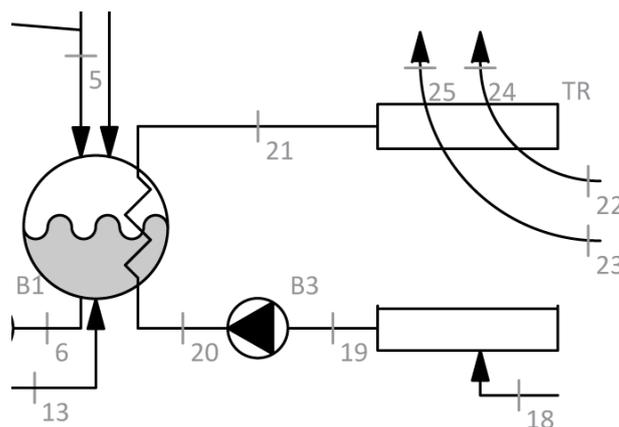
Seguidamente, otro de los principales equipos de la central es el sistema de soporte, identificado con una caldera de *fuel-oil*, que empleará la combustión de dicho combustible para la ganancia de calor en los momentos en que el aporte solar no sea suficiente (noches o días nublados).

Por una parte es recomendable destacar que el modelado de un sistema de esta índole es limitado por la necesidad, es decir, dado que se van a producir consumos diferidos respecto a las posibilidades de recurso solar, se pretende que mediante un modelado del conjunto cámara de combustión e intercambiador de calor se tenga acceso a dicha cobertura diferida. Para esta labor en un primer momento se tomará que en los casos en los que no se consuma de manera diferida y haya excedente de temperatura a la salida del campo de captadores, el sistema de soporte no será útil, pero seguirá existiendo un excedente que se ha de gestionar. La gestión de este excedente se corresponde con una revisión de la energía aportada por el campo de captadores, es decir, que el gasto de fluido caloportador por el circuito termosolar sea mayor que el gasto turbinado cuando se prevea un excedente, y enviar dicho excedente mediante un expansor al condensador. Es decir, elaborar un *bypass* entre la entrada del sistema de soporte y el condensador, cuyo gasto será nulo cuando no se perciba excedente de calentamiento solar.

Posteriormente, el sistema de intercambio de calor a contracorriente entre los humos de la caldera y la entrada a la turbina será modelado teniendo en cuenta que la temperatura de salida de humos y salida del campo de captadores estarán relacionadas mediante una diferencia de temperaturas, que acostumbra a ser un valor de 15 °C. De la misma manera, se pretenderá que la salida de los humos no baje de cierto nivel térmico, ya que de lo contrario se podría producir efectos de corrosión ácida y sería requerido un sistema de tratamiento de humos. Finalmente, se obtendrá un valor de consumo de combustible que podrá ser cotejado con los valores de consumo del sistema original, y que por tanto permitirá una comparativa de índole económica (respecto a precios de combustible) muy útil de cara a estados posteriores como implantación de criterios de la inversión o estudio económico.

Otro de los posibles equipos sujetos a comentario es el sistema de condensación. En una central de generación energética, el condensador es el equipo que se encarga de absorber el calor de la mezcla de vapor-líquido que sale de la turbina para conseguir un flujo líquido que sea apto para la impulsión y la ganancia de calor del ciclo. De poder tener mayor conocimiento de la orografía, sería importante considerar un condensador por agua de río o de mar, pero dado que se desconoce exactamente la localización, la mejor opción es considerar el sistema basado en una torre de refrigeración.

Esquema 1. Detalle de la torre de refrigeración del esquema general de la instalación.



El sistema de condensación en la modalidad indicada se trata de aprovechar el calentamiento del aire ambiente y la consiguiente evaporación de la humedad del aire atmosférico mediante el intercambio de calor con gotas del refrigerante del condensador (agua) que son dispersadas en la torre para favorecer el intercambio de calor, que posteriormente se recogen enfriadas y se envían de vuelta al condensador para absorber el calor cedido por la salida de la turbina. Es lógico pensar que este mecanismo requiere de mucha cantidad de fluidos de intercambio de calor, tanto refrigerante como aire, y de ahí la envergadura de los sistemas de esta configuración, visibles a varias decenas de kilómetros. De hecho, es tan crucial la interpretación de estos gastos que tanto en la mayoría de casos de la realidad, como en el modelo empleado, son datos que están fijados, y en función de las condiciones ambientales y de la demanda energética, la variabilidad se dará en la presión del condensador. Otra característica a comentar de este equipo es que para el orden de magnitud de la potencia nominal de la instalación, el tiro será realizado de manera natural, que aprovecha la diferencia de densidades del aire. De la misma manera que se interpreta la fijación de los gastos de aire y refrigerante, se han de considerar ciertas hipótesis en cuanto a la operatividad de la misma torre.

Gráfico 8. Hipótesis tomadas en el sistema de condensación.

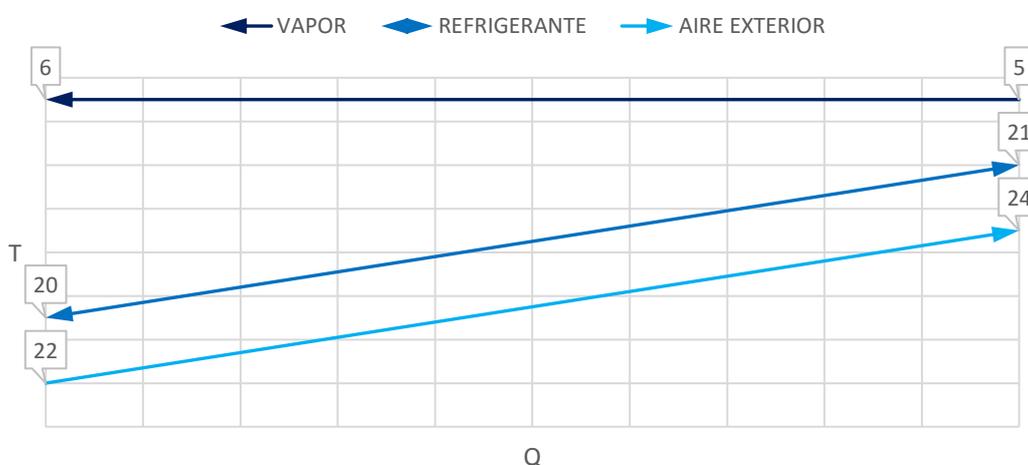


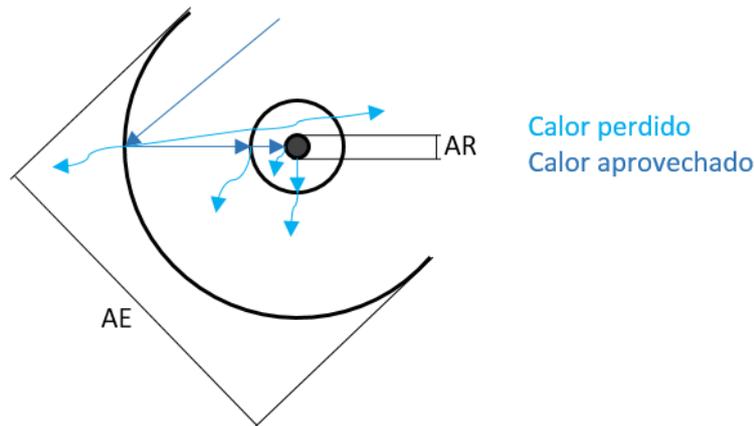
Tabla 2. Hipótesis tomadas en el sistema de condensación.

$\Delta T(20; 21) = 7 - 10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T(21; 24) = 3 - 5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta T(5; 21) = 3 - 5 \text{ }^\circ\text{C}$	$HR_{\text{Salida}} = 100\%$
--	---	--	------------------------------

De este conjunto de hipótesis se hace destacable comentar que la concepción de la saturación de la humedad relativa a la salida de la torre es la interpretación de la máxima absorción de calor por parte del aire ambiente, es decir, puede absorber calor hasta que se sature. Además, la diferencia de temperaturas que se visualiza entre el condensador y la salida del refrigerante es un parámetro que ayuda a la concepción de la calidad del equipo: cuanto menos sea la diferencia de temperatura, mayor será la calidad del condensador. Finalmente, la interpretación que se le otorga a la diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del refrigerante es el establecimiento de la operatividad del condensador. Dentro de la normalidad, el parámetro comentado no debería de variar demasiado, y siempre rondar alrededor de los $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Finalmente, tal como se aprecia en el esquema número 1, el condensador también cumple la función de absorber el excedente de fluido caloportador que se deriva por el *bypass*, ya que en muchos casos, no se prevé que sea un gasto excesivamente elevado.

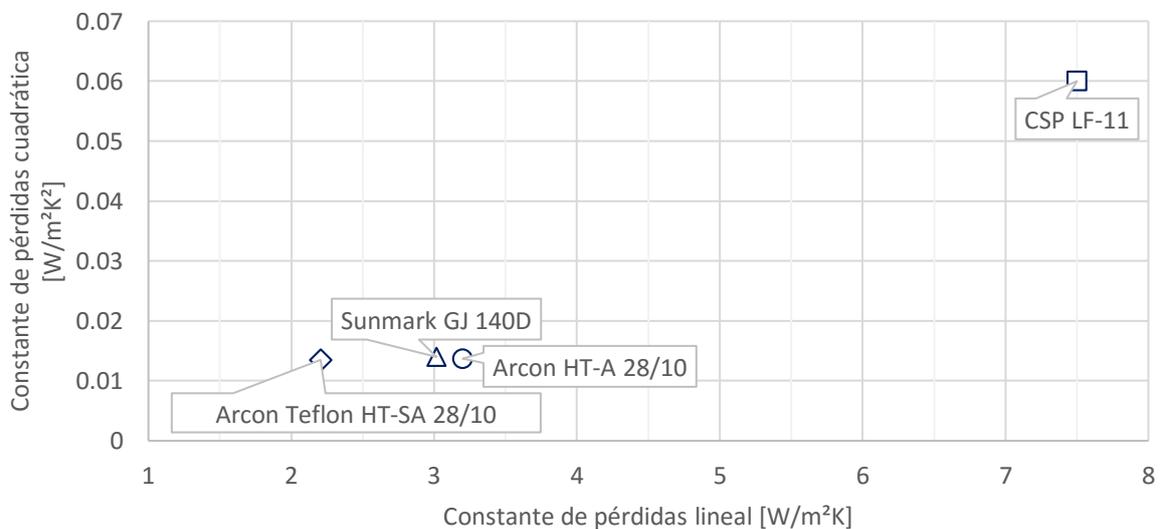
Por último, pero desde luego no menos importante, se hace evidente el destacar la serie de consideraciones relativas al medio de absorción de calor principal: los captadores solares. Cualquier modelo de captador solar de foco distribuido puede resumirse en tres parámetros de funcionamiento (además de los dimensionales): rendimiento óptico, constante de pérdidas lineales y constante de pérdidas cuadráticas. Por tanto, los parámetros clave para poder realizar una comparativa entre modelos, en base a la calidad de los mismos y su comportamiento respecto a las pérdidas de calor quedarán definidos por la conjunción de estos tres ítems.

Esquema 2. Perfil esquemático de un captador solar.



Así pues, y tal como se indica en el esquema superior, será necesario interpretar pérdidas por desenfoque y suciedad del heliostato (rendimiento óptico), pérdidas por convección y conducción (término lineal) y pérdidas por radiación (término cuadrático). El rango comercial de captadores estará definido por tanto por los distintos rangos de esta serie de variables. Siguiendo las ideas mostradas en el gráfico 9, el rango de la constante de pérdidas lineal se encierra en torno a 1.5 y 7.5 W/m^2K ; mientras que el término de pérdidas cuadrático se da desde 0.01 hasta 0.06 W/m^2K^2 . Por su parte, el rango de rendimiento óptico es mucho más amplio, pero la aplicación del trabajo favorece la limitación en un rango entre el 90% y el 50%.

Gráfico 9. Muestra de la distribución comercial de modelos.



Es perceptible que existe una discontinuidad en el rango comercial de los captadores, y esto se debe a que la mayoría de las referencias encontradas disponen un modelo de captador que se utiliza en pruebas piloto o investigación, pero no quita la validez en el estudio de otro tipo de captadores, de menor calidad, no utilizados con tanta frecuencia.

Otro ítem a considerar en cuanto a la variabilidad del trío de parámetros es la distinción entre captadores cilindroparábolicos y los de tipo Fresnel. Entre dos listas de las tres variables no se puede efectuar una distinción entre las dos configuraciones, ya que con los tres ítems comentados, es realizable la interpretación de ambos tipos de captadores. Si bien es cierto que los captadores tipo Fresnel son generalmente de menor calidad y puedan ser identificables por un menor rendimiento óptico, no es un criterio general, teniendo que considerar la identificación del tipo de modelo con la comprobación del catálogo.

Generalmente, con los parámetros indicados, el parámetro geométrico del factor de concentración (relación entre el área del heliostato y la del receptor) y un valor de intensidad de la radiación solar se puede obtener un juicio sobre el rendimiento del captador solar, entre la entrada y salida del mismo, si se tiene en cuenta la variabilidad de la temperatura de absorción de calor en el seno del mismo, y este será uno de los parámetros objetivos del estudio matemático de los captadores solares.

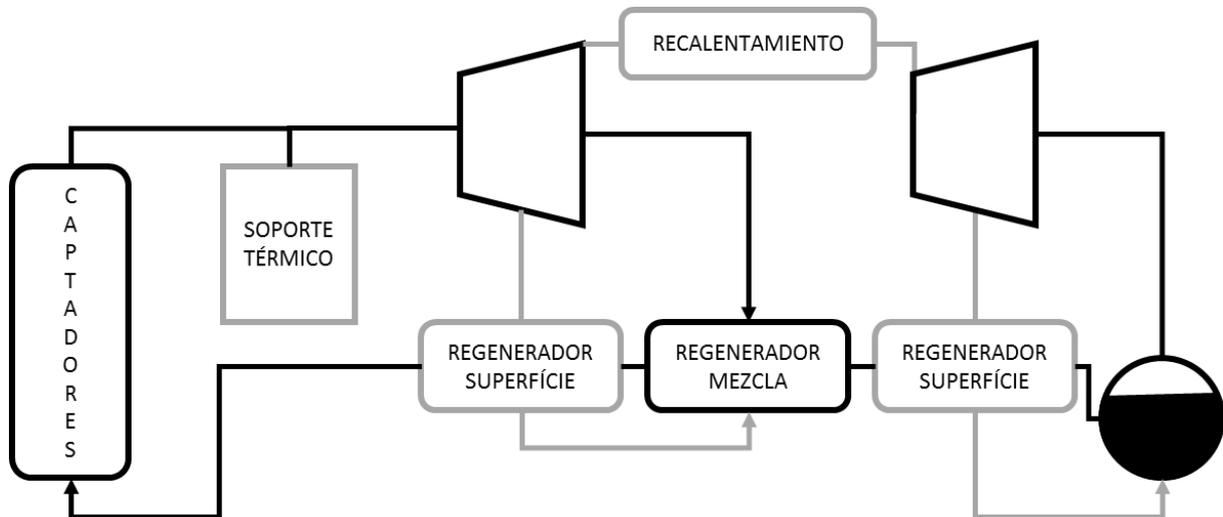
No obstante, no se debe dejar de lado la interpretación de la superficie de captación, puesto que será un parámetro muy útil en la comparativa de las distintas configuraciones, y además, puede ser uno de los grandes factores de juicio en el apartado de estudio económico, posterior a este estudio técnico. Por tanto, la definición del campo de captadores se rige por la interpretación de un rendimiento óptico, una constante de pérdidas lineal, una constante de pérdidas cuadrática y un valor de dimensiones del campo de captadores.

En conclusión, el apartado técnico de la central se compone de cuatro ítems propensos de ser estudiados en mayor profundidad que el resto de apartados: turbina, caldera de soporte, sistema de condensación y campo de captadores. En el apartado de desarrollo matemático se volverá a tomar esta distinción entre producción de potencia, soporte por consumo diferido, refrigeración del ciclo y sistema de ganancia de calor, respectivamente.

1.5. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

De la multiplicidad de opciones de tecnología termosolar que se interpretarán en el estudio, todas coinciden en la necesidad de un ciclo de vapor, estilo ciclo de Rankine, para la generación de potencia. Visto de otro modo, se pretende interpretar las distintas posibles tecnologías como módulos que se pueden anexionar a una misma configuración de ciclo (tal como muestra el esquema inferior), la cual será dotada de distintas modalidades de operación mediante elementos de valvulería, por ejemplo.

Esquema 3. Metodología del ciclo de vapor.



Con el esquema superior se pretende poner de manifiesto la versatilidad del modelo matemático que se desarrollará. La metodología se basa en el estudio modular de los distintos componentes técnicos del ciclo: parte de potencia, parte de ganancia de calor, parte de refrigeración, etc. Por tanto, el conjunto de ecuaciones matemáticas que se van a plantear en el siguiente capítulo deberán de ser capaces de obtener resultados tomando como partida la solución de otro conjunto de ecuaciones. Por ejemplo, la parte del gasto de vapor en el condensador será consecuencia del grado de ganancia de calor en el campo de captadores, dado el posible excedente de calor comentado; del gasto de vapor necesario para la producción de cierto nivel de demanda, y además de la cantidad de vapor extraído para la regeneración por el intercambiador de superficie de la parte de baja presión. La interpretación de este conjunto de ítems, en el módulo matemático del condensador aportará un valor de calor cedido al sistema de refrigeración, y el sistema de refrigeración deberá operar matemáticamente de manera independiente a los otros módulos, pues el parámetro que requiere para funcionar sus variables es el calor cedido.

Esta metodología de ecuaciones modular separará por tanto el estudio en una parte de situación termodinámica del sistema de potencia con el respectivo balance de masas y energía, un apartado de estudio del sistema de condensación, una sección de desarrollo del campo de captadores y una parte de estudio del sistema de soporte y su operación.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE LOS MODELOS

MATEMÁTICOS

2.1. ESQUEMA Y PUNTOS TERMODINÁMICOS

El primer ítem a tener en cuenta para el abordaje de los sistemas matemáticos será la concepción y visualización del esquema planteado que distribuye los equipos de la instalación y permite la imposición de la situación de los puntos termodinámicos de interés. Dicho esquema se plantea en la página siguiente con mayor resolución.

Pese a que se vaya a estudiar la posible interpretación de la configuración con recalentamiento, no se ha plasmado en el esquema final de la instalación, puesto que la única configuración que se debe de hacer es que la temperatura de entrada de a la turbina de baja presión se realiza a una temperatura superior que la que se daría en el caso sin recalentamiento, y esto es un ítem que no tiene que estar representado en el esquema de la instalación, que presumiblemente no dará uso del recalentamiento como posteriormente se demostrará.

En respuesta a las distintas modificaciones que se van a sugerir para la evaluación de las respuestas termodinámicas de los elementos como recalentamiento y regeneración, se tendrá para las distintas opciones que:

- Cuando se reduzca el nivel de regeneración, los caudales por los puntos 11 y 15 serán iguales a cero, y por ende, también los de los puntos 12, 13, 16 y 17.
- Cuando se emplee el estudio del recalentamiento, se entenderá que la entrada a la turbina de baja presión se realiza a una temperatura mayor que la del punto 14 de salida de la turbina de mayor presión.
- Cuando se anule completamente el efecto de la regeneración, el caudal extraído en 14 será nulo, por lo que la bomba B2 dejará de actuar y los puntos 6, 7, 8 y 9 representarán el mismo estado termodinámico, añadiendo los efectos de las modificaciones antes comentadas.

Una consideración añadida al tratamiento del esquema es que en la aplicación ofimática se ha desarrollado una versión más amplia y con mucho más espacio entre los distintos ítems, para poder favorecer la identificación de las variables relativas a los distintos puntos, por lo que el esquema que aparece en la siguiente página, como muestra de la instalación, solo está presente en este documento, así que el responsable económico posterior que vaya a utilizar la aplicación, si no encuentra una manera fácil de visualizar el ciclo, deberá recurrir a este documento.

2.2. ESTADOS TERMODINÁMICOS

Para poder realizar una aproximación a la evolución del estado termodinámico representado por el fluido caloportador en este caso, se hacen necesarias una serie de consideraciones representadas en las siguientes líneas.

En un primer momento se plantea el análisis de las extracciones y salidas de las turbinas. Para el análisis se ha considerado la variabilidad del rendimiento de las turbinas respecto de la carga, y que por tanto, no se produce ninguna especie de proceso isentrópico entre un punto conocido de la turbina y la siguiente extracción o salida. Para analizar por tanto este caso es necesario saber cuáles serán las presiones de cada uno de los puntos a analizar. Tras esto, el análisis permitirá averiguar desde un estado conocido el estado termodinámico de cada punto. Tomando como ejemplo el paso del punto 3, cuyas condiciones con conocidas pues vienen impuestas por el catálogo de la turbina, se podrá conocer el estado de 15, y así sucesivamente. Lo primero que se ha de reconocer es un estado ideal, 15', que tendrá la misma entropía que el punto 3. Sabiendo por tanto la entropía del punto 15' y la presión, se pueden conocer el resto de variables termodinámicas, en especial la entalpía. Con el conocimiento de la entalpía del punto ideal y el rendimiento de la turbina, puede añadirse la siguiente ecuación:

$$h_{15} = h_3 - \eta_{T1} \cdot (h_3 - h_{15'}) \quad [\text{Ec. 1}]$$

De esta manera se tendría conocimiento de la entalpía real del punto consecutivo, y conociendo además la presión del mismo, definida por la presión de extracción, pueden hallarse el resto de variables termodinámicas. En adición, el resto de ecuaciones que permiten la evaluación de estos procesos son:

$$h_{14} = h_{15} - \eta_{T1} \cdot (h_{15} - h_{14'}) \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$h_{11} = h_{14} - \eta_{T2} \cdot (h_{14} - h_{11'}) \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$h_5 = h_{11} - \eta_{T2} \cdot (h_{11} - h_{5'}) \quad [\text{Ec. 4}]$$

En las sucesivas eliminaciones de regeneradores de superficie, se tendrá que la ecuación 1 no es de utilidad, y que por tanto, en la ecuación 2 se tomará el desnivel entre el punto 3 y el punto 14. De la misma manera ocurriría con los puntos 14 y 5; y posteriormente, al eliminar todo efecto de la regeneración, se tomaría una única ecuación entre el punto 3 y el punto 5, semejante a las descritas.

Con el conocimiento de los primeros puntos del ciclo se hace necesaria la evaluación del efecto del condensador. En este elemento el vapor extraído de la salida de la turbina pasa a ser una corriente de líquido para poder ser impulsada por las bombas hasta las presiones superiores. Por tanto, la relación entre el estado 5 y el estado 6 será que la entalpía del estado 6 es la correspondiente a la entalpía de líquido saturado de la temperatura del punto 5. Además, entre el estado 5 y el 6 se produce un aumento del gastos, pues es estado 6 representa la salida del condensador, lo que impone que se añada a la corriente del estado 5 los caudales de los estados 4 y 13. Finalmente se debe destacar que la interpretación de la presión de condensación no es un ítem fijo, ya que depende de las condiciones ambientales al fijar los caudales de refrigerante y aire exterior, pero su tratamiento se reserva para el desarrollo de la torre de refrigeración.

Posteriormente se alzaría al nivel de presión del punto 6 hasta la presión del regenerador de mezcla mediante el uso de una bomba, que dado el bajo nivel entrópico con el que se opera, puede considerarse una transformación isentrópica. Es decir, que el conocimiento de las variables termodinámicas del estado 7 viene proporcionado por el conocimiento de la entropía, igual a la del punto 6, y de la presión del mismo, que es la presión del punto 14.

En consecuencia, el tratamiento del regenerador de superficie entre los puntos 7, 8, 11 y 12 conlleva la interpretación de la siguiente hipótesis: la salida del intercambiador, por parte de la corriente de extracción será líquido saturado, a la presión de dicha extracción. Además, se interpretará como hipótesis adicional que entre la salida de dicha corriente y la salida de la corriente de líquido existe un desnivel de 5 °C, es decir, la corriente de líquido se calienta a presión constante hasta 5 °C por debajo de la salida del intercambiador de la extracción. Como se puede apreciar, la salida de la extracción se ha de enviar mediante una expansión isoentálpica, para equilibrar el nivel de presión, a un estado termodinámico inferior. Para el caso del primer regenerador de superficie será enviada al condensador, y para el segundo, que mantiene las hipótesis planteadas, será enviada al regenerador de mezcla, a la presión de la extracción del punto 14.

Seguidamente, el tratamiento del regenerador de mezcla impulsa al conocimiento de su implantación. La utilidad de este tipo de regeneradores va más allá de la regeneración por intercambiadores de superficie. Este tipo de regeneradores permite completar la desgasificación comenzada en el condensador mediante la imposición de un circuito de bandejas, y ocupa la posición central en la distribución de los regeneradores. Solo se incluye un regenerador de mezcla por planta de generación ya que su implantación implica el uso de una bomba y por ende, de un pozo de condensados para evitar la cavitación de la misma. Es con este criterio que respecto a ecuaciones, la salida de este elemento será tomada como líquido saturado a la presión de la extracción, aunque la utilidad de esta consideración será evaluada en el apartado de balance de masas y energía.

Finalmente, el análisis de los puntos termodinámicos se completa con una nueva etapa de bombeo, cuyo comportamiento ya ha sido comentado anteriormente; y con un regenerador de superficie, que también ha sido comentado, llegando a la descripción del estado termodinámico del punto 1.

No obstante, entre el punto 1 y el punto 2 se tiene localizado el campo de captadores, y aunque su tratamiento se reserva para un apartado posterior, es necesario destacar cómo se obtiene el conocimiento del estado del punto 2. Para ello se hace necesario conocer el rendimiento del campo de captadores, interpretado como el porcentaje de energía que se absorbe en el circuito de captación respecto el total que se recibe por la superficie de captación:

$$\dot{Q}_{\text{Sol}} = \dot{m}_2 \cdot (h_2 - h_1) \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$h_2 = \frac{I_{\text{Sol}} \cdot A_{\text{Espejo}} \cdot \eta_{\text{Óptico}}}{\dot{m}_2} + h_1 \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$A_{\text{Espejo}} = FC \cdot d \cdot L \quad [\text{Ec. 7}]$$

Tabla 3. Estados termodinámicos.

Punto	Gasto	Presión	Temper.	Entalpía	Entropía	Estado	Título
1	\dot{m}_1	p_1	T_1	h_1	s_1	Líquido	0
2	\dot{m}_1	p_1	T_2	h_2	s_2	Vapor-Mezcla	0 – 1
3	\dot{m}_3	p_3	T_3	h_3	s_3	Vapor	1
4	$\dot{m}_3 - \dot{m}_1$	p_5	T_4	h_2	s_4	Vapor-Mezcla	0.9 – 1
5'	$\dot{m}_3 - \sum_{Ext} \dot{m}_i$	p_5	$T_{5'}$	$h_{5'}$	s_{11}	Mezcla	0.85 – 0.9
5	$\dot{m}_3 - \sum_{Ext} \dot{m}_i$	p_5	T_5	h_5	s_5	Mezcla	0.85 – 0.9
6	$\dot{m}_5 + \dot{m}_{11} + \dot{m}_4$	p_5	T_6	h_6	s_6	Líquido Sat.	0
7	$\dot{m}_3 + \dot{m}_4$	p_{14}	T_7	h_7	s_6	Líquido	0
8	$\dot{m}_3 + \dot{m}_4$	p_{14}	$T_{12} + 5 \text{ }^\circ\text{C}$	h_8	s_8	Líquido	0
9	\dot{m}_1	p_{14}	T_9	h_9	s_9	Líquido Sat.	0
10	\dot{m}_1	p_1	$T_{16} + 5 \text{ }^\circ\text{C}$	h_{10}	s_9	Líquido	0
11'	\dot{m}_{11}	p_{11}	$T_{11'}$	$h_{11'}$	s_{14}	Vapor-Mezcla	0.9 – 1
11	\dot{m}_{11}	p_{11}	T_{11}	h_{11}	s_{11}	Vapor-Mezcla	0.9 – 1
12	\dot{m}_{11}	p_{11}	T_{12}	h_{12}	s_{12}	Líquido Sat.	0
13	\dot{m}_{11}	p_{14}	T_{13}	h_{12}	s_{13}	Mezcla	0.05 – 0.15
14'	\dot{m}_{14}	p_{14}	$T_{14'}$	$h_{14'}$	s_{15}	Vapor	1
14	\dot{m}_{14}	p_{14}	T_{14}	h_{14}	s_{14}	Vapor	1
15'	\dot{m}_{15}	p_{15}	$T_{15'}$	$h_{15'}$	s_3	Vapor	1
15	\dot{m}_{15}	p_{15}	T_{15}	h_{15}	s_{15}	Vapor	1
16	\dot{m}_{15}	p_{15}	T_{16}	h_{16}	s_{16}	Líquido Sat.	0
17	\dot{m}_{15}	p_5	T_{17}	h_{16}	s_{17}	Mezcla	0.05 – 0.15

En adición a estas ecuaciones, únicamente es restante el comentario sobre los estados de las variables termodinámicas del punto 4. Si bien el tratamiento del gasto se reserva para el apartado siguiente, es considerablemente oportuno indicar el procedimiento para obtener valores de este punto. Dicho punto se halla a la salida de una válvula, elemento que ha sido considerado isoentálpico en el discurso. Por tanto, el punto 4 tendrá la misma entalpía que el punto 2, sin embargo, a la presión del condensador en el que se vierte, pues se debe cumplir la igualdad de presiones en procesos de mezcla, tal como es el caso.

A término de este análisis, se habrán obtenido las distintas variables termodinámicas de los puntos 1 a 17 (visible en la tabla 3), restando para el apartado siguiente la evaluación de los caudales que son necesarios para proporcionar la demanda energética necesaria impuesta de manera externa.

2.3. BALANCE DE MASAS Y ENERGÍA

Si como resultado del apartado anterior se tienen las distintas variables termodinámicas, será objetivo de este apartado encontrar las ecuaciones, mediante balances de masas y energía, que permitan el hallazgo de los gastos que se dan en cada uno de los puntos de la tabla 3.

En un primer momento se impone la condición de cálculo del caudal que circula por los captadores, es decir, \dot{m}_1 de manera que con un par de condicionantes, su cálculo sea preciso. Para comenzar, en el caso en el que la entalpía de la salida del campo sea igual o menor a la entalpía de entrada a la turbina fijada por catálogo:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_3 \quad [\text{Ec. 8}]$$

$$\text{SI} \rightarrow \frac{A_{\text{Espejo}} \cdot I_{\text{Sol}} \cdot \eta_{\text{Campo solar}}}{\dot{m}_3} + h_1 \leq h_3 \quad [\text{Ec. 9}]$$

Por el contrario, en los casos en que se produzca excedente calórico a la salida del campo de captadores, dicho gasto deberá aumentar para que como máximo se tengan las variables termodinámicas correspondientes al estado de entrada de la turbina. Es decir, en caso de que la entalpía del punto 2 sea mayor que la de entrada a la turbina se tendrá la siguiente expresión:

$$\dot{m}_1 = \frac{A_{\text{Espejo}} \cdot I_{\text{Sol}} \cdot \eta_{\text{Campo solar}}}{h_3 - h_1} \quad [\text{Ec. 10}]$$

$$\text{SI} \rightarrow \frac{A_{\text{Espejo}} \cdot I_{\text{Sol}} \cdot \eta_{\text{Óptico}}}{\dot{m}_3} + h_1 > h_3 \quad [\text{Ec. 11}]$$

Aunque estas expresiones sean las correctas, resta conocer efectivamente el valor que tendrá en tal caso el gasto por el punto 3. Para tal labor se emplearán balances de masa y energía atendiendo al efecto que pueda producir el punto 4 y su gasto respectivo. Por tanto, el primer paso para esta consideración sería la interpretación de dicho gasto adicional que se efectúa por el *bypass*. Es obvio que será nulo cuando no haya excedente, es decir, cuando se cumpla la condición de la ecuación 9. Sin embargo, en el momento que se requiera aumentar el gasto por el campo de captadores, la descripción del gasto por el punto 4 será la siguiente:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_1 - \dot{m}_3 \quad [\text{Ec. 12}]$$

Con la ecuación 12, también se valida la condición de anulación antes descrita, y por tanto será la ecuación que rijan globalmente el comportamiento del gasto por el punto 4.

Seguidamente, será necesaria la toma de una serie de ecuaciones que permitan la relación de los caudales desconocidos. Para ello, se comenzará con el balance a volumen de control encerrado por los grupos generadores de las turbinas, interpretando las salidas y las entradas de la misma:

$$\frac{P_{\text{Demanda}}}{\eta_{\text{Elect}}} = \dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_{11} \cdot h_{11} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} - \dot{m}_{11} \cdot h_{11} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_5 \cdot h_5 \quad [\text{Ec. 13}]$$

Con la intención situada en la ecuación 13, es considerable el planteamiento consecutivo de cuatro ecuaciones que permitan la elaboración de un sistema de cinco incógnitas (identificadas con los gastos) y las respectivas cinco ecuaciones de resolución. En un primer momento se tratará de identificar la ecuación que relaciona los caudales, despejando uno de ellos en función del resto:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_3 - \dot{m}_{11} - \dot{m}_{14} - \dot{m}_{15} \quad [\text{Ec. 14}]$$

Ahora, con esta relación, la clave de resolución del sistema pasa por la elaboración de los distintos balances aplicados a los elementos regeneradores. Elaborando dichos balances se llega al siguiente conjunto de ecuaciones:

$$0 = (\dot{m}_3 - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{14}) \cdot h_8 + \dot{m}_{11} \cdot h_{12} - (\dot{m}_3 - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{14}) \cdot h_7 - \dot{m}_{11} \cdot h_{11} \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$0 = \dot{m}_3 \cdot h_9 - (\dot{m}_3 - \dot{m}_{15} - \dot{m}_{14}) \cdot h_8 - \dot{m}_{15} \cdot h_{17} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$0 = \dot{m}_3 \cdot h_1 + \dot{m}_{15} \cdot h_{16} - \dot{m}_3 \cdot h_{10} - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} \quad [\text{Ec. 17}]$$

En consecuencia de la elaboración de este sistema de cinco ecuaciones (cuatro si se cuenta la integración de la ecuación 14) conduce a su propia resolución, resultando por tanto las siguientes ecuaciones:

$$\dot{m}_3 = \frac{-((-h_{15} + h_{16})(-h_{14} + h_8) \left(-\frac{100 \cdot (-h_{11} + h_{12}) P_{\text{Demanda}}}{\eta_{\text{Elec}}}\right))}{\begin{aligned} &(-h_{11} - h_{10})((-h_{11} + h_{12})(h_{15} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_{14} + h_8) - \\ &((-h_{11} + h_{12})(h_{14} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_{17} + h_8) + \\ &(-h_{15} + h_{16})(-h_{14} + h_8) \left(-(-h_{11} + h_{12})(-h_3 + h_5) + (h_{11} - h_5)(-h_7 + h_8)\right) - \\ &((-h_{11} + h_{12})(h_{14} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_8 + h_9) \end{aligned}} \quad [\text{Ec. 18}]$$

$$\dot{m}_{15} = \frac{((h_1 - h_{10})((-h_{15} + h_{16})(-h_{14} + h_8) \left(-\frac{100 \cdot (-h_{11} + h_{12}) P_{\text{Demanda}}}{\eta_{\text{Elec}}}\right) \right))}{\begin{aligned} &((-h_{15} + h_{16})(-h_{11} - h_{10})((-h_{11} + h_{12})(h_{15} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_{14} + h_8) - \\ &((-h_{11} + h_{12})(h_{14} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_{17} + h_8) + \\ &(-h_{15} + h_{16})(-h_{14} + h_8) \left(-(-h_{11} + h_{12})(-h_3 + h_5) + (h_{11} - h_5)(-h_7 + h_8)\right) - \\ &((-h_{11} + h_{12})(h_{14} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_8 + h_9) \end{aligned}} \quad [\text{Ec. 19}]$$

$$\dot{m}_{14} = \frac{(-h_8 - \frac{(h_1 - h_{10})(-h_{17} + h_8)}{-h_{15} + h_{16}} + h_9)((-h_{15} + h_{16})(-h_{14} + h_8) \left(-\frac{100 \cdot (-h_{11} + h_{12}) P_{\text{Demanda}}}{\eta_{\text{Elec}}}\right) \right)}{\begin{aligned} &((-h_{14} + h_8)(-h_{11} - h_{10})((-h_{11} + h_{12})(h_{15} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_{14} + h_8) - \\ &((-h_{11} + h_{12})(h_{14} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_{17} + h_8) + \\ &(-h_{15} + h_{16})(-h_{14} + h_8) \left(-(-h_{11} + h_{12})(-h_3 + h_5) + (h_{11} - h_5)(-h_7 + h_8)\right) - \\ &((-h_{11} + h_{12})(h_{14} - h_5) + (h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_8 + h_9) \end{aligned}} \quad [\text{Ec. 20}]$$

$$\dot{m}_{11} = \frac{\begin{aligned} &((h_{14} h_3 - h_{14} h_5 + h_{14} h_8 - h_3 h_8 - \frac{(h_1 - h_{10})(-h_{17} h_5 + h_{14}(-h_{15} + h_{17} + h_5 - h_8) + h_{15} h_8)}{-h_{15} + h_{16}} - h_{14} h_9 + h_5 h_9) \cdot \\ &(-h_{15} + h_{16})(-h_{14} + h_8) \left(-\frac{100 \cdot (-h_{11} + h_{12}) P_{\text{Demanda}}}{\eta_{\text{Elec}}}\right) \end{aligned}}{\begin{aligned} &((h_{11} - h_5)(-h_{14} + h_8)(-h_{11} - h_{10})((-h_{11} + h_{12})(h_{15} - h_5) + \\ &(h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_{14} + h_8) - (-h_{11} + h_{12})(h_{14} - h_5) + \\ &(h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_{17} + h_8) + (-h_{15} + h_{16})(-h_{14} + h_8) \left(-(-h_{11} + h_{12})(-h_3 - h_5) \right. \\ &\left. + (h_{11} - h_5)(-h_7 + h_8)\right) - (-h_{11} + h_{12})(h_{14} - h_5) + \\ &(h_{11} - h_5)(h_7 - h_8))(-h_8 + h_9) \end{aligned}} - \frac{100 \cdot P_{\text{Demanda}}}{h_{11} \cdot \eta_{\text{Elec}} \cdot h_5 \cdot \eta_{\text{Elec}}} \quad [\text{Ec. 21}]$$

Con las ecuaciones de tratamiento del punto 4, así como de su caudal; y en adición las ecuaciones que solucionan el sistema de ecuaciones de los gastos de 3, 11, 14 y 15, quedaría resuelto el establecimiento de todas las variables termodinámicas de la parte térmica del ciclo.

Pese a que perceptiblemente se haya elaborado una descripción del estado termodinámico de los puntos del esquema de la instalación, aún queda la comprensión de un tipo de equipo no detallado en el resto de apartados, que requiere una mención no muy holgada. El último de elementos que resta por describir se trata de los sistemas de bombeo. Con anterioridad se ha mencionado su carácter isentrópico, pero ahora es necesario obtener una ecuación que permita evaluar el consumo de energía que comportan cada uno de dichos elementos. El sistema de bombeo de la torre de refrigeración prescinde de tratamiento matemático, pues no es necesaria una exhaustiva atención en él. Sin embargo, de los otros dos equipos sí pueden realizarse las siguientes consideraciones:

$$\dot{W}_{B1} = \dot{m}_6 \cdot (h_7 - h_6) \quad \text{[Ec. 22]}$$

$$\dot{W}_{B2} = \dot{m}_1 \cdot (h_{10} - h_9) \quad \text{[Ec. 23]}$$

A las expresiones indicadas restaría aplicar valores de rendimiento del equipo de bombeo, pero para el ámbito del trabajo, este dato a incorporar no es de especial relevancia, así que se tomará por tanto el consumo energético que los equipos han de aportar al fluido que les recorre.

Con lo descrito en las líneas superiores, el devenir actual del capítulo será la interpretación del resto de equipos del contexto técnico de la instalación, que no hacen referencia al sistema de producción de potencia, y las hipótesis que eventualmente puedan realizarse para el tratamiento de los mismos.

2.4. SISTEMA DE CONDENSACIÓN

El sistema de condensación presentado en el apartado del contexto técnico del trabajo debe muchas de las relaciones entre las variables que componen su simulación matemática a las hipótesis planteadas anteriormente. Si se tiene esto en cuenta a la hora de la elección de los parámetros del ciclo, habrá que imponer las siguientes ecuaciones para la definición de dichos puntos:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{22} \cdot C_{p_{\text{Aire seco}}} \cdot (T_{24} - T_{22}) + \dot{m}_{23} \cdot C_{p_{\text{Vapor}}} \cdot (T_{25} - T_{23}) + \dot{m}_{18} \cdot C_{p_{\text{Agua}}} \cdot (T_{25} - T_{22}) + \\ + \dot{m}_{18} \cdot L_{\text{vaporización}} + \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{m}_{11} \cdot h_{13} - \dot{m}_4 \cdot h_4 = 0 \end{aligned} \quad \text{[Ec. 24]}$$

$$\dot{m}_{20} \cdot C_{p_{\text{Agua}}} \cdot (T_{21} - T_{20}) + \dot{m}_6 \cdot h_6 - \dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{m}_{11} \cdot h_{13} - \dot{m}_4 \cdot h_4 = 0 \quad \text{[Ec. 25]}$$

Con los balances energéticos realizados, el resto de trabajo de definición de los caudales pasa por el empleo del diagrama psicrométrico, obteniendo para T_{24} y HR_{Ambiente} el valor α de masa de aire seco por masa de agua, y para T_{26} y $HR_{100\%}$, el respectivo valor β . Con dicha información, se pueden interpretar finalmente las siguientes ecuaciones para la relación de los gastos de los fluidos que atraviesan el sistema de la torre:

$$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{23} / \alpha \quad \text{[Ec. 26]}$$

$$\dot{m}_{22} \cdot \beta = \dot{m}_{18} + \dot{m}_{23} = \dot{m}_{25} \quad \text{[Ec. 27]}$$

2.4.1. Proceso de iteración

Dado que el modelo matemático está planteado para elaborar un estudio anual de las distintas condiciones atmosféricas y funcionales, se requiere la implementación de un juicio más aproximado a la realidad. Por tanto, en el enfoque se tomarán como valores constantes los gastos de aire de la torre y de agua de refrigeración del condensador, que suelen ser tomados constantes en la operación de una central real.

Esta fijación de parámetros permitirá estudiar la variabilidad de la presión del condensador, variable en función de los parámetros ambientales y de la demanda energética. Sin embargo, dado que se requiere de un valor de presión del condensador para efectuar cualquier cálculo, según el modelo planteado, se interpretará que el valor de la presión será el de la hora anterior (o un valor semilla en el primer caso), que será obtenido mediante un proceso iterativo en el que partiendo de la presión de la hora anterior y de la temperatura de entrada del refrigerante (con un tratamiento similar a la presión, tomado de la hora anterior) se calculará la temperatura de salida del refrigerante real.

Posteriormente, con este valor y los datos atmosféricos se calculará una temperatura de entrada del refrigerante nueva (considerada definitiva) que permitirá una nueva iteración para obtener una temperatura de salida del refrigerante del condensador que será definida como definitiva y que mediante una diferencia de temperatura respecto a la temperatura del condensador, permitirá conocer un valor de presión del condensador definitivo, que será empleado para el cálculo de la siguiente hora. No obstante, este sería el procedimiento si solo se hiciera una iteración, pero es más que propenso a la suposición que no va a bastar con una sola iteración para obtener valores eficaces en los resultados de la presión del condensador y temperatura de entrada del refrigerante.

En lo que respecta a la programación en *Microsoft Excel* de las iteraciones hay que tener en cuenta que la herramienta está pensada para funcionar para todo un año, por lo que la metodología típica de programación de un *SOLVER* para la resolución no sería acertada. Por ello, se impondrá un número fijo (y elevado) de iteraciones que permitan asegurar la convergencia de la solución en todos los casos del año. Realizando una ejecución anual se percibe que los casos en que la iteración converge más lentamente son aquellos en los que se da una variación brusca del calor cedido por el condensador, tal como se aprecia en los gráficos inferiores, tomados de un día en el que se da dicha variación brusca a las 14h. Este parámetro de brusquedad se traducirá en un error muy elevado para esa hora, tomado como la diferencia entre el valor de la hora anterior y el último calculado por el proceso iterativo, aunque como se puede apreciar solo es realmente preocupante en determinados momentos de la ejecución, y es independiente del cálculo de los parámetros reales que se darán.

Gráfico 10. Visualizador de datos ambientales.

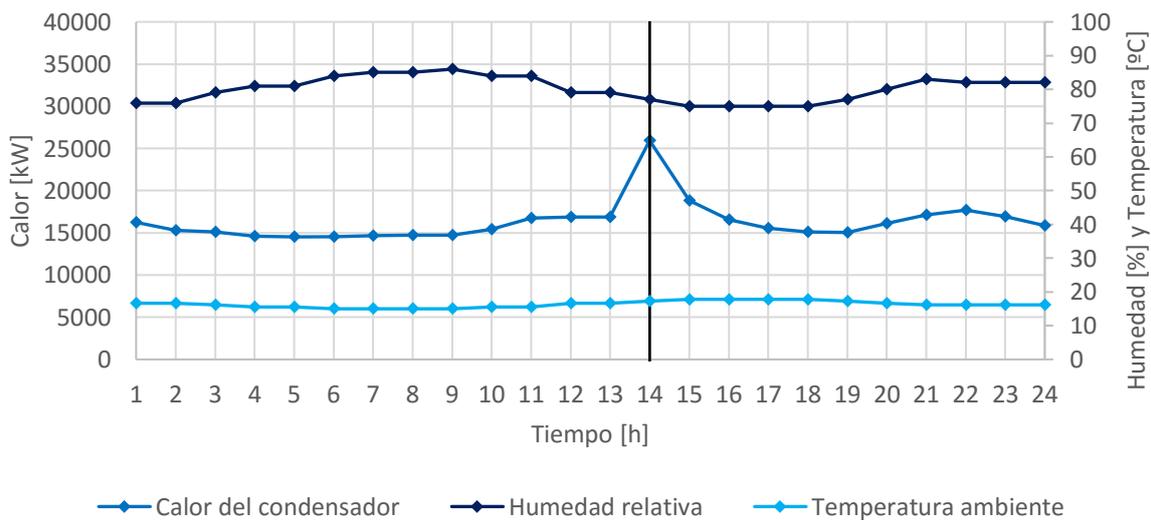


Gráfico 11. Visualizador de los parámetros estudiados y el error relacionado.

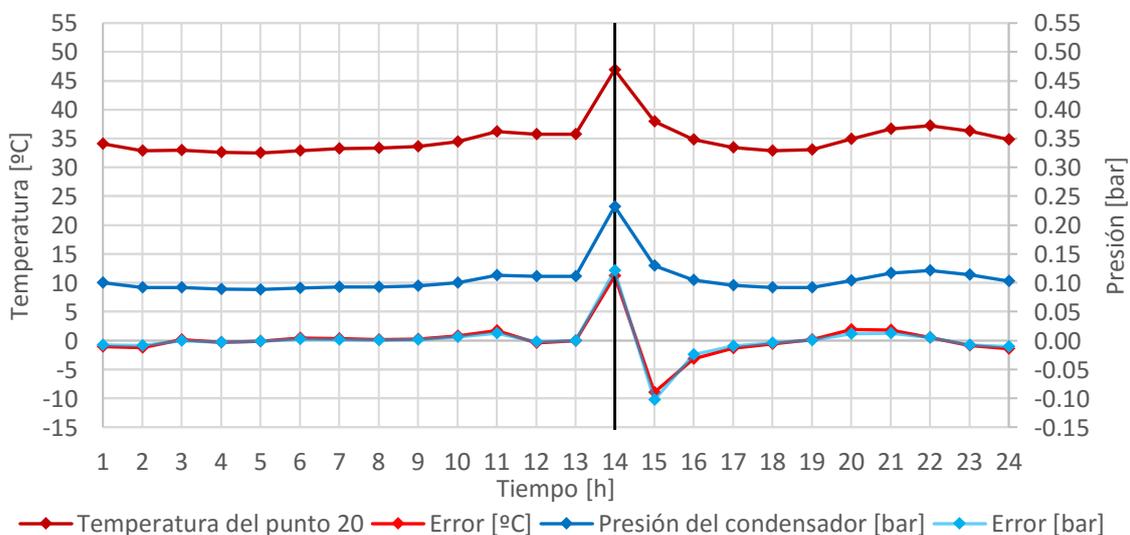
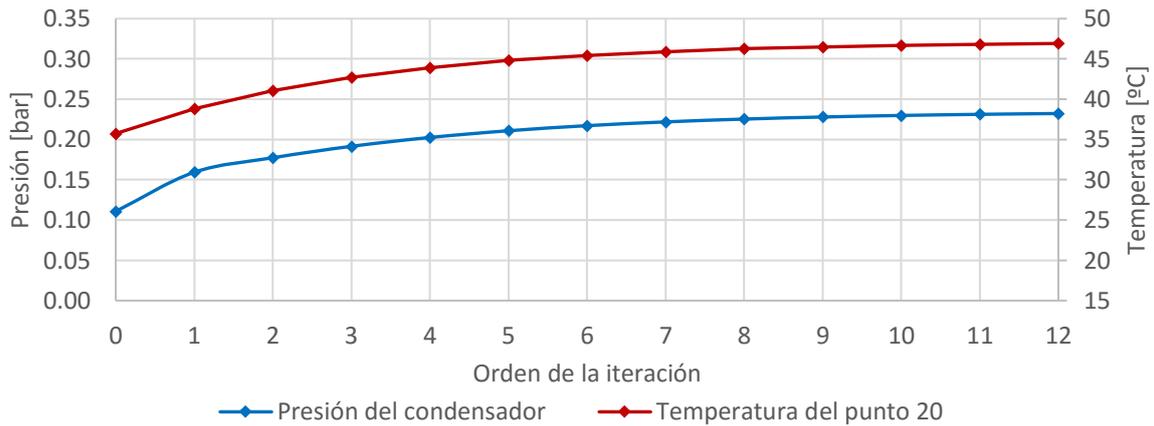
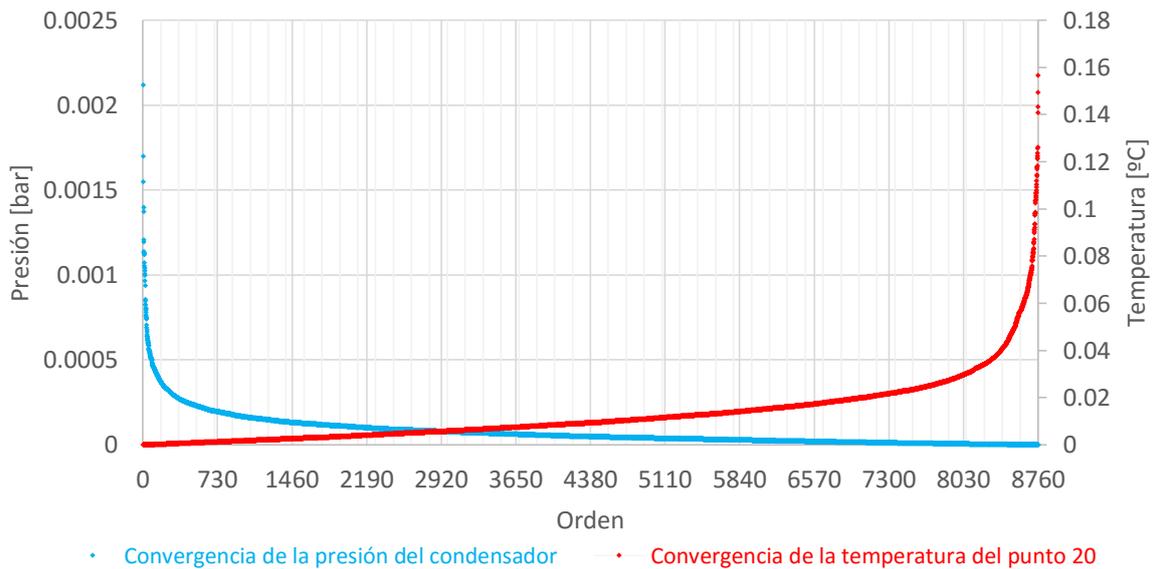


Gráfico 12. Visualización de la iteración para el momento estudiado.



A pesar de dicho error excesivo, tal como se ve en el gráfico 12, incluso para los momentos más drásticos (como el indicado), el modelo con 12 iteraciones programadas para cada una de las 8760 horas del año logra converger. Es más, si se interpreta como valor de convergencia la diferencia entre el valor calculado entre las dos últimas iteraciones, y se entiende que cuanto más próximo sea a cero, más convergencia del modelo se tiene, una interpretación anual de dicho parámetro alberga resultados como los siguientes:

Gráfico 13. Convergencia anual de las iteraciones.



En conclusión, el uso de más iteraciones para la comprobación de la convergencia del modelo de la torre de refrigeración es una característica que permite evadir la controversia que pueda reportar la variación brusca del calor cedido por el condensador.

Queda demostrada de esta manera la necesidad y la efectividad del método iterativo aplicado al sistema de refrigeración.

2.5. SISTEMA DE CAPTACIÓN SOLAR

El modelado del sistema de captación de energía solar está sujeto a dos puntos de vista. Por una parte, la interpretación geométrica de la superficie de captación, y por otra, el establecimiento de las distintas consideraciones a nivel termodinámico relativas a la temperatura de absorción del fluido caloportador que atraviesa el tubo receptor del seno del heliostato.

Teniendo conocimiento del esquema 2 relativo al perfil de un tipo de captadores que se va a estudiar, el análisis matemático partirá con datos de irradiación, características del modelo de captadores y demanda energética. Para interpretar el comportamiento general de la ganancia de calor en este sistema, se identificará que el calor recibido es función de la superficie del espejo, la irradiación solar y un parámetro de rendimiento que identifica el comportamiento general del campo de captadores solares:

$$\dot{Q}_{Sol} = I_{Sol} \cdot A_{Espejo} \cdot \eta_{Campo\ solar} \quad [\text{Ec. 28}]$$

Si bien se conoce esta relación, se puede realizar la incorporación de los estados termodinámicos de la entrada y salida del campo de captador, descritos con anterioridad:

$$\dot{Q}_{Sol} = \dot{m}_2 \cdot (h_2 - h_1) \quad [\text{Ec. 29}]$$

Ahora es labor de interpretación de los parámetros del captador, o al menos realizar el comentario necesario para su comprensión. Por una parte, en los catálogos de captadores termosolares de configuración cilindroparabólica o tipo Fresnel aparece el valor del diámetro del tubo interior por el que circula el fluido, es decir, d . Además aparecerá el factor de concentración, FC , que es una relación entre el área del espejo y el área del receptor, indicada de la siguiente manera:

$$FC = \frac{A_{Espejo}}{A_{Receptor}} = \frac{D \cdot L}{d \cdot L} \quad [\text{Ec. 30}]$$

Si no se especifican exactamente los parámetros del diámetro receptor o el factor de concentración, se identificarán, con mucha seguridad parámetros dentro de la relación expuesta en la ecuación 30, que permitan la obtención de los parámetros mencionados.

Con la conjunción de estos parámetros puede llegarse a la obtención de una ecuación que permita el conocimiento de la longitud necesaria del campo de captadores, o si no se dispone del valor de salida del campo de captadores, será un valor objetivo. Para el caso estudiado dentro de este trabajo, y que posteriormente será trasladado a la herramienta ofimática, será necesario conocer de antemano la longitud o superficie del campo de captadores (como parámetro de diseño de la inversión) para posteriormente evaluar cómo es el nivel térmico de la salida del mismo, ya sea excedente o no. La relación definitiva entre los parámetros geométricos y de operación del circuito de captadores es la siguiente:

$$L_{Campo\ solar} = \frac{\dot{Q}_{Sol} / (I_{Sol} \cdot \eta_{Campo\ solar})}{FC \cdot d} = \frac{\dot{m}_2 \cdot \frac{h_2 - h_1}{I_{Sol} \cdot \eta_{Campo\ solar}}}{FC \cdot d} \quad [\text{Ec. 31}]$$

2.5.1. Proceso de discretización

Una vez se han obtenido los parámetros característicos del campo de captadores, ya sea el estado de la salida o la longitud de los mismos, es de prioridad el conocimiento de un proceso para la evaluación del rendimiento de dichos equipos.

Sin embargo esta tarea no es harto sencilla, puesto que aunque la cantidad de calor aportada en cada segmento del equipo de captación sea la misma, la temperatura de intercambio de calor no será la misma en ninguna parte del receptor, debido a que a medida que se calienta el fluido, el rendimiento de captación va a ser menor, dado que las pérdidas de calor aumentarán por tener una mayor temperatura de intercambio de calor, lo que según las ecuaciones se traduce en dicha pérdida excesiva de calor.

Por tanto, la metodología a emplear se basa en la discretización de toda la longitud en 20 tramos separados por una diferencia de entalpía igual a la vigésima parte de la diferencia de entalpía entre la salida y la entrada del campo de captadores. Es necesaria la concepción que a una mayor segmentación del conjunto de los captadores, la discretización será más acertada, pero dado que este ítem tiene un peso computacional en el modelo muy elevado, la afirmación de tomar únicamente una división en 20 tramos es más que asumible.

De esta manera se tendrán 20 valores de calor perdido, en función de la diferencia de la temperatura discretizada de intercambio de calor y la temperatura ambiente (ecuación de pérdidas), y a su vez 20 valores de rendimiento, que supuestamente irá en decrecimiento. Si se interpretan las constantes k_1 y k_2 como características de pérdidas del captador, las ecuaciones que permiten la evaluación del rendimiento solar por tramos serían:

$$h_i = h_1 + i \cdot \frac{h_2 - h_1}{20} \quad [\text{Ec. 32}]$$

$$Q_{\text{Pérdidas } i} = \frac{A_{\text{Receptor}}}{20} \cdot (k_1 \cdot (T(p_i; h_i) - T_{\text{Ambiente}}) + k_2 \cdot (T(p_i; h_i) - T_{\text{Ambiente}})^2) \quad [\text{Ec. 33}]$$

$$Q_i = \frac{A_{\text{Colector}} \cdot I_{\text{Sol}} \cdot \eta_{\text{Óptico}}}{20} - Q_{\text{Pérdidas } i} \quad [\text{Ec. 34}]$$

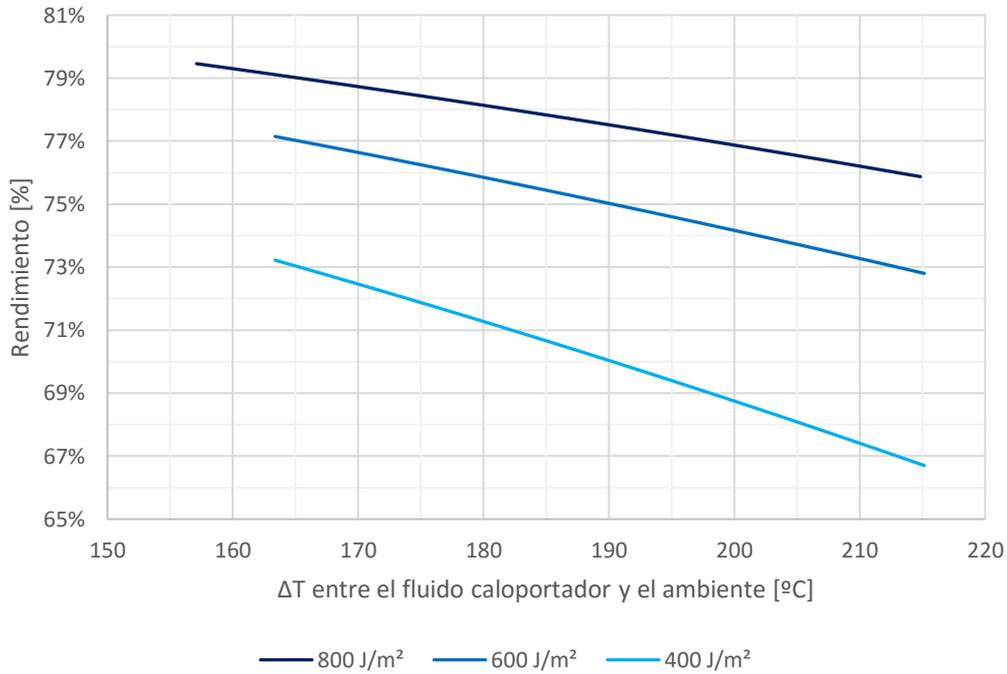
$$\eta_{\text{Captador } i} = \frac{Q_i \cdot 20}{A_{\text{Colector}} \cdot I_{\text{Sol}} \cdot \eta_{\text{Óptico}}} \quad [\text{Ec. 35}]$$

Ahora bien, los rendimientos extraíbles de la ecuación 35 no corresponden al rendimiento solar del campo de captadores por ninguna relación matemática, sino solo al segmento que se está tratando. Es decir, el rendimiento del campo solar no tendrá nada que ver con la media u otro parámetro estadístico. Para el rendimiento global del campo de captadores será necesaria la agrupación del calor aportado y su comparación con todo el calor suministrado por el Sol, mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{\text{Campo solar}} = \frac{\sum_{i=1}^{20} Q_i}{A_{\text{Colector}} \cdot I_{\text{Sol}} \cdot \eta_{\text{Óptico}}} \quad [\text{Ec. 36}]$$

Para poder tener una mejor interpretación de los resultados que caracterizan el proceso de captación de la energía solar, se indica gracias al gráfico 14 cómo se puede entender la evolución del rendimiento del campo solar calculado en cada segmento, con la respectiva diferencia de temperatura entre el fluido caloportador y la temperatura ambiente. Además, para dotar al gráfico de mayor identidad explicativa, se ha añadido el efecto del nivel de radiación solar, evidenciando que a mayor radiación solar, menores pérdidas, y por tanto, mayor rendimiento del campo solar.

Gráfico 14. Rendimiento solar en función de la temperatura.



2.6. SISTEMA DE SOPORTE CON CALDERA

El sistema de soporte se corresponde con una caldera compuesta de una cámara de combustión y un intercambiador de calor entre los humos de dicha cámara y la corriente existente entre los puntos 2 y 3 del esquema 4.

Para comenzar, se hace necesario el comentario de las características de la caldera. La configuración empleada será el esquema monopaso, dado que las temperaturas de utilización no son excesivamente altas y se puede asegurar la integridad de los tubos del equipamiento. Además, se ha de controlar que la temperatura de salida de los humos no sea inferior a un umbral por debajo del cual se pueden dar los sucesos de corrosión ácida, lo que implicaría correcciones o instalaciones de otro equipamiento para el tratamiento de dichos humos. Este valor suele estar en torno a los 150 °C. Sin embargo, se han de aplicar otros criterios sobre la temperatura de los humos. El más drástico sería que se ha de conservar una diferencia de temperatura entre la salida de los humos, es decir, el punto 28; y la entrada del fluido caloportador, es decir, el punto 2.

Esta diferencia de temperatura es del orden de 15 °C, y cotejando dicho requerimiento con el planteado anteriormente se llega a la conclusión que la configuración termodinámica del ciclo evita que la temperatura del punto 2 sea inferior a 135 °C en todos los casos, y por tanto, se evitaría el suceso de corrosión ácida. Si no se diera el caso en que la temperatura no fuera lo suficientemente alta, siempre se puede considerar el aumento de la presión de extracción del punto 15, para favorecer el aumento de la temperatura del punto 1, y por tanto, del punto 2, en situaciones en las que no se esté aportando calor de manera atmosférica (por la noche); y así por tanto cumplir con las condiciones del punto 28.

Teniendo en cuenta las características técnicas del equipo, descritas en el párrafo superior, la labor que a continuación se plantea es la búsqueda de una serie de ecuaciones que permitan el conocimiento del gasto de combustible necesario para elevar la temperatura de 2 hasta la de 3 en los casos en los que sea necesario. En un primer instante de consideración de estos elementos se requiere comentar las vicisitudes que acompañan a la combustión de un combustible fósil o biomasa con aire. Para el tipo de combustión que se comenta, el exceso de aire, n , óptimo se sitúa entre el 15% y el 20%, por lo que tendrá que ser tenido en cuenta en las ecuaciones sucesivas.

Además, será necesario establecer el conocimiento del dosado (o la inversa) como relación entre el aire y el combustible. Dado que en este caso el combustible de soporte es *fuel-oil*, la inversa del dosado estequiométrico adquiere un valor de $13.8 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{fuel}}$, que es un valor considerablemente bajo comparado con otros combustibles como el metano.

Siguiendo con el paso de tratamiento de las referencias al combustible, uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta será su poder calorífico, HP. Ya que el combustible empleado es *fuel-oil*, el parámetro correspondiente al poder calorífico se sitúa en 40200 kJ/kg, siendo un valor intermedio frente a combustibles de gran poder calorífico como el gas natural, o a combustibles de muy mala calidad energética, como el carbón de coque o hulla.

No obstante, el establecimiento de estos valores permite el conocimiento de las variables que se están buscando en este apartado, que son los gastos de combustible y aire de aporte a la cámara de combustión.

Además se ha de considerar una serie de pérdidas que se corresponden con el 5% de la potencia máxima necesaria (la que se tiene con la máxima demanda y el menor aporte solar) debidas a la fenomenología de la radiación y la transmisión de calor en el seno de la caldera. Con esto en consonancia, las ecuaciones que describen el proceso llevado a cabo en la caldera y las relaciones entre el aire y el combustible son las siguientes, interpretando como \dot{m}_{27} el gasto de aire necesario para la combustión y \dot{m}_{26} el respectivo gasto de combustible:

$$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{26} \cdot \frac{1}{F_e} \cdot (1 + n) \quad \text{[Ec. 37]}$$

$$0 = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_2) + (\dot{m}_{26} + \dot{m}_{27}) \cdot C_{p_{\text{Aire}}} \cdot T_{28} - \dot{m}_{26} \cdot \text{HP} - \dot{m}_{27} \cdot C_{p_{\text{Aire}}} \cdot T_{\text{Ambiente}} + 0.05 \cdot \dot{m}_{26\text{MAX}} \cdot \text{HP} \quad \text{[Ec. 38]}$$

Gracias a la aplicación de estas dos ecuaciones se habrá obtenido un valor del gasto de combustible que posteriormente podrá ser comparado entre las distintas configuraciones de la planta de producción energética para cotejar cuanto ahorro (o no) supone la instalación que se está teniendo en cuenta. Además, para poder evaluar la combustión, se hace más que útil el empleo de una ecuación que permita la evaluación del rendimiento de la caldera. Dicha ecuación conclusiva de este apartado resulta ser la siguiente:

$$\eta_{\text{Caldera}} = \frac{\dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_2)}{\dot{m}_{26} \cdot \text{HP}} \quad \text{[Ec. 39]}$$

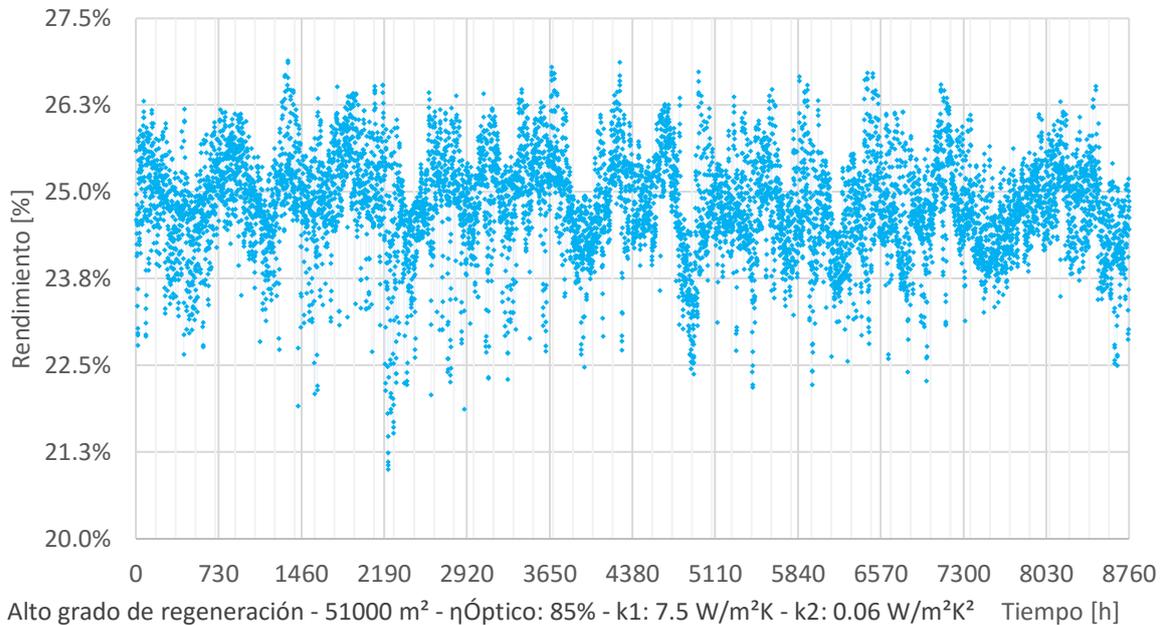
2.7. DEFINICIÓN DEL RENDIMIENTO DEL CICLO

Tras el comentario completo de la instalación realizado en los apartados anteriores, se llega al conocimiento de las variables que definen los estados del ciclo, de todos los equipos que lo componen. No obstante, una vez se han identificado todas esas variables, sería idóneo poder contar con un parámetro que de alguna manera generalice el comportamiento y funcionamiento del ciclo, que posteriormente pueda ser tratado conjuntamente al de la caldera y al del campo de captadores. Intuitivamente, en los campos de la termodinámica aplicada ese parámetro siempre ha sido identificado con el rendimiento, y en este caso, se tomará el rendimiento del ciclo de vapor:

$$\eta_{\text{Ciclo vapor}} = \frac{\dot{m}_3 \cdot h_3 - \dot{m}_{15} \cdot h_{15} - \dot{m}_{14} \cdot h_{14} - \dot{m}_{11} \cdot h_{11} - \dot{m}_5 \cdot h_5}{\dot{m}_3 \cdot h_3} \quad [\text{Ec. 40}]$$

La ecuación presentada en la parte superior será un parámetro a tener en cuenta, y del cual pueda extraerse un valor medio que caracterice el grado de operatividad del ciclo.

Gráfico 15. Comportamiento del rendimiento de la planta a nivel anual.



CAPÍTULO 3. PROCESO DE DESARROLLO DEL MODELO

3.1. NOTAS SOBRE EL PROCESO

El motivo del desarrollo de una aplicación ofimática será la necesidad de obtener una calculadora eficaz de las ecuaciones presentadas anteriormente, y para ello se apoyará en dos aplicaciones extra que añadirán las funciones de los cálculos de estados termodinámicos implicados en las mencionadas ecuaciones. El funcionamiento de las distintas hojas de cálculo se da gracias a la adición de dos *plugins* a *Microsoft Excel*, que añaden al conjunto de funciones del programa una serie de funciones extra relacionadas con el ámbito termodinámico.

- **X Steam Tables.** Se trata de un conjunto de funciones que permiten el cálculo de las propiedades y variables termodinámicas del agua, en estado líquido y en estado vapor. Las funciones han sido programadas por Magnus Holmgren y se encuentran disponibles tanto para *Microsoft Excel*, como para *Matlab* o incluso *OpenOffice*.
- **Psych.** Este añadido elaborado por la Universidad de California permite la adición de funciones que partiendo de datos del diagrama psicrométrico elaborará los cálculos pertinentes para obtener como resultado datos de humedad relativa, temperatura del bulbo húmedo, etcétera. En resumen, permite tener programada la carta psicrométrica.

El enlace a ambas aplicaciones se encuentra en las referencias del trabajo.

Otro ítem a tener en cuenta en cuanto al proceso es la metodología empleada para el desarrollo de la propia herramienta. La programación consistía en la adición de los distintos módulos de ecuaciones descritos en el anterior capítulo, primero para única hora y posteriormente para todo el año, de manera que realizando revisiones de dichos avances en las tutorías de seguimiento del trabajo, se pudieran subsanar errores de manera más efectiva.

La calculadora final contempla varias funcionalidades que permiten el estudio del comportamiento de una configuración de central termosolar tanto a nivel de hora a hora, como la evaluación anual del propio comportamiento, del cual se podrán extraer parámetros representativos (gasto anual de combustible de soporte, tiempo al año que se da excedente de calentamiento solar, rendimiento medio...) y gráficos que permitan la visualización de cómo varían dichos parámetros de una hora a otra de la ejecución anual.

La versión final de la aplicación, una vez se ha validado completamente el modelo, es una versión que incluye las instrucciones necesarias para que el usuario pueda modificar pertinentemente los parámetros de la modalidad de instalación que pretende estudiar, así como la visualización en gran calidad de los gráficos relativos a comparativas y parámetros anuales.

3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

Dado que los modelos matemáticos se elaboran para poder visualizar de una manera más eficaz la operatividad de aquello que tratan de emular, el proceso de validación de los mismos pasará por comprobar si los resultados del propio modelo corresponden con los del equipo o instalación real, para un mismo conjunto de parámetros de funcionamiento.

Sin embargo, dado que la pretensión del modelo desarrollado es la interpretación del funcionamiento de una planta de generación todavía no construida, para la comparación entre las distintas opciones técnicas que puedan ejecutarse; la comparativa con una instalación real es prácticamente imposible.

Es por ello que en este apartado la idea de validación del modelo se concibe como la comprobación del funcionamiento de la calculadora, es decir, el ofrecimiento de resultados correctos y la aceptación como verdaderas de las distintas hipótesis tomadas en el desarrollo informático de la aplicación. Por tanto, la metodología de validación de la herramienta ofimática desarrollada pasará por la comprobación de los parámetros que se puedan extraer de una ejecución del programa, la concordancia gráfica de las representaciones del modelo, la comprobación de la dependencia paramétrica del ambiente y la aceptación (o no) de las hipótesis elaboradas durante el proceso de desarrollo.

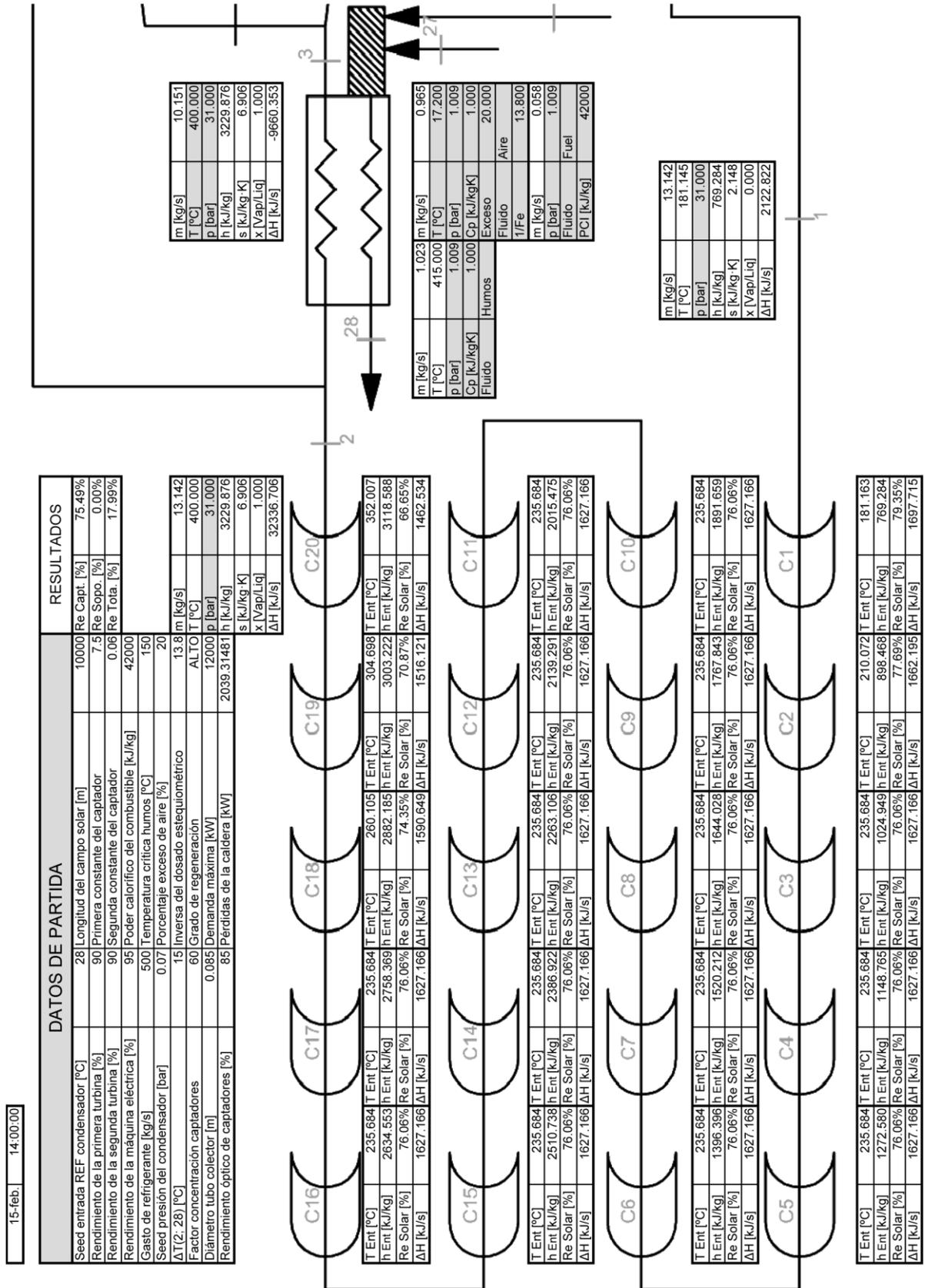
Tal como se ha comentado anteriormente, los puntos más problemáticos de la ejecución anual se dan cuando ocurre una variación brusca en el parámetro del calor cedido por el condensador. Así que se entenderá que si el modelo es válido incluso en los momentos de mayor dramatismo de la ejecución, lo será para cualquier configuración paramétrica anual. Con esta hipótesis, se tomará un instante horario en el que el calor cedido al sistema de refrigeración haya devenido en una variación brusca. Uno de estos instantes se identifica con las 14h del 15 de febrero del conjunto de parámetros anual estudiado. Previa a la interpretación de los resultados, es importante conocer las variables de entrada que más identifican la configuración tecnológica empleada para el estudio del momento indicado:

Tabla 4. Parámetros técnicos relevantes del análisis [15 de febrero – 14h]

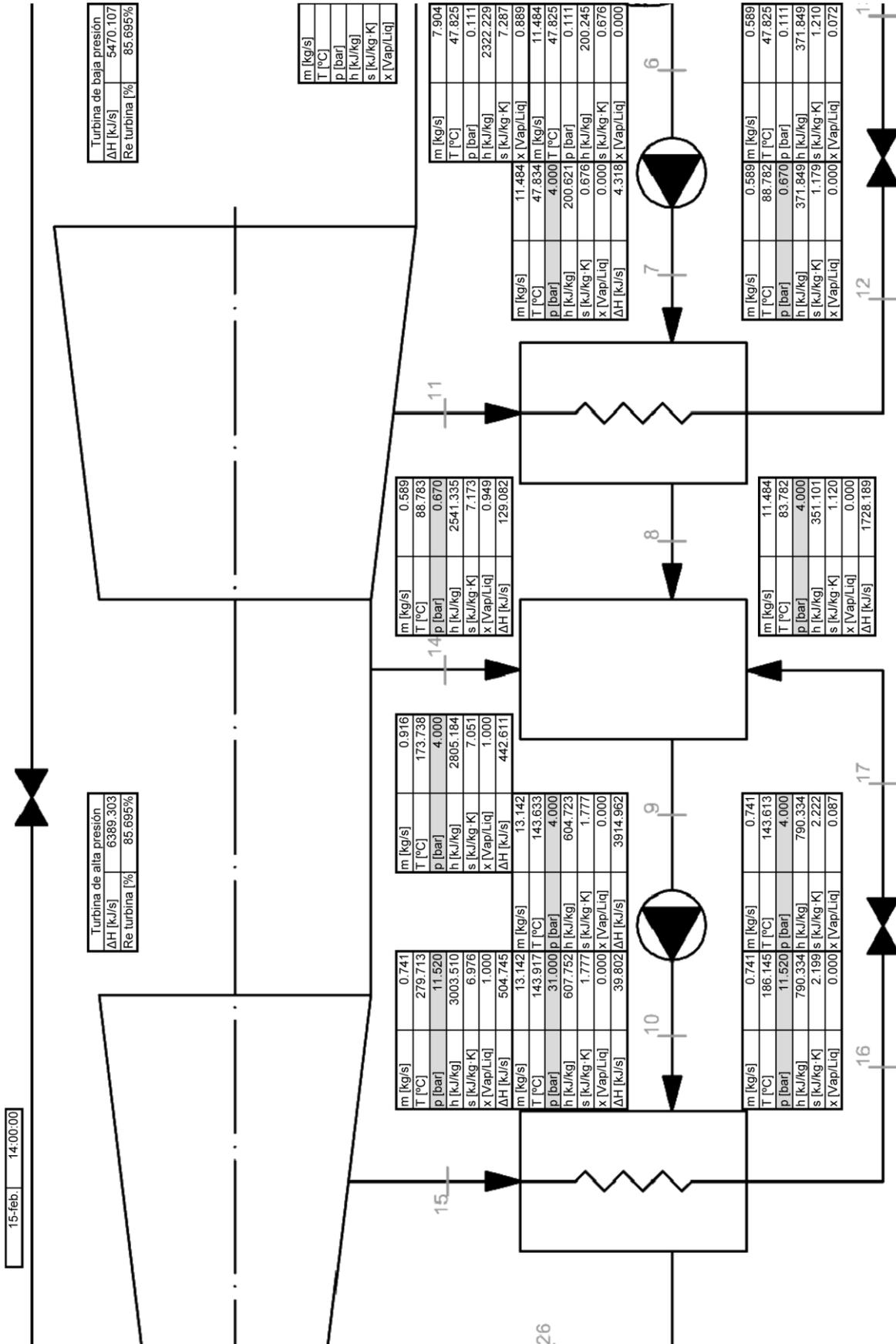
Área campo [m ²]	k ₁ [W/m ² K]	k ₂ [W/m ² K ²]	η _{óptico} [%]	G° regeneración
51000	7.5	0.06	85%	ALTO

Una vez se tiene la disposición del momento a estudiar, la clave del proceso de validación, en cuanto a los parámetros del esquema termodinámico y su funcionamiento se refiere, el siguiente paso será la visualización de dichos datos, en un formato que permita evaluar tanto los parámetros de los estados termodinámicos, como el proceso de discretización del campo de captadores y la comprensión del sistema de refrigeración. Por ello, la idea de los siguientes esquemas, que son partes de un todo, es permitir la identificación de dichos parámetros de funcionamiento.

Esquema 5. Representación esquemático-paramétrica del 15 de febrero a las 14h [1/3].



Esquema 6. Representación esquemático-paramétrica del 15 de febrero a las 14h [2/3].



Del esquema presentado en las páginas anteriores pueden extraerse diversas interpretaciones, pero para el estrato actual del trabajo, las más relevantes serían las referentes al conjunto de variables termodinámicas de los estados de los distintos puntos del ciclo, y la distribución de los parámetros de comportamiento de los tramos en los que se ha dividido el circuito del campo de captadores. En un primer momento, la validación relativa a la comprensión de los estados termodinámicos debe realizarse mediante la observación de los parámetros del ciclo, y como añadidos al esquema presentado anteriormente, se hace más que útil realizar la representación de los diagramas TS y HS del ciclo termodinámico:

Gráfico 16. Diagrama TS del comportamiento del ciclo del 15 de febrero a las 14h.

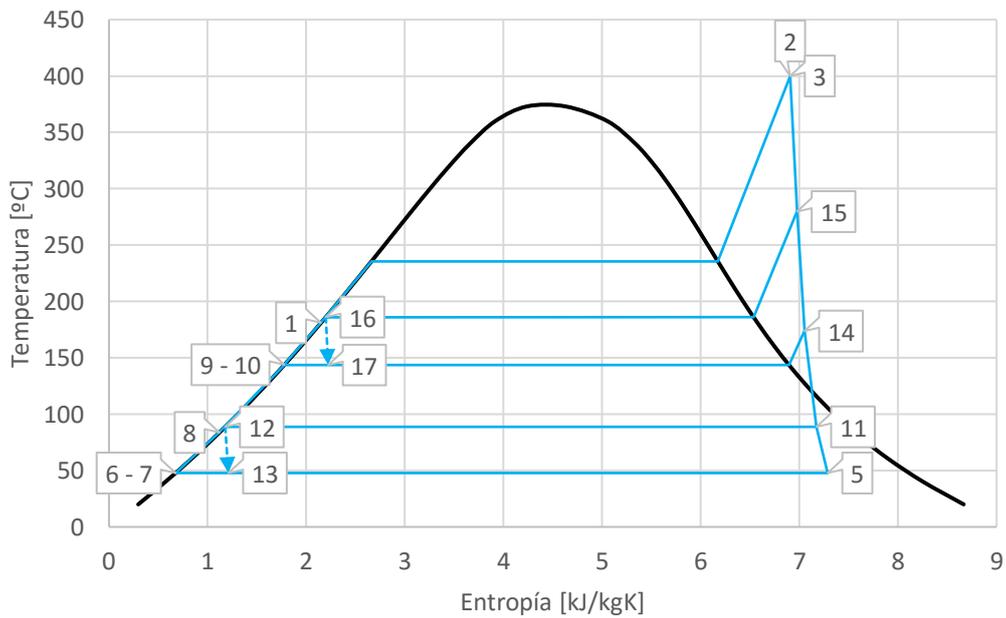
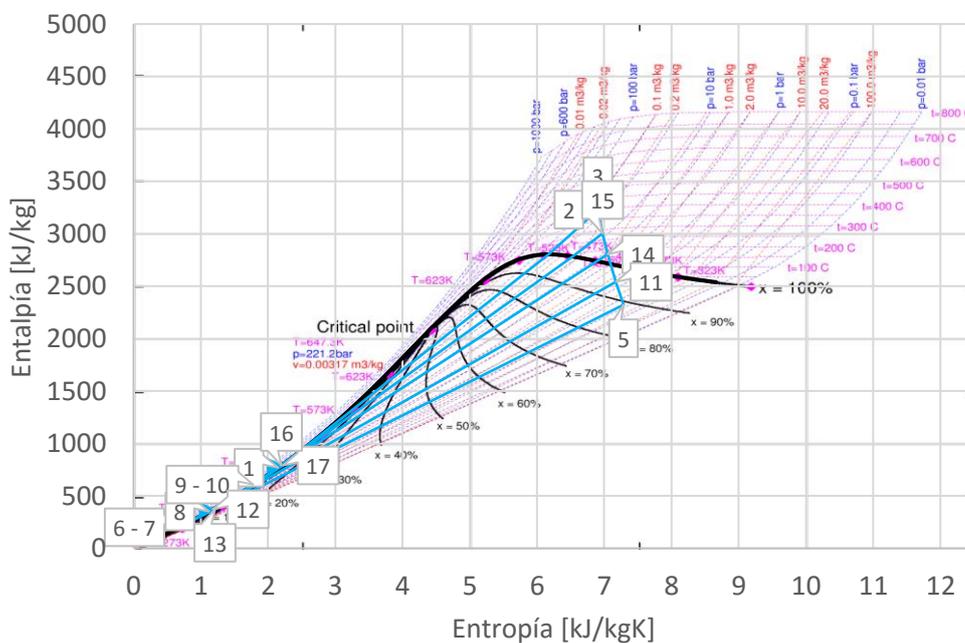


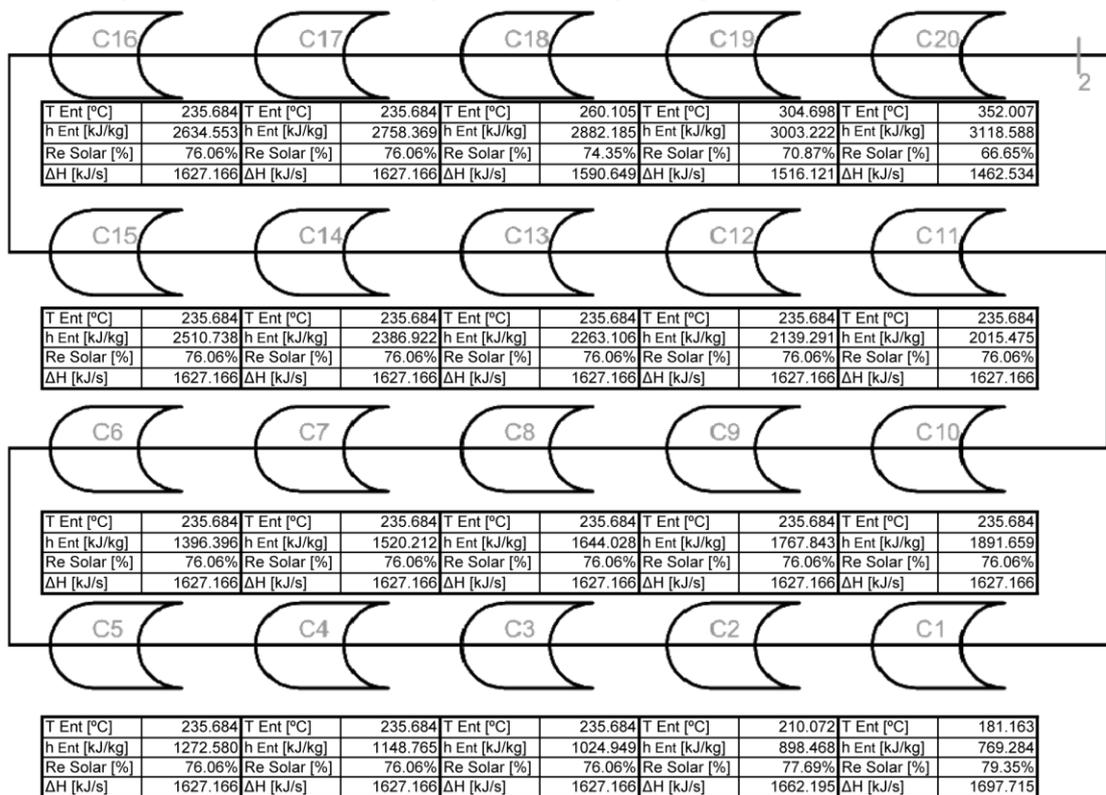
Gráfico 17. Diagrama HS del comportamiento del ciclo del 15 de febrero a las 14h.



Realizando un análisis de los dos gráficos anteriores, a priori se puede verificar que el comportamiento matemático del modelo se corresponde con el que debiera darse en el caso de un ciclo de vapor. Por ejemplo, los gastos de extracción de regeneración por los intercambiadores de superficie son menores que la extracción por el regenerador intermedio de mezcla, lo cual es un comportamiento que se da en el funcionamiento real de una central. De la misma manera, al identificar los títulos de vapor en los sistemas de valvulería y su comportamiento se aprecia un aumento de la entropía, lo cual es preciso en el desarrollo de este tipo de proceso irreversible de expansión. En definitiva, el comportamiento que se puede visualizar de los parámetros del ciclo termodinámico es suficiente para verificar esta parte del modelo, y afirmar la validación de dicho tratamiento matemático.

No obstante, restará conocer todavía el comportamiento de otros sistemas propensos a estudiar como ítems de validación del modelo. En esta idiosincrasia, la validación del conjunto de ecuaciones y modelo que tratan la concepción del circuito de captadores termosolares se deberá interpretar respecto a la visualización del comportamiento en esta parte de la instalación.

Esquema 8. Detalle del campo solar del esquema general de la instalación.

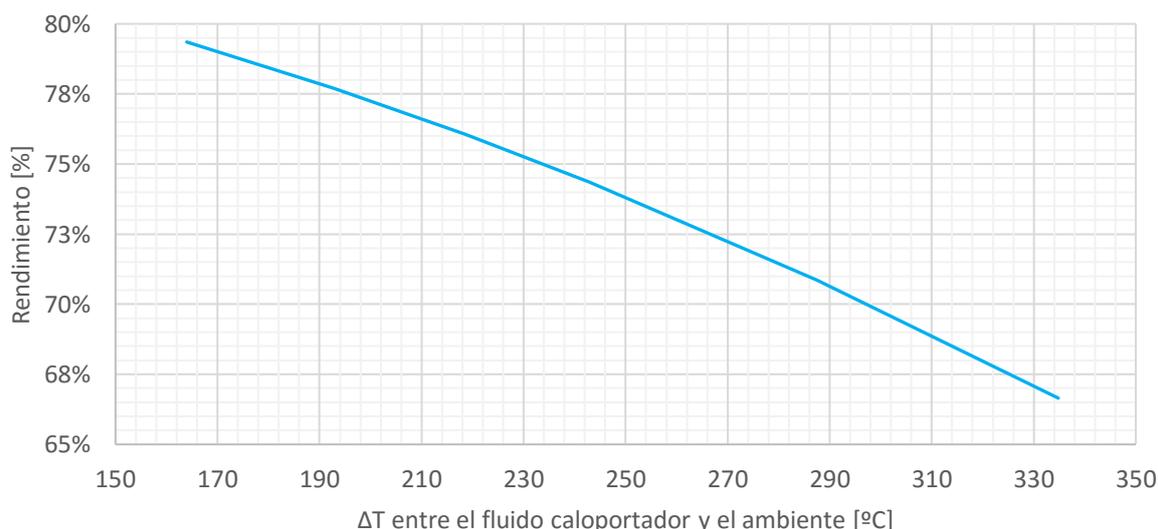


A la vista de los resultados numéricos expresados en el esquema superior, se pueden extraer diversas informaciones muy relevantes para confirmar la buena operatividad del modelo de discretización del circuito de captación solar. En un primer instante, es importante entender el proceso de aumento de la temperatura. Cuando el fluido llega a la entra de del captador se trata de líquido, que sigue en dicho estado hasta la tercera división del campo de captadores, pues se alcanza una temperatura que permanece constante hasta el decimoctavo segmento de la división. Este hecho evidencia que en ese lapso de temperatura constante, el fluido está cambiando de fase, de líquido a vapor, lo que es un comportamiento esperable dada la configuración del sistema de captación. Sin embargo, el parámetro del estado termodinámico que sí varía entre segmentos es la entalpía del fluido.

Esto se debe a que la entalpía siempre cambia cuando se le suministra calor a un fluido, pero dado que se pretende estudiar el proceso de absorción de calor en función de la temperatura del fluido, la interpretación del valor entálpico requiere una percepción adicional. La teoría explica que a mayor temperatura del fluido caloportador, más difícil le será absorber la misma cantidad de calor, o que habrá perdido capacidad de ganancia calórica. Si se confirma este hecho en el estudio paramétrico planteado, se tendrán razones suficientes como para validar la formulación del modelo.

Con este propósito se añadió la última celda de cada segmento de la discretización del campo de captadores, que identifica la diferencia de entalpía entre la entrada y la salida del segmento considerado. A la vista está que cuando las temperaturas son bajas, es decir, a la entrada del circuito, la diferencia de entalpías es notablemente mayor que en los segmentos de la salida, por lo que se identifica que gana más calor a la entrada del campo que a la salida, efectivamente, cuando la temperatura es más baja. No solo eso, sino que comparando individualmente esos extremos del circuito se puede identificar la misma fenomenología. Por ejemplo, en el segmento 19 del campo de captadores se da una diferencia de 1516 kJ/s entre la entalpía de entrada y salida del fluido; mientras que para el siguiente captador, dicha diferencia es de 1462 kJ/s, y la temperatura del tramo 20 es notablemente superior a la del decimonoveno. Así pues, si el comportamiento que se percibe en el campo de captadores es el que realmente dicta la teoría, se hace más que necesaria la confirmación de la validez del tratamiento matemático del circuito de captadores. Sin embargo, para añadir mayor veracidad a este resultado, el comportamiento de la reducción del rendimiento de absorción de calor del campo solar a medida que aumenta la temperatura de absorción es un resultado que puede visualizarse en el gráfico siguiente, y que además completa la información destacada en el esquema 8. El valor del rendimiento de captación solar es del 75.49%.

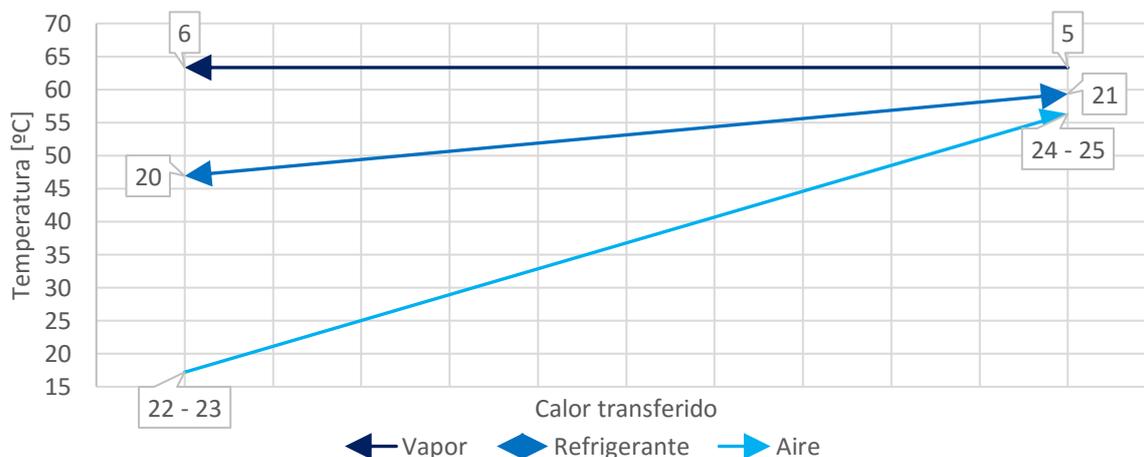
Gráfico 18. Variación del rendimiento del campo solar del 15 de febrero a las 14h.



Para poder concluir el proceso de validación del modelo únicamente restan las consideraciones relativas a la torre de refrigeración y el sistema de condensación. Anteriormente, en el capítulo del desarrollo matemático del modelo se ha asumido la hipótesis de que la presión de condensación y la temperatura de entrada del refrigerante no cambian de una hora a la siguiente, pero será necesario comprobar la validez de dicha metodología en el modelo informático.

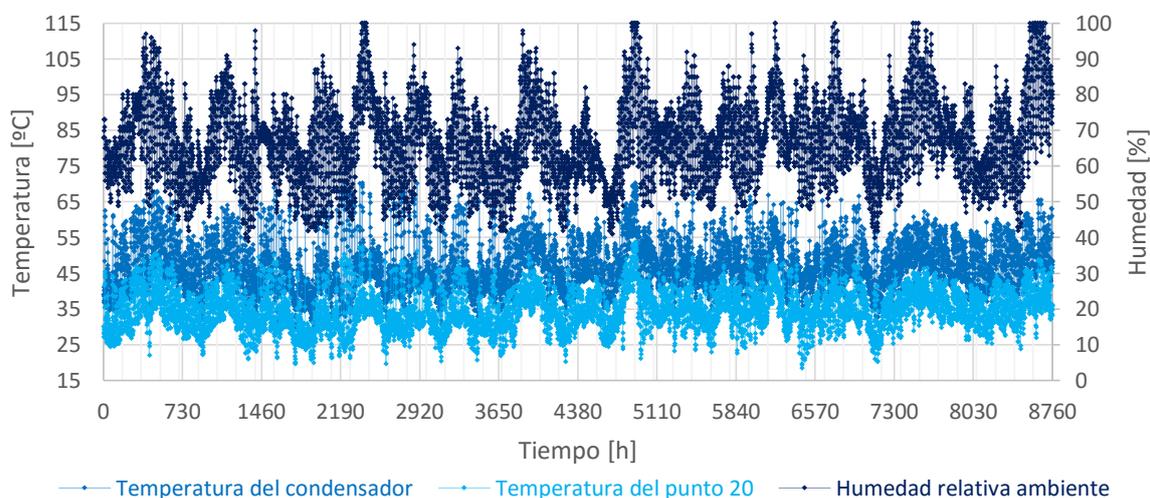
En un primer instante se fuerza la representación de los valores de las corrientes de fluido relativas al sistema de condensación, aplicados al caso estudiado. En vista de la fenomenología impuesta en el gráfico 19, habiendo fijado los gastos de refrigerante y aire exterior, se aprecia la confirmación de una hipótesis tomada para la corriente del refrigerante, y es que entre la entrada y salida del mismo se aprecia una diferencia de temperaturas de alrededor de 10 °C, que es exactamente el valor comentado en capítulos anteriores. Sin embargo, dado la hipótesis iterativa impuesta, esta coincidencia paramétrica no es suficiente para la validación de esta parte del modelo.

Gráfico 19. Corrientes del sistema de condensación del 15 de febrero a las 14h.



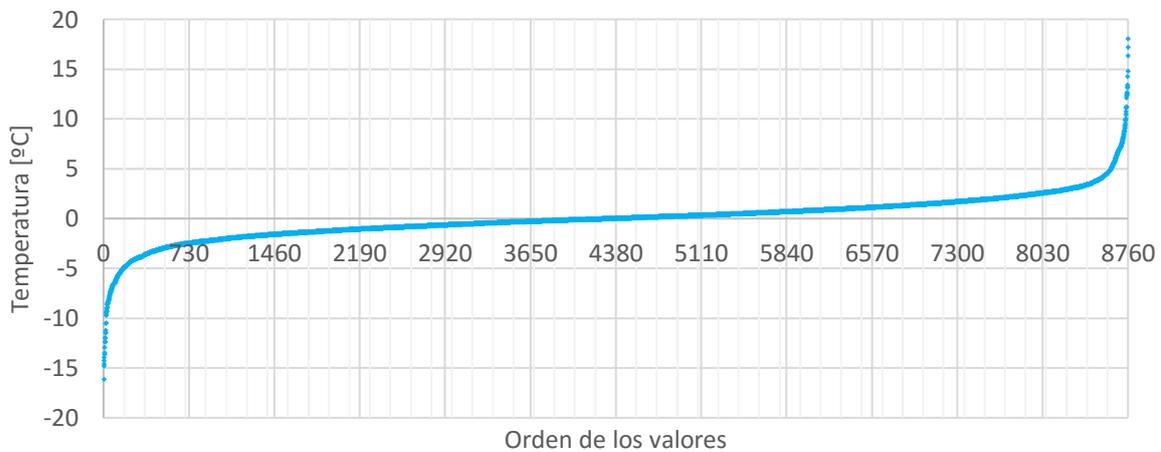
Para poder asimilar la dependencia del funcionamiento del condensador respecto de parámetros atmosféricos o relativos al funcionamiento, lo que impondría un ítem adicional para la validación del modelo, se debe representar el comportamiento de las dos variables más relevantes del sistema de condensación (temperatura o presión del condensador y temperatura del punto 20) y cotejar dicho comportamiento con el parámetro ambiental que se comporte de la misma manera. A la vista del gráfico 20, se asimilará que la mayor dependencia de las variables de funcionamiento comentadas se da en relación a la humedad relativa, y que por tanto, la validez de confirmar que el comportamiento de las variables del condensador está ligado a las variables ambientales.

Gráfico 20. Dependencia anual del comportamiento de las variables del condensador.



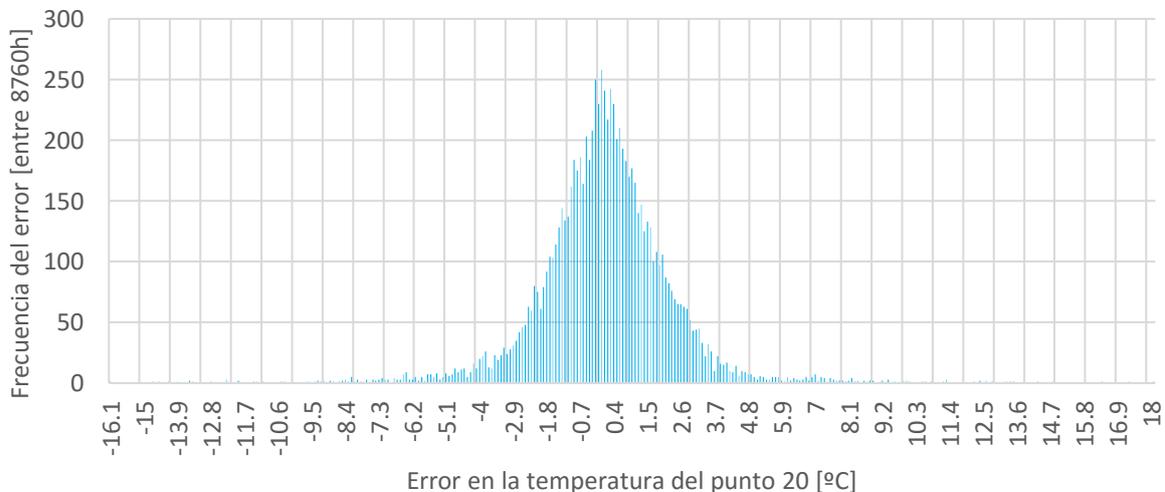
No obstante, aunque los ítems presentados relativos al sistema de condensación auguren la validación del modelo, es importante realizar la visualización e interpretación de la fenomenología reservada al error de la iteración en alguna de las dos variables principales del proceso, para poder asimilar el error asumido en caso de validar el modelo. Tomando por ejemplo el error que se da en la temperatura del punto 20, para cada una de las horas del año y se ordenándolo de menor a mayor, se puede obtener:

Gráfico 21. Error en la temperatura del punto 20 ordenado.



Ahora bien, esa distribución del error puede representarse mediante las herramientas de *Excel* en un histograma, mucho más útil para la emisión de un juicio sobre la caracterización del error. A la vista de este resultado, en que el error menos del 4% de las veces es mayor o igual a 4 °C la hipótesis de considerar que la presión del condensador no varía excesivamente de una hora a otra es aparentemente válida para la aplicación que se va a determinar del modelo y por ende, la validez del modelo matemático del sistema de condensación.

Gráfico 22. Distribución normal del error de la temperatura del punto 20.



Con todo lo comentado relativo a los sistemas modelados en la herramienta ofimática, y la confirmación de la validez de dichos modelos, se confirma la disposición de una herramienta eficaz y contrastada que permitirá realizar el análisis comparativo de las diferentes configuraciones de central solar termoeléctrica, y ofrecer al usuario posterior una herramienta simplificada para tal labor.

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DEL MODELO

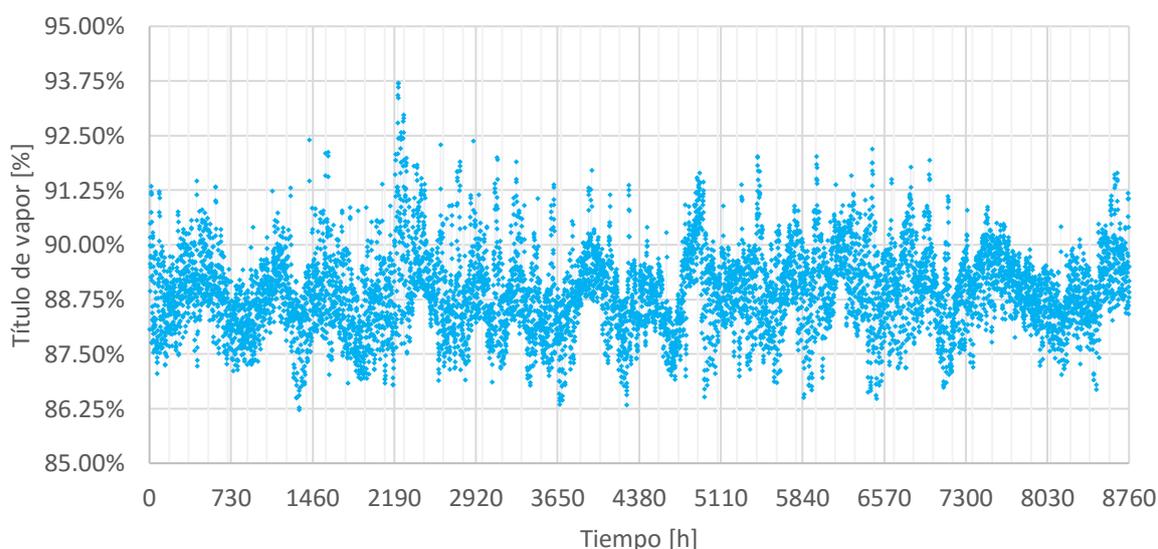
4.1. TRATAMIENTO DEL RECALENTAMIENTO

Una vez que ya se tiene el modelo validado y correctamente implementado en la herramienta ofimática, el primer criterio de análisis será la aceptación o no de la configuración con recalentamiento. Tal como se ha comentado anteriormente, el recalentamiento es una mejora del ciclo de Rankine que permite reducir el desgaste de los álabes en la parte final de la turbina de baja presión, haciendo que el vapor en dicho punto tenga mucho más contenido en vapor que en líquido.

La metodología para saber si se requiere el empleo del recalentamiento será evaluar la operatividad del ciclo de vapor durante todo un año sin la configuración con recalentamiento, y extraer de dicha evaluación el conjunto de valores que toma el título de vapor en el punto 5 del esquema. Si dicho conjunto de valores está en muchos casos del año en un rango aceptable del título de vapor (mayor del 85%-87%), se identificará que no es necesario el uso del recalentamiento en la configuración y geografía determinadas para el trabajo.

La representación de dicho conjunto de valores es la que aparece en la gráfica inferior, y a tenor del rango interpretado anteriormente, se podría asimilar que todos los valores aparecen por encima de dicho valor crítico antes comentado.

Gráfico 23. Variación del título de vapor a la salida de la turbina de baja presión.



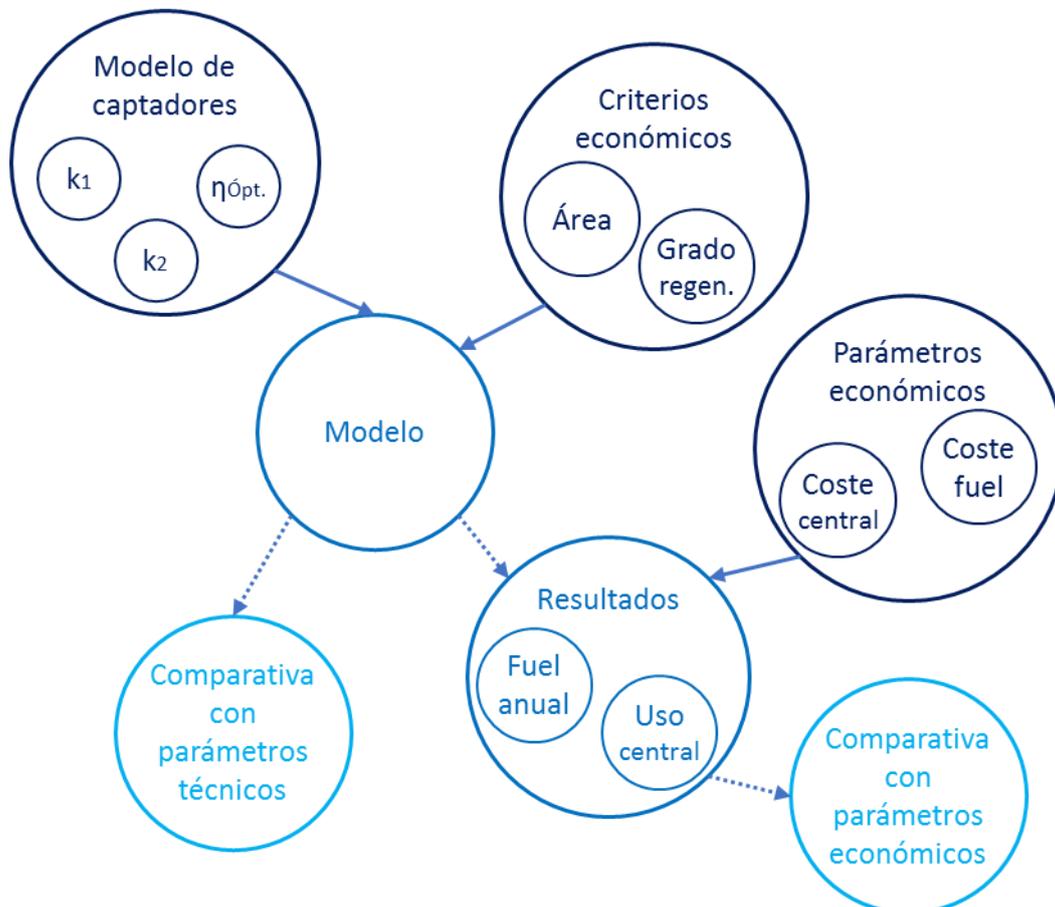
Por tanto, el sistema de recalentamiento empleado se descartará para los siguientes estratos del trabajo, ya que puede obtenerse un título en la franja óptima sin necesidad de aplicación del recalentamiento, que además supondría un sobrecoste económico no despreciable en la aplicación real de la configuración con esta opción.

4.2. METODOLOGÍA DE USO DE LA APLICACIÓN

Si bien los capítulos anteriores han tenido como motivación el desarrollo de una aplicación ofimática que permita la elaboración de métodos comparativos que ofrezcan resultados matemáticos eficaces, los estratos actuales del trabajo serán los que empleen dicha herramienta para elaborar tanto el estudio de sustitución de implantación de una nueva instalación, como la comparativa entre opciones técnicas de las configuraciones termosolares.

En un primer momento se debe entender que la mayor dependencia del modelo es respecto a la calidad y cantidad del modelo de captadores y que el mejor dato resultado para una comparativa económico-técnica será el consumo de combustible de soporte por m^2 de captador solar. Para poder llegar a este valor, el economista o responsable deberá tomar una decisión respecto al área que se tomará optando entre aumentar el coste de la inversión por la calidad o cantidad de captadores; o bien, aumentar el soporte solar, implantando menos captadores o de menor calidad, pero gastando mucho más en combustible de soporte. Además de esta decisión geométrica, deberá valorar en su estudio si el sobrecoste que conlleva la aplicación de un mayor grado de regeneración es suficientemente útil respecto a la no aplicación del mismo. Es decir, hay parámetros económicos de la inversión que tienen una repercusión técnica, y será labor del posterior usuario de la aplicación, mediante los resultados que pueda extraer, como repercuten dichas elecciones económico-técnicas.

Esquema 9. Metodología de estudio de la herramienta.



Por tanto, una vez se tiene definido el alcance comparativo de la aplicación, el procedimiento de comparación efectiva entre opciones tanto de captadores, como de configuración (alto o bajo grado de regeneración) que se recomienda seguir para extraer un análisis eficaz y contrastado, tanto a nivel técnico como económico es el siguiente:

- Situar los parámetros de catálogo en las celdas correspondientes.
- Tomar una decisión económica entre mucha inversión inicial (captadores y regeneración) que reporte bajos costes en el soporte, o poca inversión inicial con un coste elevado anual por el soporte.
- En base a dicha decisión escoger un valor para la superficie (se puede comparar con el catálogo de la comparativa descrita anteriormente) e introducirlo en el modelo.
- Ejecutar el modelo para obtener el consumo de combustible anual y operar con dicho valor los distintos parámetros económicos, respecto al sistema original, otro grado de regeneración u otros modelos de captadores.
- Repetir el proceso con otro modelo de captador solar u otro grado de regeneración.

Para probar la objetividad de este método de comparación efectivo, posteriormente se hará un ejemplo de decisión económica, para la cual está pensado este aspecto de la herramienta ofimática.

4.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN CATÁLOGO DE CAPTADORES

En esta sección se trabajará sobre el rango paramétrico del captador solar comercial descrito anteriormente para obtener un conjunto de comparativas entre un catálogo intencionadamente escogido. El objetivo perseguido en este apartado es obtener conclusiones sobre la relación de los parámetros que formarán los criterios de decisión posteriores, es decir, la relación entre la calidad del modelo, el grado de regeneración y la superficie empleada en el circuito de captación.

La metodología a emplear será la ejecución de la aplicación ofimática sujeta a unas condiciones de catálogo del modelo del captador, es decir, los valores de rendimiento óptico y constantes de pérdidas, variando para cada tipo de modelo la cantidad de superficie de captación en un rango igual para todos los modelos, así como el grado de regeneración para cada superficie estudiada y cada modelo analizado. Por tanto, lo que se pretende es emular la función del responsable del estudio de la distinción de un modelo de captador por encima de los otros, se trabajará la comparativa entre distintos modelos de captadores en aras de la obtención de un valor de consumo de combustible por área para las dos opciones de grado de regeneración, así como la diferencia entre los resultados de estas opciones para ver el comportamiento de dichos modelos ante la variabilidad de dicho parámetro técnico.

En un primer momento es necesario plantear los parámetros del catálogo seleccionado para la comparativa. El catálogo presenta una serie de modelos provenientes de la invención cuyos parámetros han sido situados a propósito; dentro de un rango de catálogo comercial descrito y justificado en el primer apartado de este capítulo. La nomenclatura de los modelos es referente al conjunto de planetas del sistema solar, no por un motivo jocoso, sino para poder identificar la calidad del captador de una manera simple. Así pues, la calidad del captador aumenta cuanto más cerca se encuentre el planeta indicado por el modelo del Sol, siendo *Mercurio* el modelo de mayor calidad, y *Júpiter* el de menor. Cada uno de los planetas es directamente de mayor o menor calidad que los sucesivos, pero no pasa así con los nominados por satélites. Referenciados a un modelo de planeta, los modelos basados en satélites mantienen una característica (o semejante) del planeta relacionado, variando las otras, para visualizar de esta manera modelos que no sean estrictamente de mayor o menor calidad que otros.

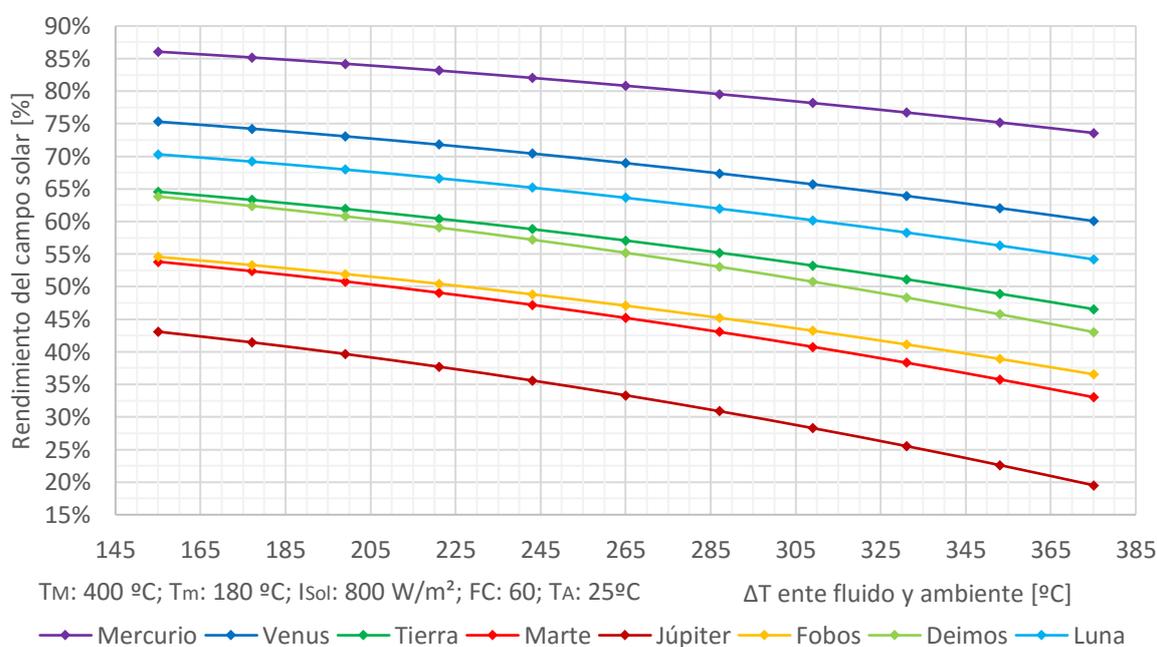
Tabla 10. Conjunto de modelos tomados en la comparativa.

Modelo	k_1 [W/m ² K]	k_2 [W/m ² K ²]	$\eta_{\text{óptico}}$ [%]	Modelo	k_1 [W/m ² K]	k_2 [W/m ² K ²]	$\eta_{\text{óptico}}$ [%]
Mercurio	6	0.04	90	Marte	8.25	0.07	60
Venus	6.75	0.05	80	Fobos	7.5	0.06	60
Tierra	7.5	0.06	70	Deimos	8.25	0.07	70
Luna	6	0.055	75	Júpiter	9	0.08	50

Estableciendo el conocimiento de los modelos descritos, se puede realizar un conjunto de ejecuciones de la herramienta ofimática, para los distintos grados de regeneración y distintos valores de área de captadores que permitan la obtención de gráficos con la visualización simultánea de todas las opciones descritas. Un parámetro característico del captador que suele estar presente en los catálogos es el rendimiento del propio modelo respecto el avance del grado de temperatura del fluido caloportador que circula por el receptor.

La muestra de tal parámetro suele permitir una identificación muy eficaz de cuál es el rango óptimo de temperaturas para cada tipo de captador, o directamente permite comprobar cuán alta es la calidad de un modelo interpretando que cuanto más elevada se encuentre la curva y menos pendiente tenga, mayor será la calidad del modelo, siendo el primer parámetro mayormente dependiente del rendimiento óptico y el segundo, de las constantes de pérdidas. Como se puede apreciar en el gráfico 24, *Mercurio* como modelo de mayor calidad presenta un claro mayor nivel que el resto y una pendiente menos pronunciada (sobre todo si se compara con *Júpiter*).

Gráfico 24. Rendimiento del campo solar comparado de los modelos.



De la misma manera, la diferencia que se puede apreciar entre *Marte* y los modelos basados en sus satélites (que varían entre ellos alguno de los parámetros) evidencia el comportamiento descrito anteriormente. Por una parte, *Fobos*, que debe su modificación a las constantes de pérdidas, parte del mismo punto que *Marte* en la temperatura mínima, mientras que a medida que avanza este parámetro, al tener mayor calidad en las constantes, *Fobos*, presenta una pendiente más horizontal. Por otro lado, *Deimos*, que se diferencia respecto a *Marte* en el rendimiento óptico, sigue su mismo comportamiento pero en un nivel superior marcado por la diferencia de los rendimientos ópticos.

Ahora bien, de los datos extraídos de las ejecuciones puede realizarse la interpretación superpuesta tanto de los niveles de consumo anual por unidad de área y grado de regeneración, como el cruce entre los niveles de regeneración, aportando resultados que permitan la visualización más eficiente de las características dependientes del área y el grado de regeneración.

Gráfico 25. Comparativa del catálogo de modelos para la opción de alta regeneración.

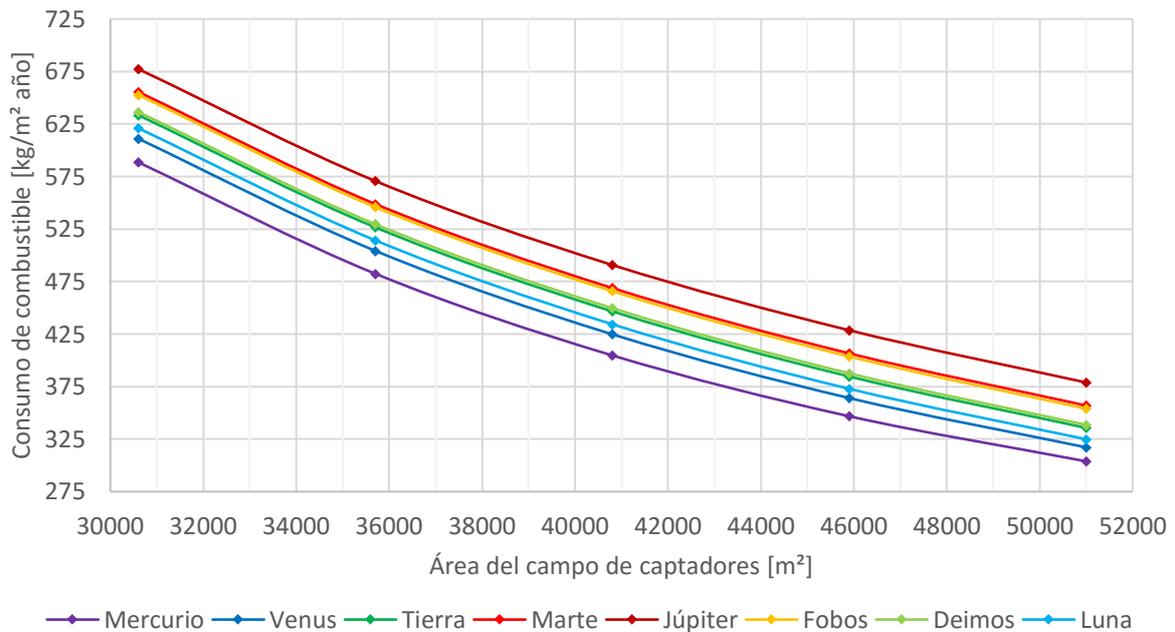
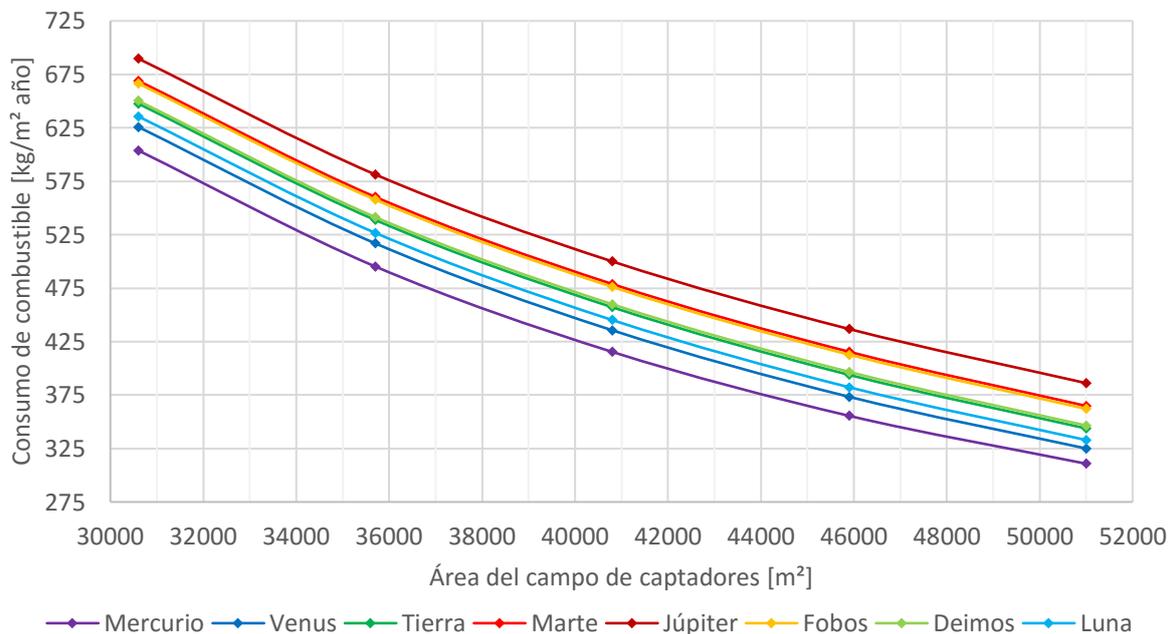


Gráfico 26. Comparativa del catálogo de modelos para la opción de alta regeneración.



De los gráficos planteados no se puede extraer mayores conclusiones que las semejantes a las comentadas en el apartado anterior, y es que evidentemente, a mayor grado de regeneración, menor consumo de combustible por unidad de área, y a mayor calidad del captador, menor consumo; sin importar para el comportamiento de cuánta calidad es mayor un modelo respecto a otro. Lo que no resulta tan obvio analizando los gráficos planteados es la evolución de los modelos entre ambos grados de regeneración, y lo que reporta este ítem técnico de la instalación cuando el área del campo de captadores varía.

Para poder estudiar este efecto de la regeneración respecto del área, será importante añadir nuevos ítems gráficos que permitan un juicio entre ambas opciones. Por ello, se han añadido los gráficos 27 y 28, que representan la diferencia entre el parámetro de consumo y el cociente del mismo entre las opciones de regeneración, respectivamente.

Gráfico 27. Comparativa entre la diferencia de consumo de combustible anual por grado de reg. .

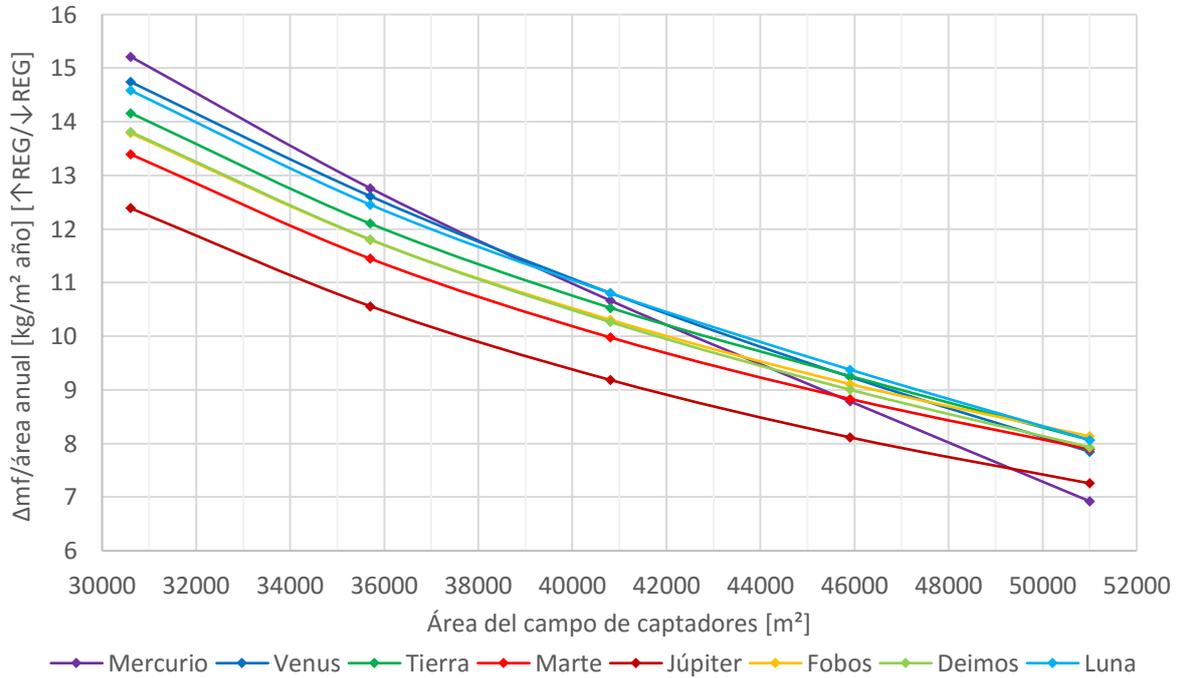
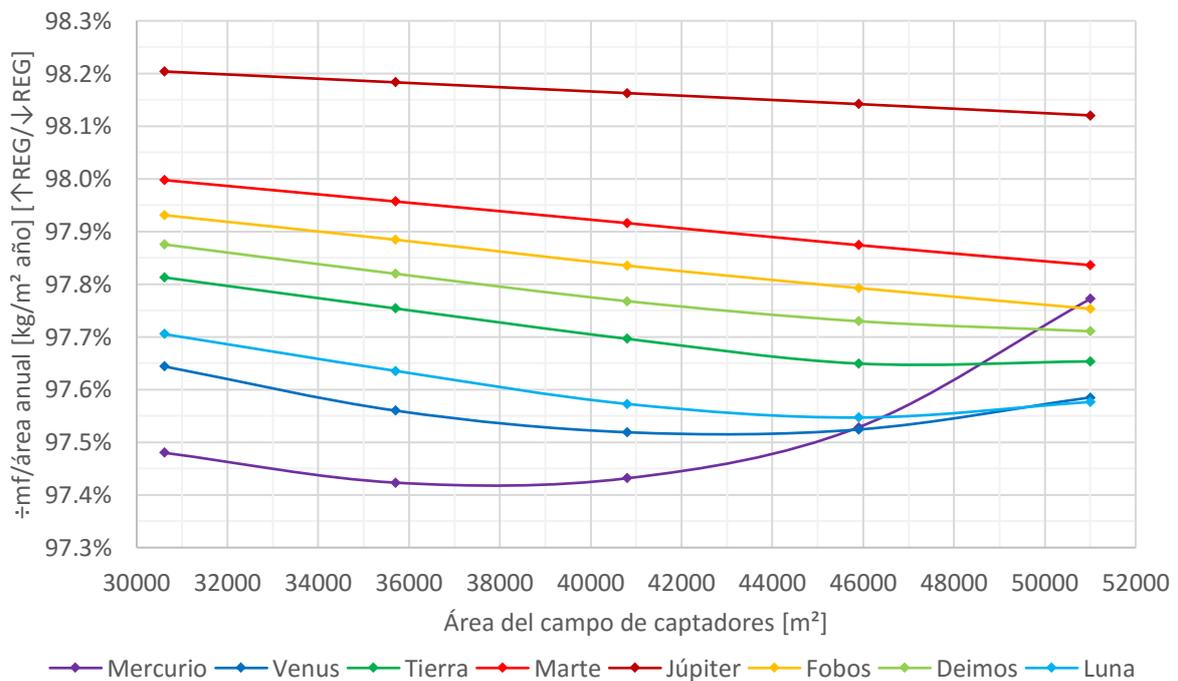


Gráfico 28. Comparativa entre el cociente de consumo de combustible anual por grado de reg..



Se puede comprobar como para la visualización de los efectos conjuntos del aumento del área y del cambio en el grado de regeneración, los efectos de las dependencias paramétricas son muy variados, y que por tanto, merecen una especial atención. Comparar los gráficos de manera separada sería realizar una pérdida de información de uno respecto al otro, por lo que es necesario visualizar los comportamientos de cada modelo para cada área al mismo tiempo en ambas representaciones.

Está claro que el comportamiento para áreas pequeñas (o no muy grandes) la tendencia respecto de la calidad del modelo es que a mayor grado de regeneración más se ahorra en consumo anual. Un comportamiento a priori evidente y que no requiere mayor interés. No obstante, para áreas mayores, el juego cambia. Hay dos modelos cuyo comportamiento es muy dispar: Júpiter y Mercurio, el de peor y mayor calidad respectivamente. Esto lleva a pensar que sea cual sea el comportamiento para áreas grandes, va a ser muy distinto entre extremos de calidad. De hecho se puede confirmar que para baja calidad del captador, el susodicho comportamiento no está presente, y que por tanto, a menores calidades el efecto del aumento del área tiene menor relevancia.

Por ende, si se centra la atención sobre el aumento de la calidad, es apreciable que la diferencia entre los grados de regeneración tiende a apreciarse menos, y es un comportamiento que se acelera en cuanto se aumenta el área y la calidad. En conclusión, para áreas pequeñas el efecto de la regeneración es más eficaz cuanto mayor es la calidad, sin embargo, cuando aumenta el área y la calidad, a mucha mayor variación de la calidad, el efecto tiende a ser el contrario.

4.4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA OPERATIVIDAD EN FUNCIÓN DE REGENERACIÓN Y SUPERFICIE

Será ahora la labor de evaluar distintas configuraciones técnicas de instalación sujetas al mismo modelo de captador y condiciones ambientales, y dejando como variación el grado de regeneración y la longitud del campo de captadores. El objetivo de este apartado será la obtención de criterios de juicio de las distintas configuraciones técnicas, en lo que respecta a grado de regeneración, como parámetro del ciclo termodinámico; y en cuanto a cantidad del campo de captadores, como parámetro del aporte solar. La metodología a emplear consiste en variar para un único modelo de captador los parámetros de superficie de captación y grado de regeneración, para estudiar de ellos resultados de la ejecución anual que van más allá de la información del consumo del combustible de soporte.

En un primer momento se hace importante la nominación del modelo de captador usado. Para este apartado, se ha utilizado un modelo con las características indicadas en la tabla 11, que por semejanza, podría tratarse de un colector tipo cilindroparábólico, ya que el rendimiento óptico es sustanciosamente elevado.

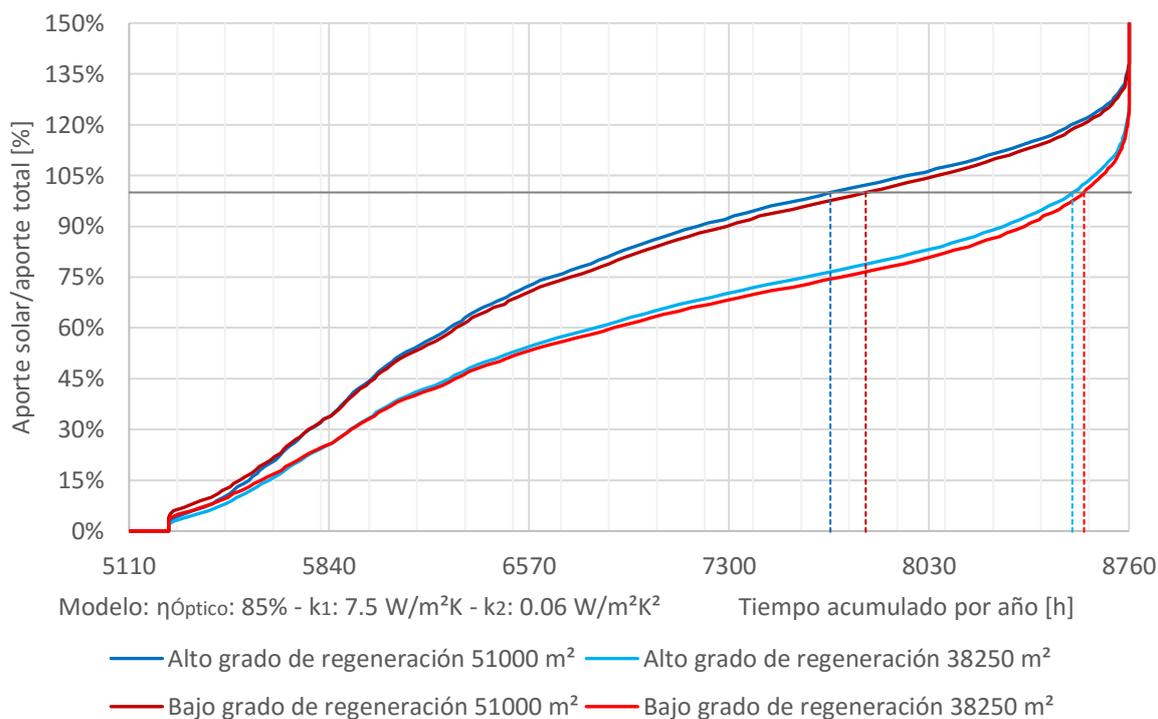
Tabla 11. Características del modelo de captador usado en el análisis de casos anuales.

FC	k_1 [W/m ² K]	k_2 [W/m ² K ²]	$\eta_{\text{Óptico}}$ [%]	d [m]
60	7.5	0.06	85%	0.085

Posteriormente se ha de tener en cuenta que los resultados a analizar son extraídos del cálculo para todo un año, por lo que no tiene sentido analizarlos individualmente. En otro orden, las opciones que se van a comparar representan casos extremos de configuración, por lo que la diferencia cuantiosa entre los resultados está justificada. Estas opciones abarcan desde un campo de captadores muy ajustado hasta uno considerablemente sobredimensionado, presentando las dos modalidades de regeneración. Por tanto, se compararán las opciones de *alto grado de regeneración*, 51000m² y 38250m²; y *bajo grado de regeneración*, 51000m² y 38250m². Tras las consecutivas ejecuciones para todo el año de la aplicación, los resultados obtenidos pueden diferenciarse en la tabla indicada:

Tabla 12. Resultados de la comparativa anual.

Resultado	↑ regeneración 51000 m ²	↑ regeneración 38250 m ²	↓ regeneración 51000 m ²	↓ regeneración 38250 m ²
Consumo fuel [kg/año]	15.968.338	17.423.850	16.341.608	17.861.387
Rendimiento medio [%]	25,8%	26,5%	25,4%	26,0%
Aporte solar [kWh/año]	77.349.147	58.351.388	78.164.648	59.040.035
Aporte soporte [kWh/año]	156.010.706	169.610.846	162.064.198	176.531.062
Excedente solar [kWh/año]	4.347.059	449.730	3.784.369	350.691
Tiempo con excedente [h]	1.090	207	961	164

Gráfico 29. Comparativa del aporte solar respecto del aporte total anual.


A la vista de los resultados se pueden tomar muchas consideraciones, pero en general todas giran alrededor del efecto de la regeneración y del efecto de aumentar o disminuir el tamaño del campo de captadores. En un primer momento, atendiendo a la tabla 12, de resultados numéricos, es fácil intuir que la mayor variabilidad se da cuando entre las opciones cambia el tamaño del campo de captadores, o al menos es una variabilidad más significativa. Esto se debe a que la implantación de la configuración con regeneradores de superficie está pensada para aumentar la eficiencia del ciclo, y no los parámetros que lo componen. Por tanto, una primera conclusión invita a dejar de lado el empleo de un alto grado de regeneración, pues a la vista está que las curvas de comportamiento prácticamente se solapan.

No obstante, no es recomendable dejar de lado el estudio en lo que a regeneración se compromete, ya que si bien se puede observar que se da una mejora del 0.5% en el valor del rendimiento medio, atendiendo al gráfico 29, el número de horas en las que se produce excedente aumenta mucho más entre grados de regeneración cuando se tiene un mayor área, por lo que en los análisis que se comentarán posteriormente, este ítem recientemente descrito podría significar un criterio de decisión.

En lo restante a lo que parámetros resultado se refiere, está claro que utilizar una superficie menor puede mejorar el rendimiento dado que se desaprovecha menos calor de aporte solar, pero conlleva un aumento en el consumo de combustible de soporte nada despreciable, así que será cuestión del analista encargado llegar a un compromiso referente al área del campo de captadores, a tenor de los resultados expuestos en este apartado. Un posible enfoque superior sería dejar de considerar el grado de regeneración tomando el bajo, dada la poca variabilidad que se puede observar; no obstante, se hace necesaria dicha consideración dual cuando se tengan a disposición del analista datos de inversión e infraestructura económica de lo que pueda suponer la instalación de los regeneradores; así como del coste del área del campo de captadores.

4.5. ANÁLISIS COMPARATIVO ANUAL CON EJEMPLO DE APLICACIÓN ECONÓMICA

Como último análisis pretendido, se establecerá de manera ejemplificativa cómo se desarrollaría el caso de la aplicación con datos económicos, que por la dificultad de adquisición de los mismos, serán estimados para el desarrollo del apartado.

El objetivo es obtener un juicio crítico de la operatividad de la central termosolar con una determinada configuración técnica respecto al sistema que solo emplea la combustión de combustible como aporte calorífico, lo que podría ser identificado con el sistema previo a la implantación de la central termosolar.

Para lograr este objetivo se trabajará con distintas configuraciones de central y parámetros económicos con los que se pueda elaborar la obtención de un valor de periodo de retorno de la inversión de una determinada configuración de planta termosolar, respecto de la inversión y coste anual relacionados con la planta de solo *fuel-oil*. Se pretende demostrar mediante la obtención de dicho valor cómo se emplea la herramienta ofimática para el estudio del propio parámetro, para varios modelos de captador, los dos grados de regeneración planteados y la variabilidad de la superficie de captadores.

En un primer instante, se tomará la estimación de los parámetros económicos que se ven involucrados en el estudio, con mayor o menor aproximación a la realidad, pero únicamente útiles para este fin académico:

Tabla 13. Parámetros económicos estimados de la inversión.

Coste fijo de la inversión [€]	120.000.000
Coste de implementar regeneración [€]	12.000.000
Precio del fuel-oil [€/kg]	0,35

En un primer instante será necesario realizar la elección varios modelos de captadores ya que la pretensión es comparar el efecto de la calidad del captador respecto del resto de parámetros y visualizar la variabilidad que ésta ejerce sobre otros resultados. Para el caso estudiado, las centrales termosolares de foco distribuido, la mejor comparativa que se puede realizar es entre un modelo de captador cilindroparabólico y un modelo tipo Fresnel. Siguiendo los parámetros de catálogo descritos anteriormente, las posibles características de los distintos modelos serían las siguientes:

Tabla 14. Catálogo del captador escogido para el ejemplo numérico.

Modelo	k_1 [W/m²K]	k_2 [W/m²K²]	$\eta_{\text{Óptico}}$ [%]	Coste [€/m²]
Cilindroparabólico	4.8	0.032	80%	1500
Fresnel	5.7	0.041	60%	800

El siguiente paso de este estudio económico ficticio es la elección de la superficie del campo solar. Es un parámetro particularmente crítico, pues a mayor área, mayor coste de inversión, pero también menor coste anual por combustible de soporte. Es decir, destacando los resultados del apartado 4.4, la mayor variabilidad técnica la reporta la superficie del campo de captadores, y por tanto, dado el carácter comparativo tanto de este apartado, como del trabajo, es importante seleccionar con criterio el área que se quiere estudiar. Para abarcar una decisión más eficaz, se propone el estudio de dos niveles de superficie, y por coincidir con el estudio elaborado en el apartado 4.4, serán 38250 m² y 51000 m².

No obstante en esta elección debe regir la identidad de la realidad, así que en el caso real de comparativa entre opciones, el economista responsable o técnico que use la aplicación para su propia comparativa, deberá asimilar que el sentido que se le está dando a tomar este rango es académico. En la realidad, no tiene sentido aparente comparar el uso de mucha superficie de un captador de buena calidad con poca área de captación de un modelo de baja calidad, pues tal y como se puede comprobar en el apartado 4.3, en el caso de baja regeneración, para obtener un mismo consumo anual, solo hacen falta 32000 m² de un captador de alta calidad (*Mercurio*), frente a los 36000 m² que se requerirían de uno de baja calidad (*Júpiter*). Sin embargo, dado el carácter académico del estudio, se pretenderá mantener la variabilidad del área para los dos modelos de captadores con el ánimo de estudiar para cada tipo de captador como sería el comportamiento paramétrico a distinto nivel de área, que es consecución de las ideas planteadas en los apartados anteriores.

Dado que ya se conoce el conjunto de variables económicas (escogidas arbitrariamente con el único pretexto de servir numéricamente) y los parámetros de configuración técnica, ya se está en disposición de ejecutar el modelo para la propia obtención de datos.

Tabla 15. Resultados anuales de la comparativa.

		Alto grado de regeneración		Bajo grado de regeneración	
		51000 m ²	38250 m ²	51000 m ²	38250 m ²
Modelo cilindroparabólico	Fuel soporte [kg/m ² año]	312,17	455,66	320,17	467,81
	Inversión total [€]	208.500.000	189.375.000	196.500.000	177.375.000
	Inversión captadores [€]	76.500.000	57.375.000	76.500.000	57.375.000
	Consumo actual [€/año]	5.572.235	6.100.148	5.715.035	6.262.806
Modelo Fresnel	Fuel soporte [kg/m ² año]	347,81	497,18	356,46	508,85
	Inversión total [€]	172.800.000	162.600.000	160.800.000	150.600.000
	Inversión captadores [€]	40.800.000	30.600.000	40.800.000	30.600.000
	Coste fuel [€/año]	6.208.409	6.655.997	6.362.811	6.812.229

Para poder visualizar de una manera efectiva la interpretación de los resultados obtenidos en la tabla 15, tanto por operatividad económica como ejecución de la herramienta ofimática, se debe identificar el parámetro de comparativa individual de cada uno de ellos, es decir, respecto a que se quiere evaluar cada una de las configuraciones. Anteriormente se ha descrito que se podría obtener un parámetro de juicio económico cuando cada una de las configuraciones se compara con la configuración sin campo de captadores, es decir, cuando todo el aporte se da por la operatividad de la caldera. La interpretación que se le da a este parámetro es el periodo de retorno de la inversión, concebido como el instante en el que la inversión inicial y coste anual acumulado de la configuración termosolar sea inferior a la suma del coste anual acumulado (debido al combustible de soporte) y la inversión de la central. Es importante destacar que el central de *fuel-oil* con el que se compara cada configuración tendrá el mismo grado de regeneración que la central con la que se compare.

Gráfico 30. Comparativa económica: 51000m² - Alto grado de regeneración.

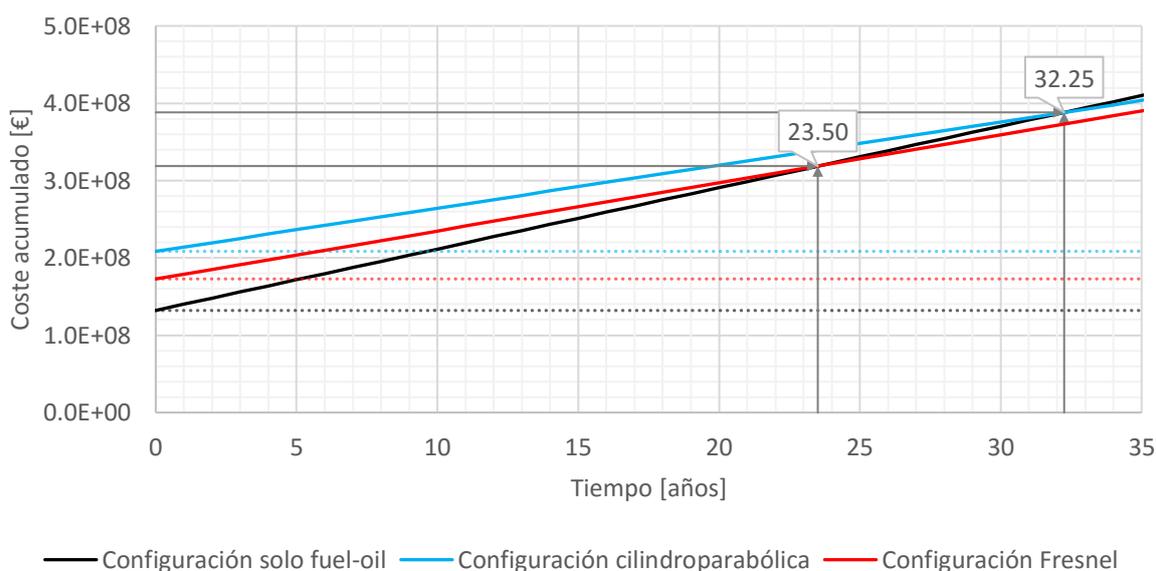


Gráfico 31. Comparativa económica: 38250m² - Alto grado de regeneración.

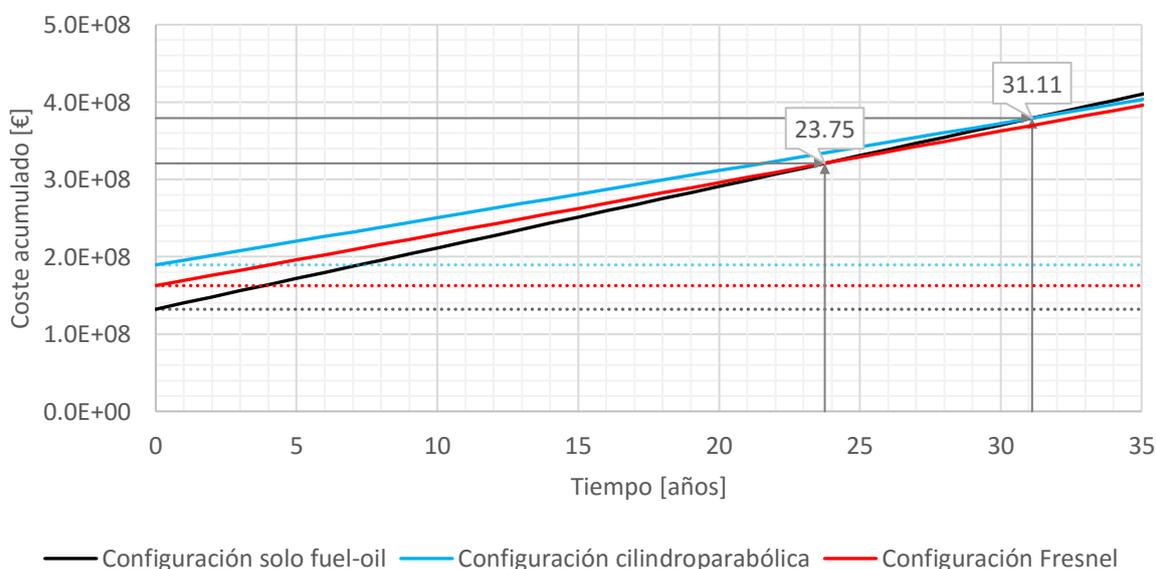


Gráfico 32. Comparativa económica: 51000m² - Bajo grado de regeneración.

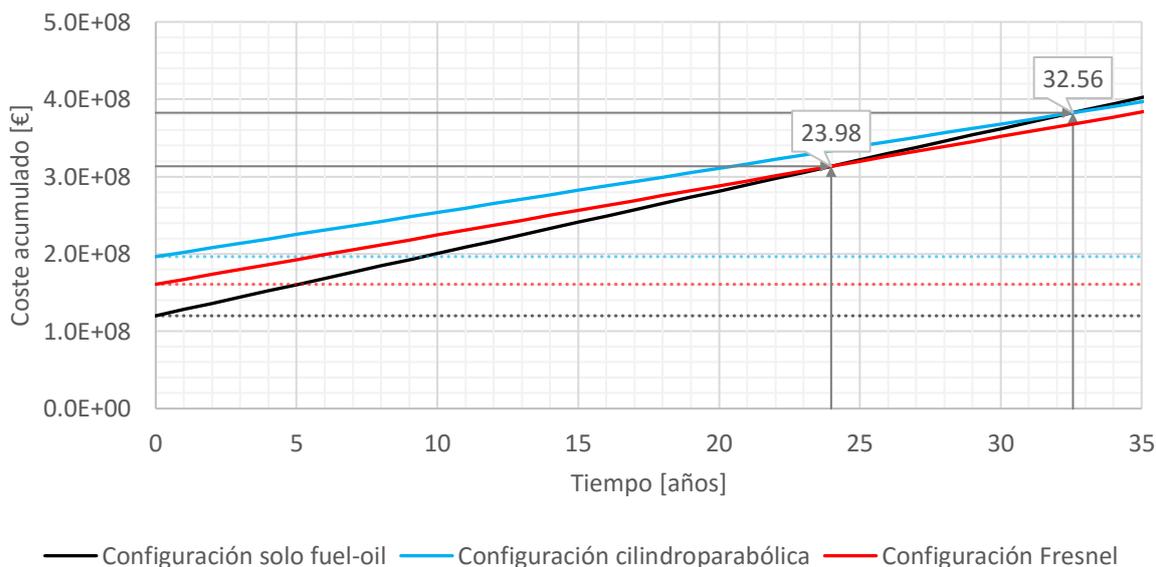
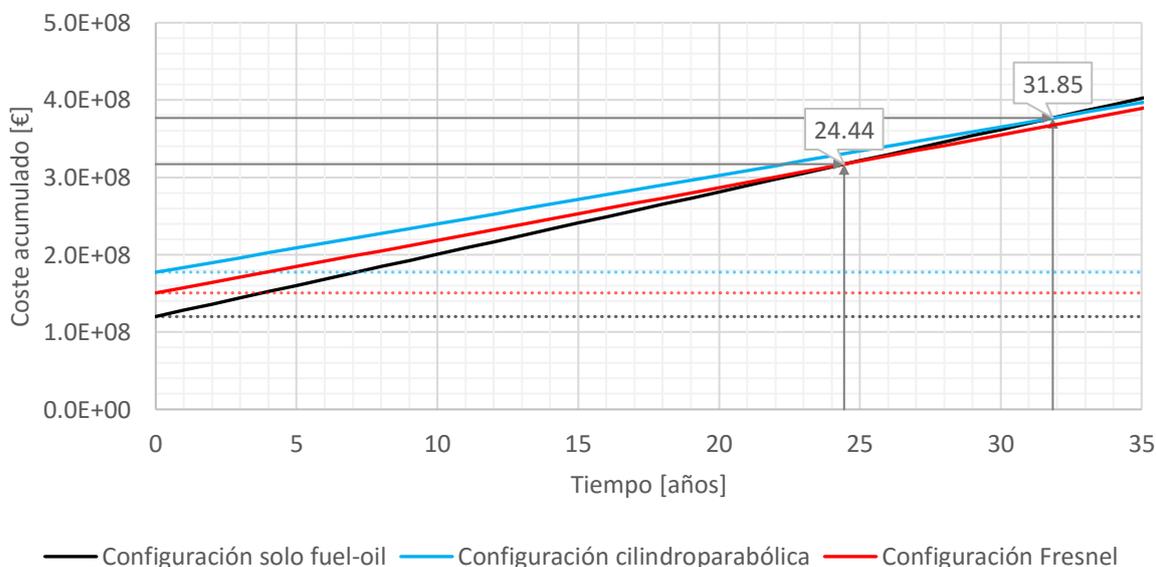


Gráfico 33. Comparativa económica: 38250m² - Bajo grado de regeneración.



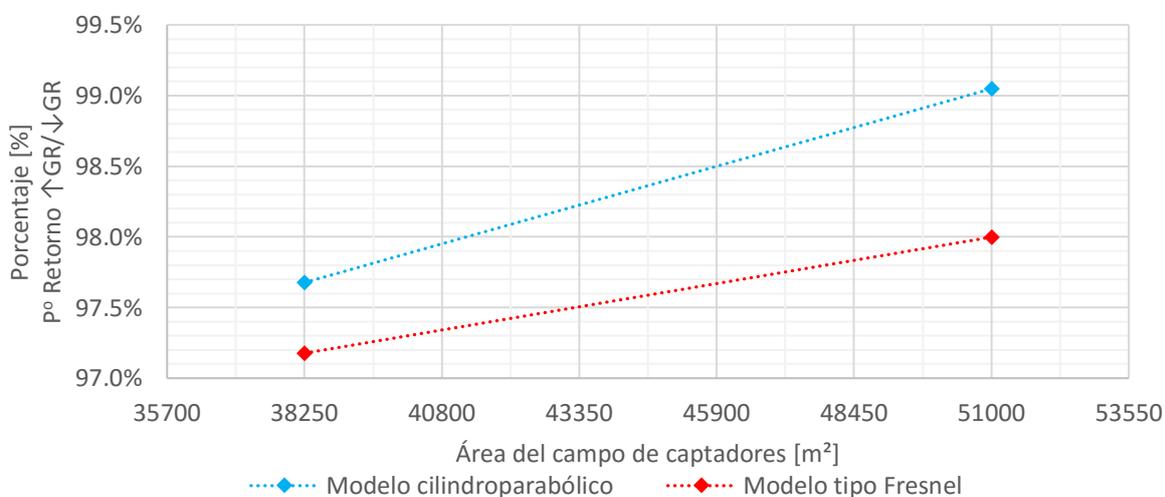
Una vez se dispone del valor de juicio económico de las distintas opciones, se entenderá que la metodología de desarrollo del apartado ha culminado y que por tanto se está en disposición de efectuar el juicio tanto de las configuraciones termosolares respecto de la configuración solo *fuel-oil*, como entre ellas mismas.

Para la interpretación de las conclusiones de este estudio comparativo se realizarán diversas referencias a las conclusiones obtenidas en los apartados anteriores, especialmente el 4.3, pues el comportamiento de los resultados es prácticamente el mismo, evidenciando de esta manera la correspondencia del modelo.

La primera interpretación que llama la atención es el efecto de la calidad sobre el periodo de retorno considerado. Asumiendo el coste tomado para los dos tipos de captadores y el coste del combustible, para el orden de magnitud de la potencia en la que se está trabajando, se prefiere el empleo de captadores de menor calidad que requieran una menor inversión inicial pero mayor coste anual a la instalación de captadores de mayor calidad que produzcan un menor coste anual de combustible pero que aumenten la inversión. Este efecto se da principalmente por dos motivos: el efecto que tiene la calidad del modelo sobre el consumo de combustible de soporte y la diferencia entre el coste de m^2 entre los modelos de distinta calidad. El primer efecto se puede identificar como poco representativo entre modelos de distinta calidad, o al menos no tan crítico como el coste de la unidad de superficie instalada, que será mucho más interesante en lo que a balance económico respecta. En resumen, para el conjunto de datos técnicos y económicos tomados, es preferible usar captadores de menor calidad porque el periodo de retorno estudiado es notablemente menor respecto a los de mayor calidad dado que la inversión inicial de la central es más relevante que el coste anual del combustible de soporte, comparado con una planta que solo utilizara *fuel-oil* para las mismas condiciones de operación.

Por otra parte, y en consonancia con los resultados del apartado 4.3, se pretende en las siguientes líneas efectuar un juicio respecto de la conjunción de los efectos de la calidad del modelo, el grado de regeneración y la cantidad de superficie empleada de captación solar. En el apartado mencionado se tenía que para áreas no elevadas, el efecto de la regeneración era más notable para captadores de mayor calidad, mientras que para áreas elevadas, cuanto mayor es la calidad del captador, el efecto se torna del revés y elevar la regeneración pierde interés en contra de ganarlo (sí lo ganaría con captadores de baja calidad). Aplicando dichas referencias el caso que se interpreta, los efectos de dicha fenomenología se pueden evidenciar si se estudia el parámetro del periodo de retorno. Tal como se aprecia en el gráfico 37, interpretando que cuanto más cerca esté el valor porcentual entre los grados de regeneración del 100% menor importancia tendrá la regeneración, interpretando únicamente los dos valores de área estudiados y la recta representada como la tendencia del comportamiento entre ambos valores y no el rango entre ellos, se evidencia que el aumento del grado de regeneración pierde aún más interés cuanto mayor sea la calidad del captador empleado y la cantidad del mismo.

Gráfico 34. Cociente del periodo de retorno del alto grado de regeneración entre el del bajo por área.



No obstante, pese a que se esté despreciando el uso de un mayor grado de regeneración, el parámetro tomado como periodo de retorno sigue siendo más favorable en los casos en los que la configuración contempla un mayor grado de regeneración. Este hecho se debe a que la inversión que se ha supuesto para la instalación de los regeneradores de superficie (10% del total de la inversión de la planta) no represente un sobre coste excesivo como para que la diferencia que provoca en el coste anual por combustible de soporte permita que cuando se dé dicha inversión extra, el ahorro respecto a no realizarla sea mayor que el efecto de la inversión extra. Por tanto, una vez el responsable económico posterior tenga datos efectivos económicos, deberá reinterpretar este resultado, pues puede ser que una inversión mayor en el sistema de regeneración por superficie implique un mayor periodo de retorno respecto a la situación en la que no se realice dicha inversión.

Por último, habiendo incidido ya sobre el efecto de la calidad del captador y el grado de regeneración, será importante emitir un juicio adicional respecto al tercer ítem de variación de las distintas configuraciones, correspondiente a la superficie empleada de heliostatos. Es ahora cuando la toma de un rango de superficies amplio recibe mayor importancia, pues se puede ver con mayor apreciación la relación entre el área y la calidad del modelo; en contra de haberse ceñido a la realidad y haber estudiado el modelo de mayor calidad con un valor de área menor que el otorgado al modelo de menor calidad. No obstante, la repercusión que se extrae al estudiar los parámetros de retorno de la inversión para un nivel de calidad entre los distintos valores de superficie es precisamente la validación del comportamiento que se da en la realidad. Tomando el modelo cilindroparabólico, cuanto menor es la superficie, menor es el periodo de retorno en cualquiera de los grados de regeneración. Sin embargo, en el modelo tipo Fresnel, cuanto mayor es el área de captación, menor es el periodo de retorno. En conclusión, se evidencia que cuanto mayor es la calidad del modelo menor es la necesidad de área de captación, y viceversa.

En otro orden de cosas, ahora que se tiene consciencia del comportamiento del parámetro utilizado, para las distintas configuraciones, sería muy provechoso poder diseñar algún método con el que se fuera capaz de encontrar un criterio de decisión entre las distintas configuraciones. Sin necesidad de realizar mayor criterio económico que la búsqueda de un periodo de retorno (o la compresión que se ha dado de él) óptimo en función de la inversión. La variabilidad de la inversión se da básicamente por la calidad y la cantidad de captadores solares, así que se deberá interpretar, para distintos valores de inversión un periodo de retorno, en la modalidad del campo de captadores cilindroparabólico y del tipo Fresnel.

Habiendo establecido esta metodología de conclusión del parámetro económico estudiado (aunque el posterior economista de la fase de proyecto pueda utilizar otro) y realizando el propio análisis, emulando la función del ingeniero de la energía encargado de esta fase del anteproyecto, no solo se podrá entregar una aplicación ofimática útil, sino que también se habrá demostrado su validez al poder lograr un ejemplo económico aplicado a una localización concreta: la isla de El Hierro.

En las siguientes gráficas se presenta de manera independiente del área el periodo de retorno que se tendría en función de la inversión realizada, para los dos grados de regeneración planteados y los dos modelos estudiados.

Gráfico 35. Periodo de retorno en función de la inversión y la calidad – Alta regeneración.

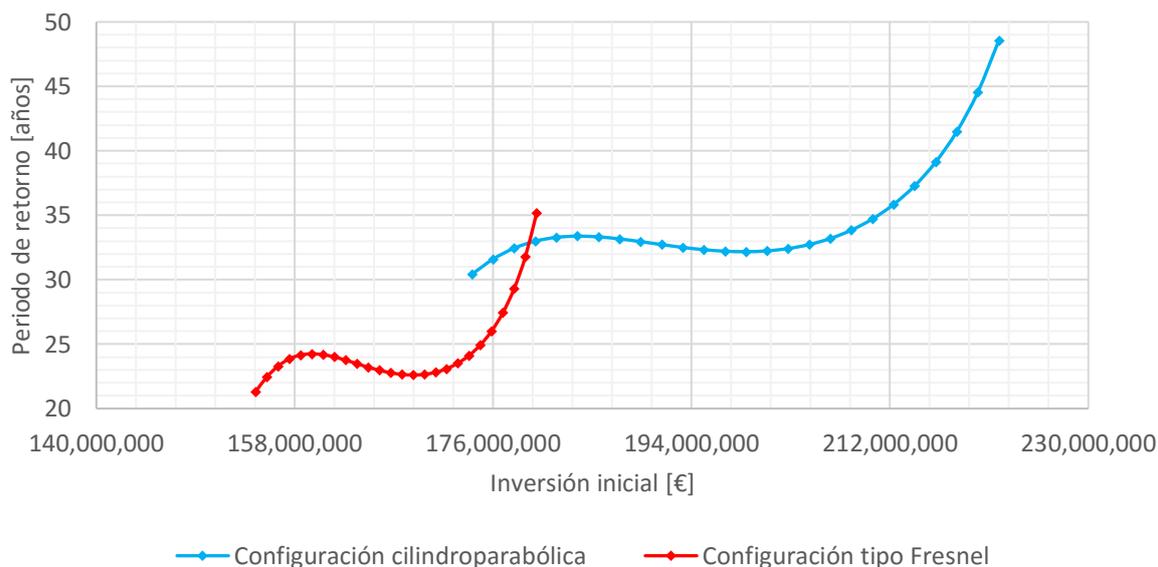
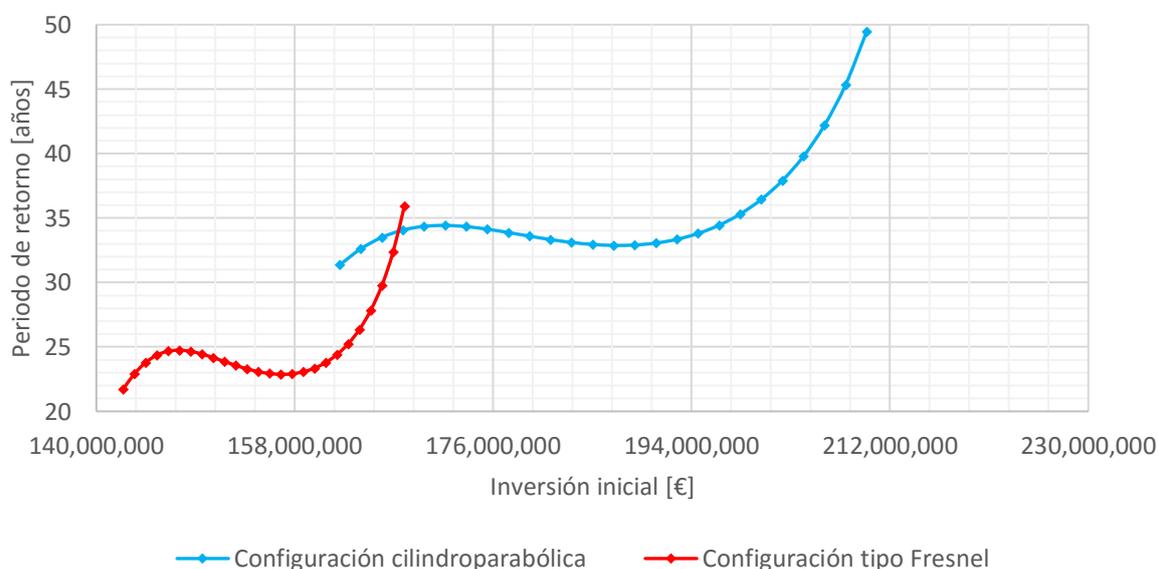


Gráfico 36. Periodo de retorno en función de la inversión y la calidad – Baja regeneración.



El primer criterio que se extrae es que, para el contexto geográfico, técnico y económico planteado, la regeneración no presenta una elevada mejora respecto a la inversión extra, conclusión contrastada anteriormente. Sin embargo, no solo de la regeneración dependen estos resultados. Atendiendo ahora al gráfico de baja regeneración, que es sobre el que se va a discutir consecutivamente, se encuentra el mismo patrón de comportamiento para las centrales basadas en los dos modelos indicados. La forma del comportamiento indica que para inversiones pequeñas, en las que se instalarán pocos captadores, la inversión es tan baja, que pese a que haya más costes anuales por el combustible de soporte, estos no representarían ningún efecto sobre la inversión.

Sin embargo, este comportamiento se agrava hasta que se compaginan los dos efectos buscados: por una parte, el consumo anual se reduce al aumentar la cantidad de captadores, pero como no se ha aumentado tanto como para significar una gran inversión, los costes se recuperan antes. Posteriormente, se seguirá obteniendo un coste anual menor, pero la inversión resulta tan elevada que este efecto nunca se ve compensado. Huelga decir que no se han tomado valores de inversión menores puesto que el área de captadores sería tan pequeña que la central perdería su carácter termosolar más soporte por caldera, para pasar a ser caldera convencional con soporte termosolar, y no es el carácter del trabajo.

Por tanto, a la vista de los gráficos y del comentario realizado, de los dos mínimos encontrados ambos serían puntos óptimos por ser el menor tiempo de retorno. Sin embargo, entre tomar un valor de inversión u otro hay una distinción. Si la vida útil de la central, supera ampliamente el periodo de retorno, la idea sería tomar el segundo mínimo, pues en esos largos años en los que estaría operando la central tras superar el periodo de retorno, el coste anual por el combustible de soporte sería menor que en el caso del mínimo con la menor inversión, pues sí se consigue antes (o con el mismo tiempo), pero el coste anual es mayor, y en los años posteriores se tendrían muchos costes debidos al combustible. Lo que no pasaría si la vida útil fuera cercana al periodo de retorno, en que el efecto negativo comentado no se daría temporalmente apenas.

Una vez ya se ha establecido un criterio respecto al óptimo periodo de retorno, se debe interpretar qué modelo de captador sería el mejor para el caso de la planta de 12 MW situada en la isla de El Hierro. Las gráficas pueden traducirse en este aspecto como que para pequeñas potencias nominales, los menores periodos de retorno se consiguen con más captadores de menos calidad; es decir, importa más la calidad que la cantidad. Sin embargo, para otro tipo de plantas termosolares más grandes, en las que importe mucho más el recurso solar, quizá sea más importante tener un campo de captadores ajustado, pero de mejor calidad.

Volviendo al caso planteado, realizar una mayor inversión en cantidad que en calidad parece ser la decisión acertada, pues aunque los captadores tipo Fresnel necesiten más superficie para producir la misma energía que un heliostato cilindroparabólico, para la potencia nominal estudiada, esa sobreinversión en área no se ve reflejada en el coste que cada m^2 tendrá.

En conclusión, tomar como parámetro de juicio económico-técnico el periodo de retorno entendido como el tiempo que es necesario para que el coste acumulado anual de una determinada configuración termosolar sea menor que el que se diera en una central con las mismas características pero que solo aportara calor al ciclo mediante combustible, con los criterios económico-técnicos establecidos (inversión, coste de captadores, potencia nominal de la planta...) es una buena decisión, ya que se pueden extraer conclusiones respecto a los tres parámetros principales de variabilidad entre configuraciones: calidad del modelo de captador empleado, grado de regeneración de la central y superficie de captación solar.

4.6. CONCLUSIÓN DE LA APLICACIÓN DEL MODELO PARA EL CASO PLANTEADO

Con el ánimo de aunar los resultados establecidos en los distintos apartados de este capítulo, y para probar que la aplicación o modelo desarrollado es efectivo para poder tomar una decisión económico-técnica de la posible implantación de una central solar termoeléctrica en el contexto de la isla de El Hierro, un resumen de los resultados de los análisis podría ser el siguiente:

- No se empleará recalentamiento, pues la configuración del ciclo termodinámico permite que el título de salida de la turbina de baja presión sea superior al rango de no criticidad establecido generalmente, y no se hace falta precalentar la salida de una turbina antes de la entrada de la otra, ahorrando complicaciones técnicas y económicas.
- El grado de regeneración será mínimo, pues solo se utilizará el regenerador de mezcla entre ambas partes de la turbina. El rendimiento termodinámico del ciclo no se ve excesivamente afectado por este hecho, pues la media anual de dicho parámetro no se ve más mejorada que cerca del 1%, y puede que este término no sea relevante para el análisis económico de la instalación. No obstante, el hecho de reducir el rendimiento termodinámico equivale a aumentar el del campo de captadores, por lo que de alguna manera, los efectos se compensan.

Tabla 16. Muestra del efecto regeneración-rendimiento.

Modelo captador:	$\eta_{\text{Óptico}}$: 85%	k1: 7.5 W/m ² K	k2: 0.06 W/m ² K ²
Alto grado de regeneración		Bajo grado de regeneración	
$\eta_{\text{Campo solar medio}}$ [%]	$\eta_{\text{Ciclo vapor medio}}$ [%]	$\eta_{\text{Campo solar medio}}$ [%]	$\eta_{\text{Ciclo vapor medio}}$ [%]
68.96%	24.79%	70.62%	25.59%

- Será preferible usar más área de captadores de no elevada calidad, pues para el nivel de potencia nominal los parámetros económicos apuntan a que se conseguirá un mejor razonamiento de la inversión si se prioriza la cantidad sujeta a la calidad. Además, la inversión será mayor si se pretende compensar el consumo de combustible anual, hasta cierto punto en que ambos efectos se aúnen.

En definitiva, se ha presentado el modelado y análisis de una central solar termoeléctrica sujeta a unas condiciones geográficas, técnicas y económicas (a título académico); y pese a que solo sea una parte del anteproyecto de una posible planta de generación, se puede confirmar que sería una central sin recalentamiento, con poca regeneración y en la que se invertiría en la cantidad del campo de captadores solares, no en su calidad. Además, se provee de una aplicación y modelado matemático eficaz que permite un mayor rango de estudio, pero no relativo a este trabajo.

CAPÍTULO 5. REFERENCIAS

5.1. TEMARIO

Expresión gráfica (12933)	– Curso 2012/13
Responsable de la asignatura:	Carmen Ortíz Ultrillas.
Termodinámica (12942)	– Curso 2013/14
Responsable de la asignatura:	Manuel Monleón Pradas.
Transmisión de calor (12943)	– Curso 2013/14
Responsable de la asignatura:	José Manuel Pinazo Ojer.
Termodinámica técnica (12941)	– Curso 2014/15
Responsable de la asignatura:	José Luis Gómez Ribelles.
Energías renovables térmicas (12962)	– Curso 2014/15
Responsable de la asignatura:	Carla Isabel Montagud Montalvá.
Máquinas hidráulicas y transporte de fluidos (12950)	– Curso 2014/15
Responsable de la asignatura:	Francisco Arregui de la Cruz.
Máquinas térmicas (12953)	– Curso 2014/15
Responsable de la asignatura:	José Javier López Sánchez.
Combustión y generación de calor (12951)	– Curso 2014/15
Responsable de la asignatura:	Raúl Payri Marín.
Proyectos (12945)	– Curso 2014/15
Responsable de la asignatura:	Luis José Amendola.
Centrales térmicas. Cogeneración (12959)	– Curso 2015/16
Responsable de la asignatura:	Jean Joseph Pierre Arregle.
Eficiencia energética de edificios (12979)	– Curso 2015/16
Responsable de la asignatura:	Emilio José Sarabia Escrivà.
Gestión y planificación energética (12969)	– Curso 2015/16
Responsable de la asignatura:	Juan Carlos García Díaz.

5.2. BIBLIOGRAFÍA

Termodinámica técnica – *Editorial UPV* – 2002

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

Formulario y tablas de estadística – *Editorial UPV*

DEIOAC.

5.3. PÁGINAS WEB

EFE-Verde – La isla de El Hierro abastecida al 100% con energías renovables

<http://www.efeverde.com/noticias/isla-hierro-energias-renovables/>

Energy.gov – Office of Energy Efficiency & Renewable Energy

<http://energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>

Energy Plus – Weather Data by Region: Spain

https://energyplus.net/weather-region/europe_wmo_region_6/ESP%20%20

Gorona del Viento – El Hierro

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

OMIE – Resultados del mercado ibérico de la electricidad

<http://www.omie.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>

REE – Demanda energética en tiempo real en la Península ibérica

<https://demanda.ree.es/demanda.html>

REE – Demanda energética en tiempo real en la isla de El Hierro

<https://demanda.ree.es/visionaCan/VisionaHierro.html#>

Mitsubishi heavy industries – Catálogo de la serie KU30A

https://www.mhi-global.com/products/pdf/ku30a_en.pdf

JETRO México – Introducción de motor diésel y motor a gas Serie KU Mitsubishi

https://www.jetro.go.jp/mexico/topics/20080514884-topics/04_Mitsubishi_Heavy_Industries_spa_rev2.pdf

Chakravarthi – Suministrador de la turbina modelo escogida

http://www.srichakravarthi.com/steam_turbines.html

SIEMENS – Catálogo de turbinas para sistemas termosolares

http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-generation/steam-turbines/downloads/E50001-W410-A105-V1-4A00_Solarbroschuere.pdf

Sopo Titan – Catálogo de colectores cilindroparabólicos

<http://www.environmental-expert.com/downloads/sopotitan-parabolic-trough-solar-collector-data-sheet-293997#?>

Central Energía – Potencial solar de Chile

<http://www.centralenergia.cl/2010/10/12/potencial-solar-de-chile/>

Wikipedia – PS10

<https://es.wikipedia.org/wiki/PS10>

PSA – Laboratorio de envejecimiento acelerado y durabilidad de materiales

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

DENA – Centrales termosolares - Introducción

<http://www.renewables-made-in-germany.com/es/renewables-made-in-germany/tecnologias/centrales-termsolares/central-solar-termica/introduccion.html>

ACCIONA – Planta termosolar Nevada Solar One

<http://www.acciona.com/es/lineas-de-negocio/energia/proyectos-emblematicos/planta-termsolar-nevada-solar-one/>

SlideShare – Combustibles y poder calorífico

<http://es.slideshare.net/CesarRenteria2/combustibles-y-poder-calorifico>

SourceForge – X Steam Tables por Magnus Holmgren

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

University of California – Plugin Psych

<http://wcec.ucdavis.edu/resources/software-resource-applications/>

DTU – *Thermal performance of concentrating tracking solar collectors*

http://www.byg.dtu.dk/-/media/Institutter/Byg/publikationer/byg_rapporter/byg-r292.ashx?la=da

SCHOTT – PTR 70 recivers

http://www.schott.com/csp/english/download/schott_ptr70_4th_generation_datasheet.pdf

Research Gate – *Energy balance for solar collectors*

<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=56efa6493d7f4bd6ae558891&assetKey=AS%3A341981910847488%401458546249330>

MODELADO Y ANÁLISIS DE UNA CENTRAL SOLAR TERMOELÉCTRICA PARA LA ISLA DE EL HIERRO

APLICACIÓN OFIMÁTICA

APLICACIÓN OFIMÁTICA

Trátase en este anexo la metodología para la descarga o acceso a la aplicación ofimática. La última versión de la aplicación se encuentra alojada en un sistema de almacenamiento en la nube (*MEGA*), y hállese en ella la descripción de todos los pasos para su correcto empleo y uso. Si se está realizando la visualización de este documento en un dispositivo electrónico, para acceso a la descarga únicamente se hace necesaria la interacción con el botón indicado en la parte inferior. Sin embargo, si se está visualizando una versión escrita de este documento, se indica de la misma manera el enlace de descarga en la parte inferior de esta página.

VERSIÓN 2.0 LITE

Descarga de la aplicación:

<https://goo.gl/PbN4b9>

MODELADO Y ANÁLISIS DE UNA CENTRAL SOLAR TERMOELÉCTRICA PARA LA ISLA DE EL HIERRO

PRESUPUESTO

CUADRO DE UNITARIOS

1/1

CÓDIGO	CANTIDAD	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
MAT01	12	ud	Material de escritura	0.5	6	
MAT02	120	ud	Soporte escritura	0.03	3.6	
MAT03	1	ud	Calculadora científica	30	30	
MAT04	300	ud	Impresión documentos	0.1	30	
				Grupo MAT		69.6
DAT01	1	ud	Tablas y ábacos del agua-vapor	5	5	
DAT02	2	ud	Fichero climatología Islas Canarias	0	0	
DAT03	2	ud	Fichero demanda española	0	0	
				Grupo DAT		5
LIC01	2	ud	Licencia de uso <i>plugin X Steam Tables</i>	0	0	
LIC02	2	ud	Licencia de uso <i>plugin Psych</i>	0	0	
LIC03	1	ud	Licencia de uso aplicación desarrollada	300	300	
				Grupo LIC		300
DES01	300	h	Ingeniero de la energía	15	4500	
DES02	270	h	Equipo informático	0.01	2.7	
				Grupo DES		4502.7
				Resumen		
					Materiales	69.6
					Datos	5
					Licencias	300
					Desempeño	4502.7
				TOTAL		4877.3

CUADRO DE DESCOMPUESTOS

1/3

CÓDIGO	CANTIDAD	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
CAPÍTULO 1: Desarrollo matemático						
1.01.		ud	Desarrollo matemático: conjunto de materiales y herramientas que se han empleado para la elaboración por escrito a mano del desarrollo matemático del modelo.			
MAT01	10	ud	Material de escritura	0.5	5	
MAT02	100	ud	Soporte escritura	0.03	3	
MAT03	1	ud	Calculadora científica	30	30	
DAT01	1	ud	Tablas y ábacos del agua-vapor	5	5	
DES01	30	h	Ingeniero de la energía	15	450	
				Materiales		43
				Mano de obra		450
				TOTAL		493

CAPÍTULO 2: Desarrollo de la aplicación ofimática

2.01.		ud	Desarrollo de la aplicación ofimática: proceso de la elaboración de la hoja de cálculo que hará las veces de herramienta ofimática, programada en <i>Microsoft Excel</i> .			
MAT01	2	ud	Material de escritura	0.5	1	
MAT02	20	ud	Soporte escritura	0.03	0.6	
MAT04	200	ud	Impresión documentos	0.1	20	
DES01	200	h	Ingeniero de la energía	15	3000	
DES02	200	h	Equipo informático	0.01	2	
				Materiales		21.6
				Mano de obra		3002
				TOTAL		3023.6

CUADRO DE DESCOMPUESTOS

2/3

CÓDIGO	CANTIDAD	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
CAPÍTULO 2: Desarrollo de la aplicación ofimática						
2.02.		ud	Adquisición de datos y licencias: identificación de las licencias de uso de los datos de clima y demanda, así como de las funciones añadidas a la hoja de cálculo.			
DAT02	1	ud	Fichero climatología Islas Canarias	0	0	
DAT03	1	ud	Fichero demanda española	0	0	
LIC01	1	ud	Licencia de uso <i>plugin X Steam Tables</i>	0	0	
LIC02	1	ud	Licencia de uso <i>plugin Psych</i>	0	0	
DES01	5	h	Ingeniero de la energía	15	75	
DES02	5	h	Equipo informático	0.01	0.05	

Materiales	0
Mano de obra	75.05
TOTAL	75.05

CAPÍTULO 3: Entrega de la aplicación ofimática

3.01.		ud	Aplicación ofimática: descripción de la licencia de adquisición de la aplicación programada y desarrollada, así como del conjunto de <i>plugins</i> y datos que permiten su funcionamiento.			
DAT02	1	ud	Fichero climatología Islas Canarias	0	0	
DAT03	1	ud	Fichero demanda española	0	0	
LIC01	1	ud	Licencia de uso <i>plugin X Steam Tables</i>	0	0	
LIC02	1	ud	Licencia de uso <i>plugin Psych</i>	0	0	
LIC03	1	ud	Licencia de uso aplicación desarrollada	300	300	

Materiales	300
Mano de obra	0
TOTAL	300

CUADRO DE DESCOMPUESTOS

3/3

CÓDIGO	CANTIDAD	UD	DESCRIPCIÓN	PRECIO	SUBTOTAL	IMPORTE
CAPÍTULO 3: Entrega de la aplicación ofimática						
3.02.		ud	Documentación: conjunto de la memoria del desarrollo de la aplicación, así como de los análisis comparativos realizados entre las distintas configuraciones estudiadas.			
MAT04	100	ud	Impresión documentos	0.1	10	
DES01	65	h	Ingeniero de la energía	15	975	
DES02	65	h	Equipo informático	0.01	0.65	
				Materiales		10
				Mano de obra		975.65
				TOTAL		985.65
				Resumen		
				Capítulo 1		493
				Capítulo 2		3098.65
				Capítulo 3		1285.65
				TOTAL		4877.3