# TRABAJO FIN DE MÁSTER

## Mejoras del aprovechamiento del ciclo Rankine en plantas de ciclo combinado mediante estrategias de optimización energética.

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MÁSTER UNIVERSITARIO EN TRANSICIÓN ENERGÉTICA RENOVABLE

LUIS ÁNGEL LARA GONZÁLEZ

DIRIGIDO POR:

MANUEL MORAL BONET

**Resumen:**

Este Trabajo de Fin de Máster analiza la integración de energía solar térmica en un ciclo combinado, con el objetivo de poder evaluar su utilización como fuente térmica complementaria para el ciclo Rankine y determinar su efecto sobre el consumo de combustible fósil. La propuesta consiste en incorporar un sistema solar térmico para el precalentamiento del agua de alimentación antes de su entrada a la caldera de recuperación de calor (HRSG) manteniendo el funcionamiento convencional del ciclo Brayton y el aprovechamiento del calor residual de los gases de escape.

Para evaluar la propuesta se desarrolla un modelo termodinámico simplificado mediante la librería CoolProp y el programa Python, considerando las principales condiciones de operación del ciclo y se analiza el comportamiento del sistema para diferentes superficies de captación solar, utilizando una irradiación de referencia constante. El modelo permite comparar la operación convencional con la configuración que incorpora el aporte solar y determinar la cantidad de energía fósil que puede ser sustituida.

Los resultados muestran que el ciclo Rankine presenta una eficiencia térmica de aproximadamente 32,41%, manteniéndose prácticamente constante con y sin aporte solar, debido a que la función principal del sistema solar en el modelo es sustituir parte del aporte térmico convencional y no incrementar directamente el trabajo producido por la turbina. Para las condiciones analizadas, el campo solar alcanza una eficiencia de aproximadamente 67,79%. Asimismo, se identifica una superficie de captación de 1600  como el área mínima dentro del intervalo estudiado para alcanzar el máximo ahorro de combustible fósil previsto por el modelo. En esta condición, el aporte solar permite sustituir aproximadamente 2,038 MJ/kg de energía de origen fósil, cubriendo el aporte convencional restante considerado en el balance.

A partir de estos resultados, se concluye que la integración solar térmica presenta un potencial técnico favorable a nivel conceptual como sistema de apoyo al ciclo Rankine de una planta de ciclo combinado. La principal ventaja identificada es la reducción del aporte térmico procedente de combustibles fósiles, manteniendo la HRSG y el ciclo

Brayton como los elementos principales de la instalación. No obstante, los resultados corresponden a un modelo simplificado y normalizado, por lo que una aplicación real requeriría incorporar datos de operación de una central específica, variaciones horarias de radiación solar, características reales de los equipos y un análisis técnico y económico de mayor detalle.

**Abstract:**

This Master's Thesis analyzes the integration of solar thermal energy into a combined-cycle powerplant, with the aim of evaluating its impact on the thermal behavior of the Rankine cycle. A thermodynamic model is developed based on the use of CoolProp library and the Python programming language, considering both the thermal contribution of the Brayton cycle through a heat recovery steam generator (HRSG) and the additional contribution of a solar thermal system.

The model allows the variation in efficiency with respect to the turbine intel temperature to be studied, as well as the influence of the solar collector area on the energy performance of the system.

This work develops and evaluates an energy model aimed at analyzing the integration of a solar thermal system as a complement to the conventional system. Different operating scenarios and solar collector areas are analyzed considering their influence on variables such as steam temperature and the energy balance of the cycle. At the same time, operating conditions and design paraments that may improve the energy performance of the system are identified, with particular attention paid to the optimization of the solar collector area and the reduction in the use of fossil fuels. This approach makes it possible to establish more detailed conclusions regarding the feasibility and potential for the integrating solar thermal technologies into combined-cycle power plants.

The methodology followed is based on an analytical and comparative approach. First, a literature review of conventional thermodynamic cycles and available solar thermal technologies is carried out. Then the behavior of the base system is modeled using analytical tools, establishing its operating paraments and performance. Subsequently, the solar thermal integration configuration is proposed, evaluating its impact on

variables such as thermal efficiency, specific fuel consumption, and the waste heat recovery. Finally, a comparison is made between the conventional system and the proposed improvement, allowing its energy performance and feasibility as a strategy for integrating solar thermal energy into combined-cycle power plants to be assessed.

## Bibliografía

Palabras clave: ....3
ODS. Objetivos de Desarrollo Sostenible asociados con el trabajo. ....3
1. Introducción ....3
2. Alcance y limitaciones del TFM: ....3
3. Objetivos del proyecto. ....3
3.1. Objetivo general. ....3
3.2. Objetivos específicos. ....3
4. Marco teórico y estado del arte. ....3
4.1. Funcionamientos termodinámicos de los ciclos de potencia. ....3
4.1.1 Ciclo Rankine ....3
4.1.2. Ciclo Brayton. ....3
4.1.3. Ciclo combinado Brayton-Rankine ....3
4.1.4. Ciclo termodinámico de planta termo solar. ....3
4.2. Eficiencia y pérdidas energéticas asociadas al ciclo combinado. ....3
4.3. Tecnologías actuales para la mejora de la eficiencia térmica. ....3
4.4. Estado del arte en integración solar térmica en plantas de potencia. ....3
4.4.1. Ejemplos de plantas de ciclo combinado con integración solar térmica. ....3
5. Metodología ....3
5.1. Descripción del modelo de planta de ciclo combinado de referencia. ....3
5.2. Hipótesis y condiciones de operación. ....3
5.2.1. Planta de referencia. ....3
5.2.2. Parámetros adoptados en el modelo simplificado. ....3
5.2.3. Balance de masa y energía del modelo. ....3
5.2.4. Hipótesis de operación ....3
5.3. Modelado termodinámico del ciclo combinado. ....3
5.4. Integración del sistema solar térmico. ....3
5.5. Herramientas de simulación y análisis. ....3

5.5.1. Uso de Python para el cálculo de ciclos termodinámicos. ....3
5.5.2. Balances de energía y eficiencia. ....3
5.5.3. Cálculo de rendimientos y consumos energéticos. ....3
6. Desarrollo de la propuesta. ....3
6.1. Análisis energético del ciclo combinado sin integración solar. ....3
6.2. Diseño conceptual del sistema de precalentamiento solar del agua. ....3
6.3. Evaluación energética del ciclo Rankine con apoyo solar. ....3
6.4. Comparación energética entre el escenario convencional y el sistema híbrido con integración termosolar. ....3
6.5. Impacto energético y ambiental de la integración del sistema de precalentamiento solar. ....3
7. Análisis de viabilidad. ....3
7.1. Viabilidad técnica de la integración de la energía solar térmica. ....3
7.2. Viabilidad económica. ....3
7.2.1. Estimación de costes de instalación, operación y mantenimiento del sistema solar térmico. ....3
7.2.2. Ahorro de combustible fósil y análisis económico comparativo. ....3
7.3. Viabilidad administrativa y regulatoria. ....3
7.4. Análisis global de viabilidad del sistema propuesto. ....3
8. Resultados. ....3
8.1. Resultados energéticos. ....3
8.2. Aprovechamiento del calor residual. ....3
8.3. Análisis de sensibilidad e incertidumbre. ....3
9. Contribuciones a la sostenibilidad e innovación. ....3
9.1. Contribución del sistema propuesto a la sostenibilidad energética y ambiental. ....3
9.2. Componente innovador del trabajo y aportaciones del TFM. ....3
10. Conclusiones y recomendaciones. ....3
10.1. Conclusiones principales del estudio. ....3
10.2. Recomendaciones técnicas. ....3
11. Perspectivas y futuras líneas de trabajo. ....3
Bibliografia ....3

**Palabras clave:**

1. Ciclo combinado.
2. Energía solar térmica.
3. Ciclo Rankine.
4. Eficiencia energética.
5. Optimización energética.

## ODS. Objetivos de Desarrollo Sostenible asociados con el trabajo.

1. ODS 7: Energía asequible y no contaminante:

Este trabajo contribuye a la ODS 7 mediante el análisis de la integración de energías renovables en sistemas de generación que son convencionales, lo cual ayuda a promover una mayor eficiencia energética y la reducción del uso de combustibles fósiles.

2. ODS 9: Industria, innovación e infraestructura:

El desarrollo de modelos híbridos de generación energética representa una innovación tecnológica que mejora la sostenibilidad de las infraestructuras energéticas.

3. ODS 13: Acción por el clima:

La reducción del consumo de combustibles fósiles mediante el uso de energía solar térmica contribuye a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con los objetivos de la ODS 13.

# 1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la transición energética, el sector de la generación eléctrica se enfrenta al reto de mejorar la eficiencia de las tecnologías existentes y reducir al mismo tiempo su impacto ambiental. Las plantas de ciclo combinado son muy reconocidas y usadas por su gran eficiencia y flexibilidad operativa, estas continúan siendo un papel clave en la actualidad para la generación de energía, pero su gran dependencia a combustibles fósiles y la presencia de pérdidas térmicas asociadas al aprovechamiento incompleto del calor disponible nos dejan en la necesidad de explorar estrategias que permitan avanzar a modelos de generación que sean más sostenibles.

Actualmente sabemos que las fuentes renovables como la solar o la eólica, requieren un respaldo estable para garantizar el suministro continuo. En muchos países, la generación de ciclos combinados y la energía nuclear son las principales energías de respaldo. Sin embargo, en regiones donde desgraciadamente la energía nuclear no es aceptada, los ciclos combinados se han convertido en la opción predilecta, ofreciendo una generación flexible y eficiente. Por lo tanto, se puede ver que estos sistemas seguirán desempeñando un papel crucial en las próximas décadas, lo que aumenta la importancia de optimizar su eficiencia y sostenibilidad, asegurando que sean parte de la solución en un sistema energético equilibrado.

Las plantas de ciclo combinado están basadas en la integración de dos ciclos: el ciclo Brayton (con el que operan las turbinas de gas) y el ciclo Rankine (para las turbinas de vapor). Aunque sabemos que a este ciclo no se le pueden hacer cambios radicales que aumenten demasiado su eficiencia, ya que es algo consolidado y ha sido estudiado por alrededor de doscientos años, aún se le pueden introducir innovaciones en su implementación práctica para poder aprovechar mejor el calor y reducir el consumo de combustible.

Dentro de las posibles estrategias de mejora, la integración de energía solar térmica (termo solar) como apoyo al ciclo Rankine puede ser una estrategia que vale la pena analizar para poder contemplarla en los ciclos combinados. El uso de sistemas de captación solar térmica para el precalentamiento del agua de alimentación nos permitiría reducir el uso de combustibles fósiles y al mismo tiempo disminuir las emisiones asociadas al proceso de generación. Esta solución resulta interesante en

regiones con un elevado recurso solar, donde la hibridación entre tecnologías convencionales y renovables podría contribuir de una forma significativa a la transición hacia un sistema energético más limpio y eficiente.

La integración del ciclo Rankine con la energía solar térmica abre nuevas oportunidades de optimización no solo desde el punto de vista de la termodinámica, sino también desde un punto de vista técnico y económico. El análisis de estas soluciones no solo requiere una comprensión detallada del ciclo combinado, sino también la aplicación de modelos que nos permitan evaluar el impacto real de la integración solar en condiciones operativas representativas.

En este contexto, el presente trabajo de Fin de Máster se centra en el estudio y análisis de la optimización del ciclo Rankine en una planta de ciclo combinado mediante la incorporación de energía solar térmica para el precalentamiento del agua de alimentación. A través de un enfoque basado en el modelo termodinámico y el análisis de la viabilidad técnica y energética, se pretende evaluar el potencial de esta estrategia como una solución realista para mejorar la eficiencia del sistema, reducir el consumo de combustible fósil y contribuir a los objetivos de sostenibilidad y transición energética del sector energético.

En este sentido, este trabajo se plantea como una contribución académica orientada a la optimización y adaptación de tecnologías existentes, más que a desarrollar nuevos ciclos termodinámicos. El enfoque adoptado permite analizar soluciones que se puedan aplicar a corto o mediano plazo, alineadas con las necesidades reales del sistema eléctrico actual, donde la mejora de la eficiencia y la reducción del impacto ambiental son las prioridades.

## 2. ALCANCE Y LIMITACIONES DEL TFM:

El presente Trabajo de Fin de Máster tiene como objetivo analizar y proponer estrategias de optimización energética en una planta de ciclo combinado, con especial énfasis en la mejora del aprovechamiento del ciclo Rankine mediante la integración de energía solar térmica. El estudio se enfoca no solo en un análisis conceptual, sino en una evaluación técnica y de viabilidad de la solución propuesta, considerando criterios energéticos, técnicos y económicos básicos. Este estudio parte del reconocimiento de que, si bien el ciclo Rankine ya se ha estudiado y desarrollado durante más de dos siglos, todavía hay oportunidades de mejora a nivel de integración de tecnologías auxiliares y la optimización del uso de calor disponible, especialmente en el contexto de la transición energética y la reducción de las emisiones que están asociados a los combustibles fósiles.

El alcance de este trabajo se centrará principalmente en el precalentamiento del agua de alimentación del ciclo de vapor mediante sistemas de captación solar térmica, esto sería como una estrategia para complementar el funcionamiento convencional de las plantas de ciclo combinado. Se analizará cómo la incorporación de paneles solares térmicos puede ayudar a reducir la demanda energética de estas plantas, disminuyendo el consumo de combustible fósil necesario para elevar la temperatura del agua hasta las condiciones que se requieren para generar vapor. Este enfoque permitirá evaluar el impacto directo de la energía solar en la eficiencia global del ciclo Rankine y de la misma planta.

El trabajo incluirá un análisis del funcionamiento termodinámico del ciclo combinado, haciendo énfasis en la interacción entre el ciclo Brayton (Turbinas de Gas) y el ciclo Rankine (Turbinas de Vapor). Se estudiarán al mismo tiempo las condiciones de entrada y salida del agua y del vapor, los niveles de temperatura y presión, y las principales pérdidas energéticas asociadas al ciclo del vapor. A partir de este análisis se identificará el punto óptimo para la integración de la energía solar térmica, especialmente en las etapas de precalentamiento del agua de alimentación o sistemas auxiliares previos a la generación de vapor.

El análisis se desarrollará mediante balances de energía y simulaciones termodinámicas, utilizando herramientas de cálculo como Python y CoolProp. Estas herramientas permitirán comparar distintos escenarios de operación con y sin apoyo

de la energía solar térmica, evaluando las mejoras de rendimiento térmico, consumo específico de combustible y aprovechamiento del calor residual.

Asimismo, el trabajo incorporará un análisis de viabilidad técnica y económica a nivel preliminar, considerando aspectos como el coste estimado de instalación y operación del sistema solar térmico, el ahorro potencial de combustible y su impacto en la operación global de la planta. Este análisis tendrá un enfoque comparativo frente a la solución convencional, sin desarrollar un estudio financiero detallado, pero permitiendo valorar la viabilidad real de la integración propuesta. De forma complementaria, se podrán considerar aspectos administrativos y operativos de la integración, como la compatibilidad con la operación existente y las posibles implicaciones en la gestión de la planta.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad y la transición energética, el trabajo busca demostrar que la incorporación de energía solar térmica en plantas de ciclo combinado, puede ser una buena forma de reducir las emisiones de $CO^2$ y mejorar la eficiencia de la planta, contribuyendo a una generación eléctrica más limpia y alineada con los objetivos actuales de descarbonización del sector energético.

La componente innovadora del estudio radica en el enfoque que hay en la optimización del ciclo Rankine mediante la integración solar térmica orientada al precalentamiento del agua, analizando el impacto que tenga en el ciclo combinado. Esto permitirá aportar criterios técnicos aplicables a futuras mejoras de plantas existentes, más allá de solamente un análisis descriptivo y recopilatorio.

El alcance del proyecto se limita a un estudio analítico y de simulación, enfocado en la viabilidad técnica, energética y económica preliminar de la solución propuesta, dentro del marco temporal del TFM. No se contemplan ensayos experimentales, la construcción de prototipos ni el diseño detallado de equipos. El objetivo final es demostrar que la integración de energía solar térmica en plantas de ciclo combinado constituye una estrategia técnicamente viable y energéticamente eficiente para mejorar el aprovechamiento del ciclo Rankine, contribuyendo a una generación eléctrica más sostenible y alineada con los objetivos de la transición energética.

# 3. OBJETIVOS DEL PROYECTO.

## 3.1. Objetivo general.

Evaluar la integración de energía solar térmica en el ciclo Rankine de una planta de ciclo combinado mediante el desarrollo de un modelo termodinámico en software, con el fin de comparar su desempeño frente a la configuración convencional y cuantificar su impacto en el comportamiento térmico del ciclo Rankine y en el consumo específico del combustible.

## 3.2. Objetivos específicos.

3.2.1. Describir el funcionamiento del sistema usando las leyes de termodinámica.

3.2.2. Analizar ciclo Rankine sin interacción solar.

3. 2.3. Evaluar la integración de energía solar térmica para el precalentamiento del agua de alimentación del ciclo Rankine.

3.2.4. Comparar el rendimiento energético con y sin apoyo solar mediante indicadores de eficiencia energética.

3.2.5. Realizar un análisis preliminar de la reducción de consumo de combustible fósil derivada de la integración solar.

# 4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.

## 4.1. Funcionamientos termodinámicos de los ciclos de potencia.

### 4.1.1 Ciclo Rankine.

El ciclo Rankine es uno de los ciclos más conocidos y utilizados para la generación de energía a nivel mundial, es la base del funcionamiento de las centrales térmicas convencionales, nucleares y una parte muy importante también en las plantas de ciclo combinado, donde actúa como el ciclo encargado de convertir el calor en trabajo mecánico al momento de dirigir el vapor de agua a una turbina y hacer que esta gire.

Desde el punto de vista termodinámico, el ciclo Rankine ideal está compuesto por cuatro procesos fundamentales que se desarrollan de manera cíclica. Primero se comprime el agua líquida en una bomba, aumentando su presión con un consumo relativamente bajo de trabajo debido a la baja compresibilidad del líquido. Después, el fluido entra a la caldera (o generador de vapor), donde recibe calor a presión prácticamente constante, elevando su temperatura hasta que se transforme en vapor, generalmente en condiciones de vapor saturado o sobrecalentado.

Lo siguiente es que el vapor se expande en la turbina de vapor, esto produce trabajo mecánico lo que genera energía eléctrica mediante un generador. Este proceso de expansión es el principal responsable de la producción de potencia en el ciclo. Para terminar, el vapor a la salida de la turbina es conducido a un condensador, donde se rechaza calor al ambiente y el fluido vuelve a su estado líquido, cerrando de esta manera el ciclo termodinámico.

El rendimiento térmico de este ciclo depende principalmente de las condiciones de temperatura y presión a las que se realiza la adición y el rechazo de calor. En términos generales, un aumento de la temperatura y presión del vapor a la entrada de la turbina conduce a una mejora del rendimiento del ciclo, de acuerdo con los principios de la segunda ley de la termodinámica (aumento de la entropía). Estos elementos están limitados por consideraciones técnicas, económicas y de resistencia de materiales, principalmente en los componentes que están expuestos a temperaturas altas como la caldera y la turbina.

Por más de dos siglos de desarrollo, el ciclo Rankine ha contado con varias mejoras y optimizaciones, como la incorporación de recalentamientos intermedios,

regeneración mediante calentadores de agua de alimentación y mejoras en el diseño de las turbinas y los condensadores. Por estas mejoras se ha podido alcanzar niveles de eficiencia más elevados a comparación con los primeros usos de este mismo ciclo. Sin embargo, desde un punto de vista conceptual, el ciclo Rankine ya se considera una tecnología madura, con un limitado margen para grandes mejoras.

A pesar de todo esto, en la realidad existen pérdidas energéticas asociadas a rechazos de calor no aprovechados, irreversibilidades y limitaciones operativas. Estas pérdidas abren la puerta a estrategias de optimización centradas no tanto en la modificación del ciclo termodinámico, sino en la mejora de su integración con otros sistemas y en la forma de aprovechar fuentes de calor adicionales. El ciclo Rankine desempeña un papel clave en las plantas de ciclo combinado, donde el calor residual del ciclo Brayton se utiliza para generar vapor, incrementando la eficiencia global de la planta.

Asimismo, la incorporación de energías auxiliares como la solar térmica, permite explorar nuevas vías para el precalentamiento del agua de alimentación y reducir el consumo de combustible fósil, sin alterar de manera fundamental la estructura del ciclo Rankine. Estas estrategias pueden ser relevantes en el marco de la transición energética, donde se trata de maximizar la eficiencia de las tecnologías ya existentes y reducir su impacto ambiental.

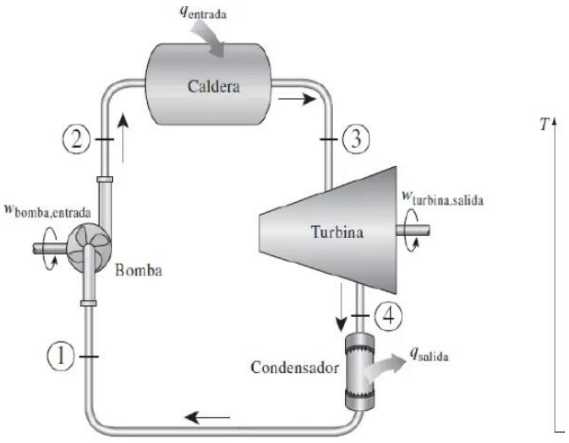



Figura 1: Ejemplo del ciclo Rankine.

Imagen extraída de https://es.scribd.com/document/357591649/Ciclo-Rankine

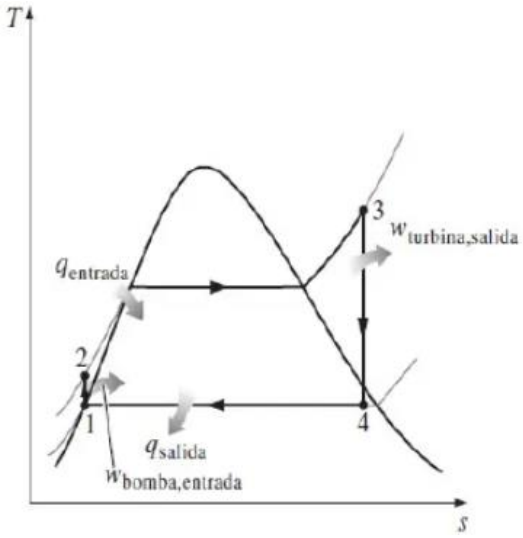



Figura 2: Diagrama del ciclo Rankine

Imagen extraída de https://es.scribd.com/document/357591649/Ciclo-Rankine

### 4.1.2. Ciclo Brayton.

El ciclo Brayton es el ciclo termodinámico que describe el funcionamiento de las turbinas de gas, este es la base de operación de plantas de generación eléctrica de ciclos simples y una etapa importante de las plantas de ciclo combinado.

El ciclo Brayton se compone de cuatro procesos fundamentales. El primero es la compresión del aire en el compresor, el aire entra por la cámara de admisión hasta llegar al compresor y dependiendo el número de discos de este mismo son las atmósferas a las que comprime el aire, esto incrementa la presión y temperatura mediante el aporte de trabajo mecánico. Después el aire ya comprimido ingresa a la cámara de combustión, donde se produce la adición de calor a presión prácticamente constante mediante la combustión de un combustible, elevando de esta manera la temperatura del gas.

El tercer paso es cuando estos gases calientes presentan una expansión isentrópica en la turbina (aumentan su volumen y reducen su presión sin transferencia de calor y con una entropía constante), generando así un trabajo mecánico. Este trabajo se utiliza para accionar el compresor, y el resto se utiliza para generar energía a través de un generador acoplado. Finalmente, el ciclo se cierra con el rechazo de calor a presión constante, representando como el enfriamiento de los gases antes de reiniciar el proceso.

El rendimiento térmico del ciclo Brayton depende en gran medida de la relación de compresión del compresor y de la temperatura máxima alcanzada en la entrada de la turbina. En términos generales, un aumento en la relación de compresión mejora la eficiencia hasta cierto punto óptimo, mientras que un incremento en la temperatura de entrada a la turbina conduce a un aumento más significativo del rendimiento, siempre que los materiales y los sistemas de enfriamiento lo permitan.

En aplicaciones reales, el ciclo Brayton tiene varias irreversibilidades que están asociadas a pérdidas en la cámara de admisión, el compresor y la cámara de combustión, así como limitaciones impuestas por la resistencia térmica de los materiales. El desarrollo de superaleaciones, recubrimientos cerámicos y sistemas avanzados de enfriamiento de los álabes ha permitido ir elevando las temperaturas de operación, incrementando la eficiencia global de las turbinas modernas.

Sin embargo, uno de los aspectos más relevantes del ciclo Brayton es que los gases de salida de la turbina siguen conservando una gran cantidad de energía térmica. En un ciclo simple, esta energía simplemente se pierde por medio de chimeneas al ambiente, lo que limita el rendimiento global del sistema. Esta característica es la que permite la integración del ciclo Brayton con el ciclo Rankine en las plantas de ciclo combinado, donde el calor residual se recupera para generar vapor y producir trabajo adicional, aumentando la eficiencia de toda la instalación.

Desde el punto de vista de la transición energética, el ciclo Brayton desempeña un papel estratégico debido a su capacidad de arranque rápido, flexibilidad operativa y su gran adaptación a variaciones en la demanda eléctrica. Estas características lo convierten en un complemento ideal para fuentes renovables intermitentes, aunque su dependencia de combustibles fósiles hace necesario explorar estrategias que permitan mejorar su eficiencia y reducir su impacto ambiental.

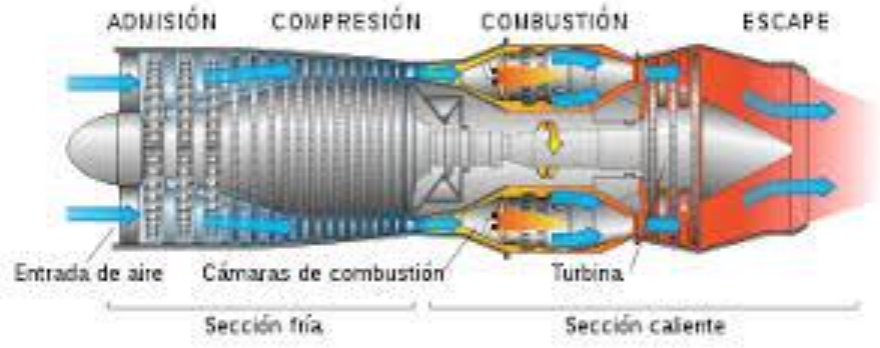



Figura 3: Ejemplo del ciclo Brayton en una turbina de gas.

Imagen extraída de https://mauriciomedinasierra.wordpress.com/tercer-corte/conceptos/ciclos-termicos/ciclo-brayton/

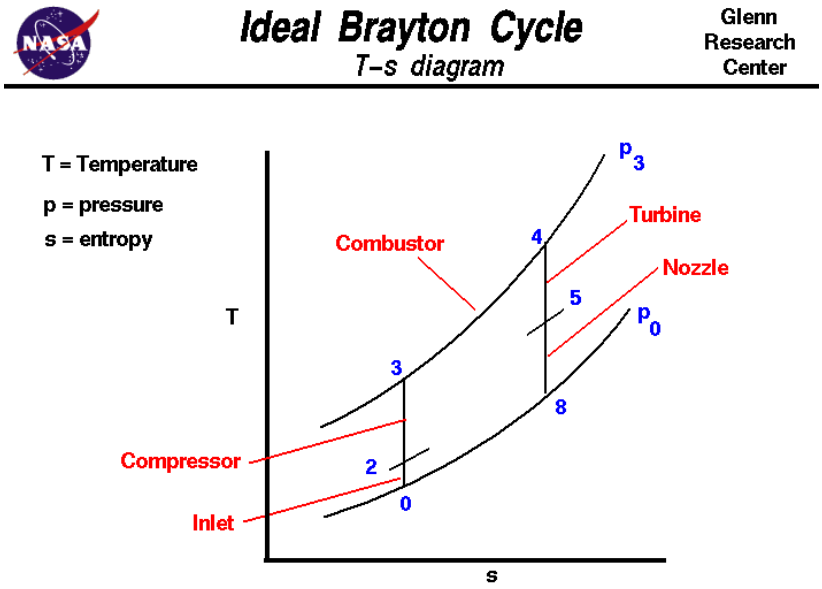



Figura 4: Diagrama del ciclo Brayton

Imagen extraída de https://mauriciomedinasierra.wordpress.com/tercer-corte/conceptos/ciclos-termicos/ciclo-brayton/

### 4.1.3. Ciclo combinado Brayton-Rankine.

El ciclo combinado es una configuración de generación eléctrica que combina los dos ciclos termodinámicos de los que venimos hablando: Ciclo Brayton (turbina de gas) y el ciclo Rankine (turbina de vapor), con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de la energía contenida en el combustible. La principal característica y beneficio de

este sistema es que se puede recuperar el calor residual de los gases de escape de la turbina de gas para producir vapor, el cual acciona una turbina de vapor.

En una central convencional de turbina de gas, una parte significativa de la energía del combustible se pierde en forma de calor en los gases de escape, los cuales suelen alcanzar temperaturas superiores a los 500 °C. El ciclo combinado aprovecha esta misma energía térmica mediante una caldera de recuperación de calor, a esta caldera se le conoce como HRSG (Heat Recovery Steam Generator), en el cual se genera vapor con un aporte menor de combustible.

Gracias a esta integración, las plantas de ciclo combinado pueden alcanzar rendimientos eléctricos globales superiores al 55-60%, los cuales son mayores a los de una planta de ciclo simple.

Estructura y funcionamiento del ciclo combinado en tres bloques:

1.- Bloque de turbina de gas (Ciclo Brayton):

- El aire se comprime en el compresor.
- Se mezcla con combustible en la cámara de combustión.
- La mezcla se quema generando gases de alta temperatura y presión.
- Estos gases se expanden en la turbina de gas, lo cual produce trabajo mecánico y acciona el generador eléctrico y el compresor.

Los gases de escape aún contienen una cantidad de energía térmica.

2.- Caldera de recuperación (HRSG).

Esta caldera es un elemento clave para la integración de estos dos ciclos. Su función es transferir el calor de los gases de escape al agua del ciclo Rankine.

Generalmente incluye:

- Economizador (para precalentar el agua).
- Evaporador (Generador de vapor).
- Sobrecalentador (incremento de la temperatura del vapor).
- Recalentador (solo en algunos casos en los que el ciclo es con recalentado).

3.- Bloque de turbina de vapor (Ciclo Rankine).

El vapor que se generó en la HRSG:

- Se expande en la turbina de vapor.
- Produce trabajo mecánico adicional.
- Se condensa en el condensador.
- Se bombea nuevamente hacia la HRSG cerrando el ciclo.

Ventajas del ciclo combinado

- Alto rendimiento energético.
- Menor consumo específico del combustible.
- Reducción de emisiones por KWh generado.
- Alta flexibilidad operativa frente a variaciones de carga.
- Compatibilidad con esquemas de hibridación (como la integración termo solar).

Limitaciones y retos del ciclo combinado:

- Dependencia a combustibles fósiles.
- Emisiones de $CO^2$
- Pérdidas térmicas al convertir la energía.
- Limitaciones termodinámicas del ciclo Rankine en cuanto a temperaturas máximas y presiones de operación.

Por todo esto es porque las estrategias como la mejora condiciones de vapor, la optimización del precalentamiento o la integración de fuentes renovables representan una fuerte demanda de investigación.

### 4.1.4. Ciclo termodinámico de planta termo solar.

Las plantas termo solares de concentración convierten la radiación solar en energía térmica mediante sistemas ópticos que concentran la radiación solar sobre un punto. Este proceso se lleva a cabo mediante espejos reflectantes, como colectores cilindro parabólicos o heliostatos que siguen la trayectoria del sol y dirigen la radiación hacia un receptor.

En los sistemas de colectores cilindro parabólicos, los espejos concentran la radiación sobre un tubo receptor lineal por el que circula un fluido térmico, por lo general un aceite térmico. Por otro lado, en las plantas de torre central un campo de heliostatos refleja la radiación hacia un receptor ubicado en lo alto de una torre, donde se alcanzan temperaturas elevadas utilizando sales fundidas u otros fluidos térmicos. En los dos casos, la energía solar concentrada se transforma en calor de alta temperatura.

Este calor obtenido se transfiere a un generador de vapor, donde se produce vapor de agua a alta presión y temperatura. A partir de aquí, el funcionamiento del sistema sigue un ciclo Rankine convencional, en el que el vapor se expande en una turbina para generar trabajo, se condensa y es recirculado por medio de una bomba.

De este modo la tecnología termo solar permite integrar una fuente de energía renovable en un ciclo térmico convencional, en el cual actúa como sustituto del aporte de calor procedente de combustibles fósiles y contribuyendo a la mejora de la eficiencia de todo el sistema.

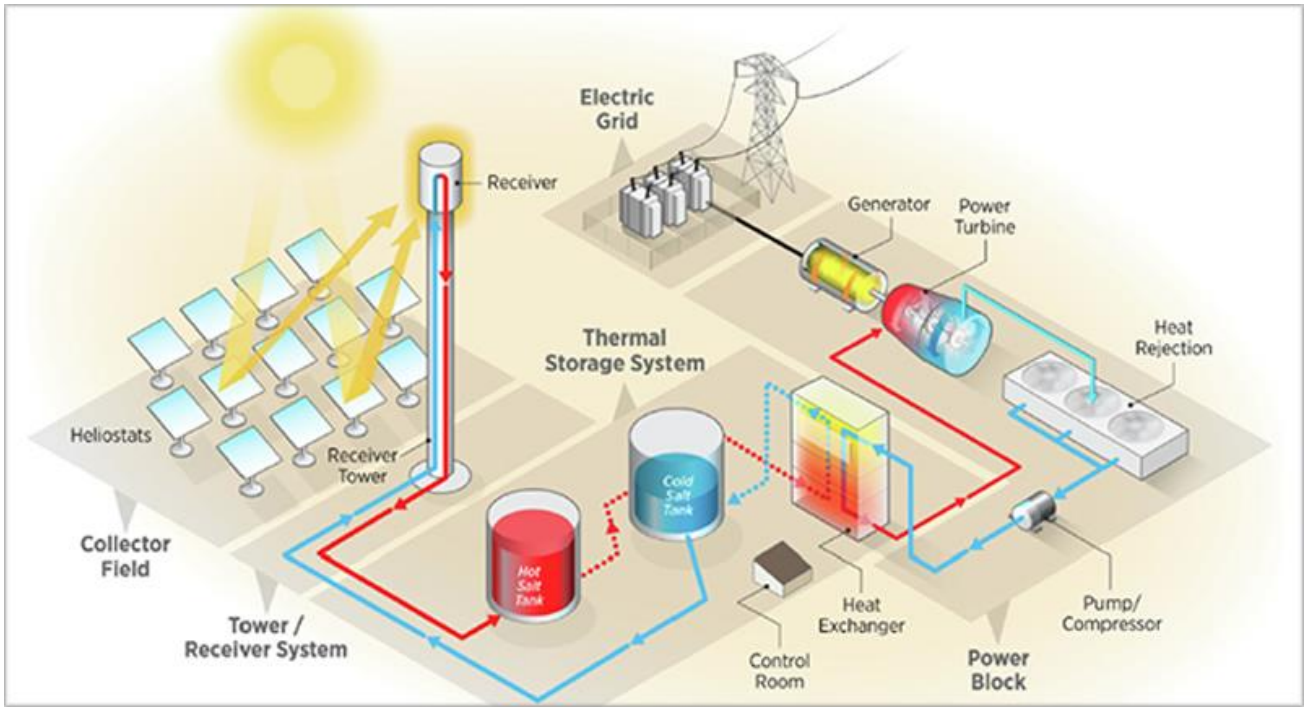



Figura 5: Ejemplo del ciclo termodinámico de planta termo solar.

Imagen extraída de https://www.smartgridsinfo.es/2021/11/30/usal-estudia-potencial-plantas-termosolares-generacion-energia-electrica

## 4.2. Eficiencia y pérdidas energéticas asociadas al ciclo combinado.

La eficiencia térmica en una central de ciclo combinado se define como la relación entre la potencia eléctrica neta generada y la potencia térmica suministrada por el combustible.

Donde:

$Wneto$ : Es la potencia eléctrica neta producida.

$\dot{m}_f$ : Es el caudal másico del combustible.

$PCI$ : Es el poder calorífico inferior del combustible.

Las plantas modernas de ciclo combinado pueden alcanzar eficiencias superiores al 60% en las condiciones óptimas de operación, esto las convierte en una de las tecnologías de generación térmica que actualmente son más eficientes.

La gran eficiencia se debe al aprovechamiento en cascada de la energía: primero mediante el ciclo Brayton y después mediante el ciclo Rankine, utilizando el calor residual de los gases de escape.

Desde el punto de vista energético, el ciclo combinado no elimina pérdidas termodinámicas, sino que las reduce al momento en el que recupera parte de la energía que se suele perder en un ciclo simple por los gases de escape.

A pesar de esto, hay varias pérdidas inevitables asociadas a:

- Irreversibilidades en la combustión.
- Fricción y pérdidas mecánicas en turbinas y compresores.
- Transferencias de calor con diferencias de temperatura.
- Pérdidas en el generador eléctrico.
- Calor residual que se evacúa en el condensador.

Con todo esto se sabe que:

- Aproximadamente un 30-40% de la energía del combustible se transforma en electricidad en la turbina de gas.
- Una parte del calor restante se recupera en la caldera de recuperación (HRSG) para generar vapor.

- Entre un 30-35% de la energía inicial aún se pierde principalmente en el condensador del ciclo de vapor.

Es importante recalcar que el mayor sitio de pérdidas térmicas en el ciclo combinado es el sistema de condensación, donde el vapor cede calor al medio ambiente.

Si lo vemos desde la segunda ley de la termodinámica, las pérdidas no solo suelen evaluarse energéticamente, sino también en términos de exergía, la cual representa el trabajo teórico máximo disponible.

Las principales de destrucción de exergía en el ciclo combinado pueden ser:

- El proceso de combustión.
- Transferencias de calor con grandes diferencias de temperatura.
- La expansión no ideal de las turbinas.
- Una mala compresión del compresor.

Aunque energéticamente el ciclo combinado es muy eficiente, desde un punto de vista exergético todavía hay un gran margen de mejora, principalmente en:

- Optimización del HRSG.
- Reducción de diferencia de temperaturas en intercambiadores.
- Mejora de rendimiento de turbinas.
- Integración de fuentes térmicas externas (como la solar térmica).

Hay que recalcar también que la eficiencia del ciclo combinado depende de varios factores, por ejemplo:

- La temperatura del ambiente, debido a que afecta a la densidad del aire y a la potencia de la turbina de gas.
- Relación de compresión del ciclo Brayton.
- Temperatura máxima de la entrada de la turbina.
- Tipo de sistema de refrigeración; estos pueden ser de torre húmeda, seca o híbrida.
- Operación en carga parcial.

La operación flexible necesaria para respaldar energías renovables intermitentes, puede reducir la eficiencia global respecto al punto de diseño.

Actualmente con la transición energética este aspecto es muy importante, debido a que las centrales de ciclo combinado operan cada vez más como respaldo de las demás energías y no solo como la forma base para generar energía.

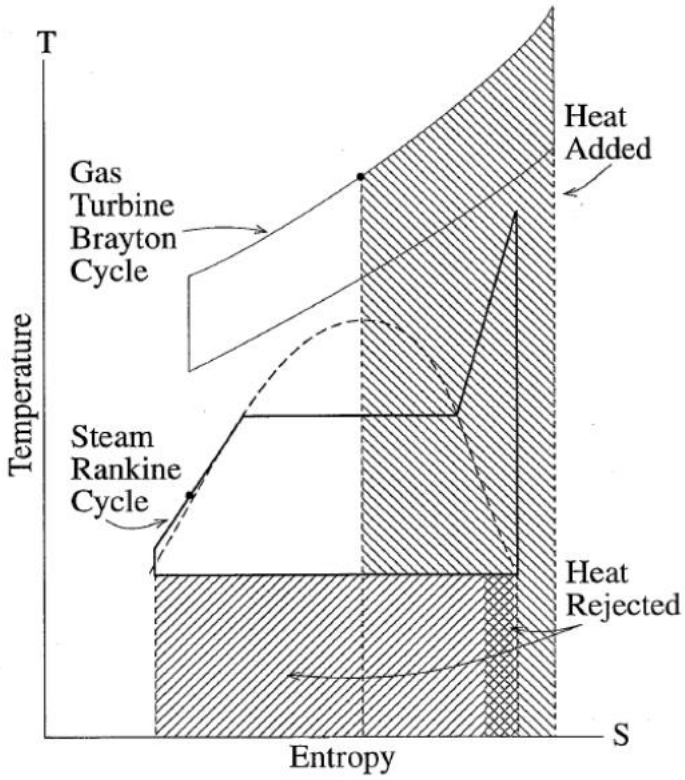



Figura 6: Diagrama temperatura-entropía (T-s) del ciclo combinado Brayton-Rankine.

Fuente: MIT OpenCourseWare

### 4.3. Tecnologías actuales para la mejora de la eficiencia térmica.

El ciclo combinado ha alcanzado altos niveles de eficiencia gracias a avances tecnológicos en materiales, diseño mejorado y mejores estrategias de operación. A pesar de esto, la búsqueda de mayores rendimientos y menores emisiones ha impulsado el desarrollo de diversas tecnologías que están orientadas a optimizar los dos ciclos (Brayton y Rankine), como las siguientes.

**Incremento de la temperatura de entrada a la turbina (TIT)**

Uno de los factores que más importan en la eficiencia del ciclo Brayton es la temperatura máxima de entrada a la turbina, ya que permite:

- Mejor aprovechamiento de la energía química del combustible.
- Incremento del rendimiento térmico.

En términos cuantitativos, el incremento de la TIT puede suponer mejoras en la eficiencia del ciclo Brayton en alrededor de un 2% a 5% dependiendo del rango de operación. En turbinas modernas, la TIT puede superar los 1400-1600 °C, lo que ha permitido que se alcancen eficiencias globales en ciclos combinados superiores al 55-60%.

Y esto ha sido posible gracias al desarrollo de aleaciones que resisten mejor las altas temperaturas, recubrimientos cerámicos y sistemas avanzados internos de enfriamiento de los álabes. A pesar de esto, el incremento de la TIT está limitado por consideraciones materiales, costos y la confiabilidad operativa.

**Configuraciones de presión múltiple en la HRSG**

La incorporación de sistemas de doble o triple nivel de presión en la caldera de recuperación (HRSG) permite optimizar la transferencia de calor entre los gases de escape y el ciclo del vapor. Esto tiene ventajas en:

- Mejor adaptación del perfil térmico entre gases y agua o vapor.
- Mayor generación de vapor útil.
- Incremento en la eficiencia del ciclo Rankine.

Estas configuraciones de triple presión son un estándar actual en las centrales de alta eficiencia y pueden aumentar la eficiencia del ciclo en aproximadamente 1% a 3%.

**Recalentamiento del vapor.**

Consiste en expandir parcialmente el vapor en la turbina de alta presión, de ahí regresarlo a la HRSG para elevar más su temperatura y luego expandirlo en la turbina de presión intermedia o baja. Esto ayuda para:

- Reducir la humedad en las últimas etapas de la turbina.
- Mejorar el rendimiento del ciclo Rankine.

El uso de recalentamiento puede aumentar la eficiencia del ciclo en un rango aproximado de 2% a 4%, además de mejorar la vida útil de los componentes, debido a que si hay algo de condensación las gotas por más pequeñas que sean pueden causar daños graves en los álabes de la turbina.

**Mejora de rendimientos isentrópicos.**

El mejoramiento aerodinámico de las turbinas y compresores ha permitido aumentar sus rendimientos isentrópicos, reduciendo pérdidas por fricción y turbulencias.

Actualmente, los rendimientos isentrópicos pueden alcanzar valores superiores al 88-92% en turbinas y 85-90% en compresores, lo que se traduce en incrementos globales en la eficiencia del ciclo de 1 a 2%.

La optimización de los álabes, el uso de simulación avanzada y mejoras en manufactura han sido fundamentales en este proceso.

**Sistemas de enfriamiento avanzados.**

La reducción en la temperatura del condensador mejora el rendimiento del ciclo Rankine, debido a que disminuye la presión de salida de la turbina de vapor. Unas de las tecnologías actuales incluyen:

- Sistemas de enfriamiento híbridos.
- Mejora en torres de refrigeración.

Estas mejoras están muy condicionadas a factores ambientales y disponibilidad de agua.

**Integración con tecnologías complementarias.**

Actualmente se están desarrollando ciertas estrategias que integran:

- Captura y almacenamiento del carbono.
- Combustibles alternativos como el hidrógeno.
- Sistemas híbridos con energía solar térmica.

En el caso de la integración termo solar, se pueden lograr reducciones en el consumo de combustible fósil en alrededor de un 5% a un 15%, esto depende del nivel de irradiación y el tamaño del campo solar, además de ciertas mejoras indirectas en la eficiencia del ciclo debido al incremento de la temperatura del vapor (como la disminución de posibles condensaciones).

Estas estrategias buscan reducir la intensidad de emisiones y mejorar el aprovechamiento energético global sin remplazar completamente la infraestructura que ya existe.

Aunque el ciclo combinado ya es muy eficiente, la mayoría de las mejoras actuales implican:

- Altos costos tecnológicos.
- Límites materiales.
- Incrementos marginales de rendimiento.

En este contexto, la integración de fuentes térmicas renovables en el ciclo del vapor surge como una alternativa complementaria que permitiría reducir la carga térmica asociada al combustible fósil, manteniendo la infraestructura ya establecida en el sistema.

### 4.4. Estado del arte en integración solar térmica en plantas de potencia.

La integración de energía solar térmica en plantas de generación convencional surge como estrategia para reducir el consumo de los combustibles fósiles y lograr disminuir las emisiones de CO2 sin remplazar completamente la infraestructura que ya existe. Esta configuración híbrida permite aprovechar la estabilidad de las centrales térmicas con el aporte renovable de la energía solar.

En las últimas dos décadas se han desarrollado varias configuraciones híbridas que combinan tecnologías termo solares con los ciclos convencionales.

La energía solar térmica de concentración utiliza sistemas ópticos para concentrar la radiación solar y poder generar calor a temperaturas elevadas, este calor se puede emplear para:

- Generar vapor directamente.
- Precalentar agua de alimentación.
- Producir vapor sobrecalentado.
- Recalentar vapor parcialmente expandido.

La integración solar busca disminuir el uso de la energía térmica proveniente del combustible fósil, reduciendo la carga térmica asociada el proceso de combustión.

Las tecnologías más utilizadas para integración en este tipo de plantas son:

a) Colectores cilindros parabólicos: Actualmente es la tecnología más madura y comercial, permite generar vapor a temperaturas entre 350° a 400° mediante un fluido térmico intermedio. Esta tiene alta fiabilidad y es de fácil integración, pero sus temperaturas son algo moderadas en comparación con otras tecnologías.
b) Torres de concentración: Estas utilizan un campo de heliostatos que concentran la radiación en un receptor central. Alcanzan temperaturas superiores a los 550°, tienen un mayor potencial de eficiencia termodinámica y son compatibles con el almacenamiento térmico en sales fundidas.

Existen dos esquemas principales de integración:

1. Integración en el ciclo Rankine convencional.
   Se utiliza para:
   - Precalentar el agua de alimentación.
   - Generar vapor adicional.
   - Sustituir parcialmente la combustión en calderas convencionales.

Este tipo de integración es relativamente sencilla y no altera en gran manera la arquitectura del sistema.

2. Ciclos combinados integrados solarmente (ISCC).

   Los sistemas ISCC (Integrated Solar Combined Cycle) combinan un ciclo combinado con un campo solar térmico.

   Aquí el calor solar se introduce en la HRSG para:

   - Aumentar la producción de vapor.
   - Reducir el uso de duct burners.
   - Disminuir el consumo de gas natural.

Las plantas ISCC permiten mantener la operación estable incluso en ausencia de radiación solar, gracias al respaldo del ciclo Brayton.

Entre los beneficios principales que trae la hibridación solar son:

- Reducción de emisiones de CO2.
- Disminución del consumo de combustible fósil.
- Aprovechamiento de infraestructura ya existente.
- Mayor factor de capacidad frente a plantas solares puras.
- Mejora la transición a sistemas energéticos descarbonizados.

A pesar del potencial de la integración solar térmica, hay algunos desafíos que hay que tener en cuenta y son:

- Alta inversión inicial.
- Variabilidad de recurso solar.
- Complejidad en control y en la operación.
- Limitaciones térmicas en puntos específicos del ciclo.
- La integración óptica aún no está completamente estandarizada.

El desafío principal consiste en determinar el punto de integración que maximice el aprovechamiento energético del calor solar.

El estado del arte muestra que la integración solar térmica en este tipo de plantas es una opción muy viable y ha sido implementada en configuraciones comerciales. Sin embargo, la optimización termodinámica del punto de integración y su impacto real sobre la eficiencia global del sistema continúan siendo objeto de estudio.

El análisis detallado del ciclo Rankine dentro de una configuración híbrida representa una línea de investigación que es muy relevante para poder identificar oportunidades de mejora energética y reducción del consumo de combustible.

### 4.4.1. Ejemplos de plantas de ciclo combinado con integración solar térmica.

En los últimos años se han desarrollado diferentes instalaciones de generación eléctrica que combinan ciclos de gas y vapor con sistemas de energía solar térmica, estas plantas han demostrado la viabilidad de la integración de esta energía y han dado lugar a las configuraciones que se conocen como sistemas ISCC (Integrated Solar Combined Cycle). En este tipo de instalaciones, el campo solar suele estar formado por colectores cilindro-parabólicos y su integración se realiza principalmente

en el ciclo del vapor, permitiendo sustituir parcialmente el aporte térmico que normalmente procede del combustible fósil. La configuración ISCC mantiene también la capacidad de generación del ciclo combinado durante los periodos de baja disponibilidad solar.

Uno de los ejemplos más importantes es la planta Hassi R'Mel que se ubica en Argelia, es una de las primeras que implementó esta tecnología a una escala comercial. Cuenta con una potencia total aproximada de 150MW, de los cuales 25MW corresponden al aporte solar térmico mediante conectores cilindro-parabólicos. La energía solar se utiliza para complementar la generación de vapor del ciclo Rankine como en la mayoría de los casos. La planta comenzó su operación comercial alrededor del año 2011.



Figura 7: Planta Hassi R'Mel ubicada en Argelia.

Imagen extraída de https://www.idom.com/proyecto/ciclos-hibridos-en-hassi-rmel-argelia-150-mw-y-ain-beni-mathar-marruecos-450-mw/

Otro caso relevante es la planta de Ain Beni Mathar que se encuentra en Marruecos. Esta instalación cuenta con una capacidad neta de 470 MW, la cual está conformada por dos turbinas de gas, dos HRSG, una turbina de vapor y un campo solar cilindro-parabólico de 20 MW. La integración se realiza sobre una central de ciclo combinado convencional, de manera que la contribución solar sustituye parcialmente el consumo de combustible fósil, mientras que el ciclo del gas mantiene el funcionamiento principal de la instalación. Además, la configuración permite que la planta continúe suministrando electricidad cuando la disponibilidad del recurso solar es insuficiente.



Figura 8: Ain Beni Mathar ubicada en Marruecos

Imagen extraída de https://www.idom.com/proyecto/ciclos-hibridos-en-hassi-rmel-argelia-150-mw-y-ain-beni-mathar-marruecos-450-mw/

También, la planta Kuraymat en Egipto es otro ejemplo de aplicación de sistemas ISCC mediante colectores cilindro-parabólicos, la instalación combina una central de ciclo combinado de 140 MW con un campo solar térmico de 20 MW. En este caso, la energía solar se utiliza como aporte complementario al ciclo del vapor, reduciendo la cantidad de energía que debe obtenerse mediante combustible fósil.



Figura 9: Planta Kuraymat ubicada en Egipto

Imagen extraída de https://www.grupotsk.com/proyecto/central-hibrida-kuraymat-iscc-140-mw/

Las características de estas instalaciones permiten identificar algunos aspectos comunes de la integración termosolar en ciclos combinados. En primer lugar, la

potencia del ciclo combinado es considerablemente superior a la contribución solar, por lo que la energía solar funciona como un sistema complementario y no como la fuente principal de generación eléctrica. En estos ejemplos el campo solar representa aproximadamente entre el 4% y el 18% de la potencia del ciclo combinado, dependiendo de la instalación y de la forma en que se contabilice la contribución solar. Esta diferencia de escala permite mantener la flexibilidad y continuidad de operación, lo cual es una de las características principales de las centrales de ciclo combinado.

Estos proyectos muestran que la tecnología solar puede incorporarse al ciclo del vapor sin sustituir la turbina de gas. La energía solar puede emplearse para aportar calor en diferentes puntos del ciclo Rankine, mientras que los gases de escape de la turbina de gas continúan aprovechándose en la HRSG. Esta configuración resulta especialmente interesante para este trabajo, ya que permite plantear el campo solar como una fuente térmica auxiliar destinada al precalentamiento del agua de alimentación antes de su entrada por la HRSG, en lugar de utilizar la energía solar como único medio para producir el vapor requerido por la turbina.

Una característica importante para el diseño de este TFM es que el sistema solar debe considerarse dependiente de la disponibilidad del recurso solar y complementario al ciclo combinado. En ausencia de radiación suficiente, la central continúa proporcionando energía térmica necesaria mediante la turbina de gas y la HRSG. Esta característica diferencia la integración propuesta de una central termosolar independiente y permite conservar la flexibilidad operativa propia del ciclo combinado.

Por lo tanto, los proyectos ISCC analizados demuestran que la integración de energía solar térmica en centrales de ciclo combinado ha sido llevada a escala comercial y que los colectores cilindro-parabólicos son una tecnología adecuada para este tipo de aplicaciones. Estas experiencias sirven como referencia para la configuración propuesta en este trabajo, aunque el sistema desarrollado posteriormente se plantea con un objetivo más específico que es: utilizar la energía solar como apoyo al precalentamiento del agua de alimentación del ciclo Rankine, manteniendo el ciclo Brayton y la HRSG como elementos principales de la central.

# 5. METODOLOGÍA

## 5.1. Descripción del modelo de planta de ciclo combinado de referencia.

La planta que se usa de referencia en este estudio corresponde a una central de ciclo combinado, la cual como hemos dicho antes, integra un ciclo de gas (Brayton) y un ciclo de vapor (Rankine) con el objetivo de poder aprovechar más eficientemente la energía térmica que proviene de la combustión de un combustible fósil. Los gases de escape de la turbina de gas que aún poseen una temperatura elevada se utilizan para generar vapor en una caldera de recuperación de calor (HRSG), el cual se expande en una turbina de vapor para producir más energía.

El modelo de la planta utilizada se basa en una configuración convencional de ciclo combinado, la cual se compone principalmente de un compresor de aire, una cámara de combustión, una turbina de gas, caldera de recuperación de calor, turbina de vapor, condensador y una bomba de alimentación de agua. En el ciclo de gas, el aire pasa por el compresor y después se mezcla con combustible en la cámara de combustión, donde se libera la energía térmica. Los gases calientes se expanden en la turbina de gas generando trabajo mecánico que se transforma en energía eléctrica mediante un generador.

Después del ciclo del gas, los gases de escape se dirigen hacia la caldera de recuperación, en el cual se aprovecha su energía térmica para producir vapor a partir del agua de alimentación. En la mayoría de las configuraciones de plantas de ciclo combinado se incorporan quemadores suplementarios que añaden combustible adicional, con el propósito de incrementar la temperatura de los gases y aumentar la producción de vapor del ciclo Rankine, generando potencia adicional antes de ser llevado al condensador y recirculado de nuevo al sistema mediante una bomba de alimentación.

Este modelo se emplea como una base para el análisis termodinámico del sistema y para la evaluación de la integración de energía solar térmica en el proceso de precalentamiento del agua de alimentación. De esta forma, se establece un escenario que nos permite comparar el desempeño energético de la planta antes y después de la incorporación de la energía solar.

## 5.2. Hipótesis y condiciones de operación.

Para el desarrollo del modelo termodinámico primero se establecen las condiciones de operación y los parámetros de referencia que se emplearán para representar el sistema de generación, los cuales nos permitirán definir las características principales de la central de ciclo combinado y analizar la incorporación del sistema solar térmico.

Con esto planteado, se toma como planta de referencia la configuración de ciclo combinado estudiada por Duan y Wang (2018) en su trabajo sobre la integración de energía solar térmica en ciclos combinados. Esta configuración permite disponer de ciertos parámetros de referencia relacionados con la potencia generada, los caudales de operación, las presiones y las temperaturas de los principales equipos del ciclo Brayton-Rankine.

La configuración estudiada presenta una potencia eléctrica combinada de 388,12 MW, de los cuales 255,60 MW corresponden al ciclo Brayton y 132,52 MW al ciclo Rankine, con una eficiencia térmica global del 55,27%. Estos valores se utilizan en este trabajo como una referencia para establecer las dimensiones y condiciones generales del sistema de generación. El modelo que se desarrollará después mediante Python no pretende reproducir de forma exacta la planta de referencia, sino representar de una manera simplificada el comportamiento energético del ciclo Rankine y estudiar el efecto de incorporar energía solar térmica como una fuente complementaria de calor.

### 5.2.1. Planta de referencia.

La planta de referencia corresponde a una configuración de ciclo combinado, la cual está formada por una turbina de gas, una caldera de recuperación de calor (HRSG) y un ciclo Rankine de vapor. El sistema emplea una turbina de gas PG9351FA y una HRSG de tres niveles de presión, de acuerdo con la configuración estudiada por Duan y Wang (2018).

Los principales parámetros de operación que se consideran en la configuración se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 1: Parámetros de referencia de una planta de ciclo combinado considerados para la definición del modelo.

Fuente: Elaboración propia a partir de Duan y Wang (2018)

| Parámetro | Valor |
|---|---|
| Potencia del ciclo Brayton | 255,60 MW |
| Potencia del ciclo Rankine | 132,52 MW |
| Potencia eléctrica combinada | 388,12 MW |
| Eficiencia térmica combinada | 55,27 % |
| Caudal de entrada al compresor | 621,58 kg/s |
| Caudal de gases de escape | 635,66 kg/s |
| Relación de compresión | 15,4 |
| Eficiencia isentrópica del compresor | 87% |
| Eficiencia isentrópica de la turbina de gas | 90% |
| Temperatura de entrada a la turbina de gas | 1327 °C |
| Temperatura de escape de la turbina de gas | 610 °C |
| Presión de vapor HP | 16,5 MPa |

| | |
|---|---|
| Presión de vapor IP | 3,5 MPa |
| Presión de vapor LP | 0,4 MPa |
| Temperatura vapor sobrecalentado HP | 565 °C |
| Temperatura vapor sobrecalentado IP | 350 °C |
| Temperatura vapor sobrecalentado LP | 265 °C |
| Caudal de vapor HP | 73,02 kg/s |
| Caudal de vapor IP | 10,97 kg/s |
| Caudal de vapor LP | 17,01 kg/s |
| Temperatura de salida de gases del HRSG | 86,08 °C |
| Diferencia de temperatura de pinch del HRSG | 12 °C |
| Diferencia de temperatura de aproximación | 8 °C |
| Diferencia de temperatura del extremo caliente | 45 °C |

Estos parámetros permiten definir el orden de magnitud de la instalación y nos sirven como una referencia para el análisis posterior. Los valores de potencia y caudal permiten contextualizar los resultados obtenidos mediante el modelo simplificado y evitar que el análisis se base exclusivamente en parámetros independientes de una instalación de referencia.

La configuración de la planta de referencia se basa en la recuperación del calor contenido en los gases de escape de la turbina de gas, estos gases abandonan la turbina a una temperatura aproximada de 610 °C y atraviesan la HRSG, donde se transfiere parte de su energía térmica al agua del ciclo Rankine. De esta manera, el calor residual del ciclo Brayton es la principal fuente térmica del ciclo Rankine.

En el sistema propuesto en este TFM se añade una segunda fuente de aporte térmico mediante un campo solar de colectores cilindro-parabólicos. El calor captado por el campo solar se plantea como una contribución adicional que se destina principalmente al calentamiento de agua de alimentación antes de su entrada al sistema de recuperación de calor

### 5.2.2. Parámetros adoptados en el modelo simplificado.

Aunque la planta de referencia presenta una potencia de 388,12 MW y caudales de varios cientos de kg por segundo, reproducir todos sus equipos y estados termodinámicos requeriría un modelo detallado del ciclo Brayton, de la HRSG de tres niveles de presión y del ciclo Rankine.

Por este motivo, se desarrolla un modelo termodinámico simplificado y normalizado, centrado en el análisis del ciclo Rankine y de la contribución energética que aporta el campo solar. El ciclo Brayton se representa mediante un aporte térmico equivalente procedente de la HRSG, en lugar de calcular individualmente todos sus estados.

Para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua se utiliza la biblioteca CoolProp dentro del entorno de programación de Python. Los principales parámetros adoptados en el modelo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2: Parámetros utilizados en el modelo termodinámico.

| Parámetro | Símbolo | Valor | Unidad |
|---|---|---|---|

| | | | |
|---|---|---|---|
| Presión de baja | $P_{baja}$ | 101325 | Pa |
| Presión de alta | $P_{alta}$ | 8,0×1068,0\times10^6 | Pa |
| Temperatura de entrada a turbina | $T_3$ | 800 | K |
| Caudal másico de referencia | $\dot{m}$ | 1 | kg/s |
| Radiación solar | G | 2000 | W/m² |
| Eficiencia óptica nominal del colector | $n_0$ | 0,75 | – |
| Coeficiente de pérdidas lineales | $a_1$ | 0,5 | W/m²·K |
| Coeficiente de pérdidas cuadráticas | $a_2$ | 0,005 | W/m²·K² |
| Temperatura ambiente | $T_{amb}$ | 298 | K |
| Temperatura de entrada al campo solar | $T_{entrada}$ | 350 | K |
| Temperatura de salida del campo solar | $T_{salida}$ | 500 | K |
| Área solar analizada | $A$ | 100–1900 | m² |
| Aporte térmico nominal HRSG | $Q_{HRSG}$ | 2,0×1062,0\times10^6 | J/kg |
| Factor de aporte HRSG | $f_{Brayton}$ | 0,5 | – |
| Aporte térmico efectivo HRSG | $Q_{HRSG,ef}$ | 1,0×1061,0\times10^6 | J/kg |

El caudal de 1kg/s que se emplea en el modelo no representa el caudal real de la planta de referencia. Se utiliza como caudal másico para normalizar el análisis energético, esto para que los aportes de calor se puedan expresar en J/kg y se puedan comparar entre diferentes superficies de captación.

Esto permite analizar la influencia del campo solar sin la necesidad de dimensionar en esta fase todos los componentes de una central de 388,12 MW. La relación entre la planta de referencia y el modelo simplificado se establece de la siguiente manera: la primera proporciona el contexto y el orden de magnitud de una instalación de ciclo

combinado, mientras que el segundo permite estudiar específicamente el comportamiento de la integración solar propuesta.

La presión de alta del modelo se establece en 8 MPa, mientras que la presión de baja se considera igual a 101325 Pa. La temperatura de entrada a la turbina de vapor se fija en 800 K (526,85 °C). Estos valores permiten definir un ciclo Rankine simplificado compatible con el objetivo del estudio y facilitan el cálculo de las propiedades del agua mediante CoolProp.

Para el sistema solar se considera una radiación de 2000 W/$m^2$. Las temperaturas de entrada y salida del campo solar se establecen en 350 K y 500 K, obteniéndose una temperatura media de operación de:

La eficiencia térmica del colector se calcula de la siguiente manera:

Con los estos parámetros obtenemos una eficiencia del colector de aproximadamente 67,79%.

El calor útil disponible del campo solar se determina mediante:

Y el aporte específico correspondiente se obtiene con:

De esta forma el modelo nos permite estudiar la influencia directa del incremento de la superficie de captación sobre la energía térmica disponible para el ciclo Rankine.

### 5.2.3. Balance de masa y energía del modelo.

El modelo se desarrolla bajo condiciones de régimen estacionario, considerando un caudal másico constante a través de los principales elementos del ciclo Rankine. Bajo estas condiciones, el balance de masa se puede expresar como:

El ciclo comienza con el agua a la salida del condensador, que después es impulsada mediante la bomba hasta la presión de alta. El trabajo específico de la bomba se determina mediante la diferencia de entalpías.

Una vez que ya está presurizado, el fluido recibe el aporte térmico necesario para alcanzar la condición de entrada a la turbina. La demanda térmica específica del ciclo se obtiene mediante:

La expansión del vapor en la turbina se representa mediante una expansión isentrópica simplificada:

El trabajo específico de la turbina se obtiene como:

El aporte térmico que procede de la HRSG representa en el modelo simplificado la energía recuperada de los gases de escape de la turbina de gas:

Cuando el sistema funciona sin aporte solar, la energía restante necesaria para alcanzar las condiciones de entrada a la turbina se considera procedente del aporte térmico convencional:

En el escenario con integración solar, el balance energético se modifica incorporando el calor útil procedente del campo solar.

El calor solar realmente aprovechado se limita a la energía que todavía necesita el ciclo:

De esta manera se evita considerar un aporte solar superior al que se necesita y se representa la función del campo solar como una fuente térmica complementaria que se destina a sustituir parte del aporte convencional.

La eficiencia térmica del ciclo Rankine se calcula mediante:

Esta fórmula nos permite comparar el comportamiento del sistema en ausencia y presencia de energía solar, manteniendo constantes las condiciones termodinámicas principales del ciclo.

### 5.2.4. Hipótesis de operación

Para mantener el modelo dentro del alcance establecido se adoptan las siguientes hipótesis.

- Se considera un funcionamiento en régimen estacionario.
- El caudal de 1 kg/s no corresponde al caudal nominal de la planta, sino a una base de normalización del modelo.
- Las propiedades termodinámicas del agua se calculan mediante CoolProp.
- El ciclo Brayton no se desarrolla mediante cálculo detallado de sus estados termodinámicos.
- La contribución que le aporta el ciclo Brayton al Rankine se representa mediante un aporte térmico que equivale al de la HRSG.
- El campo solar se representa mediante un modelo simplificado de eficiencia de colectores cilindro-parabólicos.
- Se consideran condiciones solares de referencia constantes para comparar las diferentes superficies de captación
- El aporte solar se considera una fuente térmica complementaria y no modifica directamente la potencia del ciclo Brayton.
- El aporte solar se utiliza para sustituir parte de la energía convencional que se necesita para alcanzar las condiciones de operación del ciclo Rankine.
- No se considera almacenamiento térmico.
- No se realiza una simulación horaria o anual de la radiación solar.
- No se modelan individualmente las pérdidas de presión y temperatura asociadas a las tuberías e intercambiadores del circuito solar.

- El modelo no pretende realizar el dimensionamiento definitivo de una central de ciclo combinado híbrida, sino evaluar de una forma preliminar el potencial energético de la integración solar.

Con todo esto, la planta de referencia de 388,12 MW permite establecer un escenario realista de comparación en cuanto a potencia, caudales y condiciones de operación, mientras que el modelo simplificado desarrollado en Python permite centrar el análisis en la interacción entre el aporte térmico de la HRSG y la contribución solar al ciclo Rankine.

### 5.3. Modelado termodinámico del ciclo combinado.

El análisis del sistema del ciclo combinado se realiza con un modelo termodinámico que se basa en los principios de conservación de masa y energía aplicados a cada uno de los componentes principales del sistema. En el modelo se representa el comportamiento que tienen el ciclo Brayton y el ciclo Rankine bajo las condiciones de operación que se establecieron previamente, esto permite evaluar el desempeño energético global de la planta.

Para el ciclo Brayton, el modelo considera los procesos fundamentales de la compresión del aire realizada en el compresor, combustión del combustible en la cámara de combustión y la expansión de los gases calientes en la turbina de gas. Cada uno de estos procesos se describe mediante balances de energía que permiten que se determinen las temperaturas, las presiones y los trabajos asociados en cada etapa del ciclo. Del trabajo generado por la turbina de gas se utiliza una parte al principio para accionar el compresor y el resto se transforma en potencia útil para la generación eléctrica.

Por otra parte, el ciclo Rankine se modela considerando procesos de generación de vapor en la caldera de recuperación de calor, expansión de vapor en la turbina de vapor, la condensación que se genera en el condensador y el bombeo del agua de alimentación hacia el sistema. El calor residual contenido en los gases de escape que provienen de la turbina de gas es la fuente térmica principal para la generación de calor en la HRSG, esto permite incrementar la eficiencia global del sistema mediante el aprovechamiento de la energía que de otro modo se perdería dejando escapar estos gases al medio ambiente.

El modelo termodinámico se implementa en un entorno de simulación computacional, en el cual se van introduciendo las condiciones de operación y las hipótesis que se definieron previamente. Ya con estas condiciones, el modelo permite calcular los parámetros energéticos más relevantes del sistema como el trabajo neto producido, la eficiencia térmica del ciclo combinado y los flujos de energía entre los distintos componentes.

Este modelo es la base para el análisis comparativo posterior, en el cual se evaluará el efecto de la integración de energía solar térmica en el precalentamiento del agua de alimentación del ciclo Rankine. De esta forma, el sistema convencional nos sirve como referencia para poder determinar el impacto energético de la configuración híbrida que se propuso.

Para evaluar la eficiencia térmica se utiliza la siguiente fórmula:

Donde:

$W_{neto}$ : Es el trabajo neto producido por el sistema.

$Q_{in}$ : Es el calor suministrado por el combustible.

## 5.4. Integración del sistema solar térmico.

Integrar energía solar térmica en plantas de ciclo combinado es una estrategia de hibridación tecnológica que está orientada a mejorar la eficiencia del sistema y reducir el consumo de combustibles fósiles. En el presente estudio, la integración solar se plantea como un aporte térmico al ciclo Rankine, específicamente en la parte del precalentamiento del agua de alimentación antes de su ingreso a la caldera de recuperación de calor.

El principal objetivo de esta integración consiste en aprovechar la energía térmica captada por los sistemas de concentración solar para elevar la temperatura del agua de alimentación del ciclo del vapor, de esta manera se reduce la cantidad de calor que debe ser transferida desde los gases de escape de la turbina de gas para alcanzar las condiciones que se necesitan para generar el vapor en la HRSG.

En otras palabras, el aporte de la energía solar actúa como una fuente adicional de energía térmica en el sistema, esto permite que se reduzca el requerimiento energético que está asociado al proceso de generación del vapor. Con esto se produce una reducción del consumo específico del combustible que es necesario para producir una cierta cantidad de energía eléctrica, esto hace que mejore la eficiencia global del sistema.

La integración solar se puede implementar mediante diferentes tecnologías de captación térmica, como los colectores cilindro-parabólicos y las torres solares de concentración, estas permiten alcanzar las temperaturas necesarias para la generación eléctrica. En este trabajo, el sistema solar térmico se considera una fuente térmica que aporta calor al circuito de agua de alimentación antes de su entrada al sistema de generación de vapor.

Para poder analizar este sistema híbrido, el modelo termodinámico ya desarrollado se modifica agregándole el aporte de energía solar en el punto de precalentamiento del agua de alimentación. Esto nos dejará comparar el desempeño energético del ciclo combinado normal con el sistema híbrido que incluye la energía solar térmica, pudiendo evaluar así el impacto de esta integración sobre la eficiencia térmica del sistema y el consumo de combustible fósil.

De esta forma, la integración del sistema solar térmico contribuye a la reducción de emisiones y al aprovechamiento de recursos energéticos que son renovables y se plantea como una alternativa para complementar la generación eléctrica convencional.

## 5.5. Herramientas de simulación y análisis.

### 5.5.1. Uso de Python para el cálculo de ciclos termodinámicos.

Para elaborar este trabajo se empleó Python como herramienta principal para el modelo y simulación del sistema híbrido. Utilizar Python permitió automatizar los cálculos energéticos del ciclo combinado y facilitar el análisis de diferentes condiciones de operación relacionadas con la integración del precalentamiento solar térmico.

Con el objetivo de obtener las propiedades termodinámicas precisas del agua y vapor en los distintos estados del ciclo Rankine, se utilizó la librería CoolProp, que es muy empleada para aplicaciones de ingeniería térmica y energética. De esta manera se pudo calcular propiedades como la entalpía, entropía, temperatura y presión que son fundamentales para el análisis energético del sistema.

El modelo que se desarrolló representa un ciclo Rankine integrado con un sistema de recuperación de calor que proviene del ciclo Brayton mediante un generador de vapor de recuperación (HRSG), incorporando también un sistema de precalentamiento solar como fuente térmica complementaria. Para esto se definieron primero los estados termodinámicos principales del ciclo considerando procesos de bombeo, precalentamiento, evaporación, expansión en turbina y condensación.

Para el cálculo del ciclo Rankine se establecieron como condiciones de referencia una presión de 8 MPa en el lado de alta presión. El estado inicial del ciclo se consideró como un líquido saturado a la presión de condensación. A partir de este estado se calculó el trabajo específico de la bomba mediante el incremento de entalpía entre la entrada y la salida de la misma, después se puso una temperatura de 800 K (526 ºC) a la entrada de la turbina, lo cual mantiene una presión de alta de 8 MPa. La expansión de la turbina se calculó considerando un proceso ideal, utilizando la entropía como propiedad constante durante la expansión.

A partir de las propiedades obtenidas mediante CoolProp, se pudo determinar las principales magnitudes energéticas que tiene el ciclo. En el punto de entrada de la turbina se obtuvo una entalpía de aproximadamente 3465,51 kJ/kg, mientras que después de la expansión se obtuvo una entalpía aproximada de 2472,59 kJ/kg. Esto representa un trabajo específico de turbina aproximadamente de 992,92 kJ/kg. Por su parte, el trabajo específico de bombeo obtenido fue de 8,23 kJ/kg.

El calor necesario para llevar el agua desde la salida de la bomba hasta las condiciones de entrada de la turbina se pudo calcular mediante el balance de entalpías:

Lo cual dio un valor de 3038,22 kJ/kg.

Para representar la contribución térmica que procede den ciclo Brayton, el modelo utiliza un aporte equivalente de calor recuperado mediante la HRSG. El valor definido inicialmente fue de 2000 kJ/kg, a lo cual después se le aplicó un factor de 0,5 para representar de una forma simple la fracción considerada efectiva del modelo. Por lo tanto, el aporte térmico que se utiliza en los cálculos fue de 1000 kJ/kg. Esta representación permite incorporar el efecto de la recuperación del calor del ciclo Brayton sin desarrollar dentro del modelo un cálculo detallado de todos los estados del ciclo de la turbina de gas.

El aporte solar se incorporó posteriormente como una fuente térmica adicional al balance energético del ciclo Rankine. Para el análisis del campo solar se consideró una irradiancia de 2000 $W/m^2$, una eficiencia óptica de referencia de 0,75 y unas condiciones de operación del fluido térmico de entre 350 y 500 K. Con estos valores se pudo calcular una eficiencia del colector de 67,79% mediante la expresión:

Donde $T_m$ representa la temperatura media de operación del campo solar, $T_{amb}$ la temperatura del ambiente y $G$ la irradiancia solar.

El calor solar útil disponible se calculó en función del área de captación mediante:

Donde $A$ es el área del campo solar y $\dot{m}$ el flujo másico de referencia utilizado en el modelo. Para los cálculos se empleó un flujo másico de 1 kg/s, por lo que los resultados obtenidos se expresan principalmente como valores específicos por unidad de masa. Este valor no representa el caudal nominal de una central de ciclo combinado comercial, sino que se utiliza como referencia para normalizar el modelo energético.

En el escenario sin aporte solar, la energía necesaria que no se cubre por la HRSG se considera como aporte térmico procedente del combustible fósil. Cuando se incorpora el sistema solar, se sustituye progresivamente parte del aporte fósil. De esta manera, el modelo permite cuantificar directamente el ahorro de energía fósil asociado a diferentes superficies de captación.

El análisis se realizó considerando superficies solares comprendidas entre 100 y 1900 $m^2$ . Para una superficie de 1600 $m^2$ , el aporte solar es suficiente para cubrir la totalidad del aporte fósil restante. Por este motivo, esta superficie representa el mínimo valor analizado que permite alcanzar el máximo ahorro fósil del modelo y no representa un óptimo económico o de diseño definitivo. A partir de este punto, aumentar el área no produce un ahorro fósil adicional dentro de las condiciones consideradas.

Es importante señalar que el sistema solar se plantea como un apoyo al ciclo combinado y no como una sustitución del ciclo Brayton ni de la HRSG. El funcionamiento conceptual es el de un campo solar térmico que aporta calor para el precalentamiento del agua de alimentación, mientras que la recuperación del calor de los gases de escape de la turbina de gas continúa siendo parte del proceso convencional del ciclo combinado.

El modelo desarrollado representa condiciones estacionarias y no realiza una simulación horaria de la radiación solar. En consecuencia, cuando no existe radiación solar, el aporte $Q_{solar}$ se considera igual a cero y el sistema vuelve al funcionamiento convencional que se basa en la recuperación de calor de la HRSG con el aporte térmico fósil necesario. El análisis de variaciones horarias de irradiancia, nubosidad, almacenamiento térmico o estrategias de control queda fuera del alcance del modelo planteado.

A través del código que se hizo, se realizaron simulaciones variando diferentes condiciones de operación, una de las principales condiciones que más se varió fue el área de captación solar y la temperatura de entrada de la turbina. Esto permitió evaluar el efecto del aporte solar sobre variables clave del sistema como la eficiencia térmica, el consumo de combustible fósil y la distribución de energía global del ciclo.

En el caso que se analizó, la eficiencia térmica del ciclo Rankine se mantiene en 32,41% tanto con o sin aporte solar. Esto se debe a que el sistema solar no se utiliza para aumentar el trabajo producido por la turbina, sino para sustituir parte del aporte térmico fósil que se necesita para alcanzar las condiciones de operación establecidas. Por esto, el principal beneficio del modelo es la reducción del consumo de combustible fósil y no un incremento directo de la eficiencia termodinámica del ciclo Rankine.

Python también permitió presentar gráficamente los resultados que se fueron obteniendo mediante la librería Matplotlib, lo que facilitó el análisis comparativo entre las distintas configuraciones del sistema. Las gráficas incluyen la variación de la eficiencia térmica con la temperatura, la comparación entre operar con y sin precalentamiento solar, la distribución de fuentes de energía dentro del sistema híbrido y la reducción del consumo del combustible fósil.

Utilizar estos sistemas computacionales permitió reducir considerablemente el tiempo del cálculo, visualizar mejor los resultados y realizar estudios bajo múltiples escenarios.

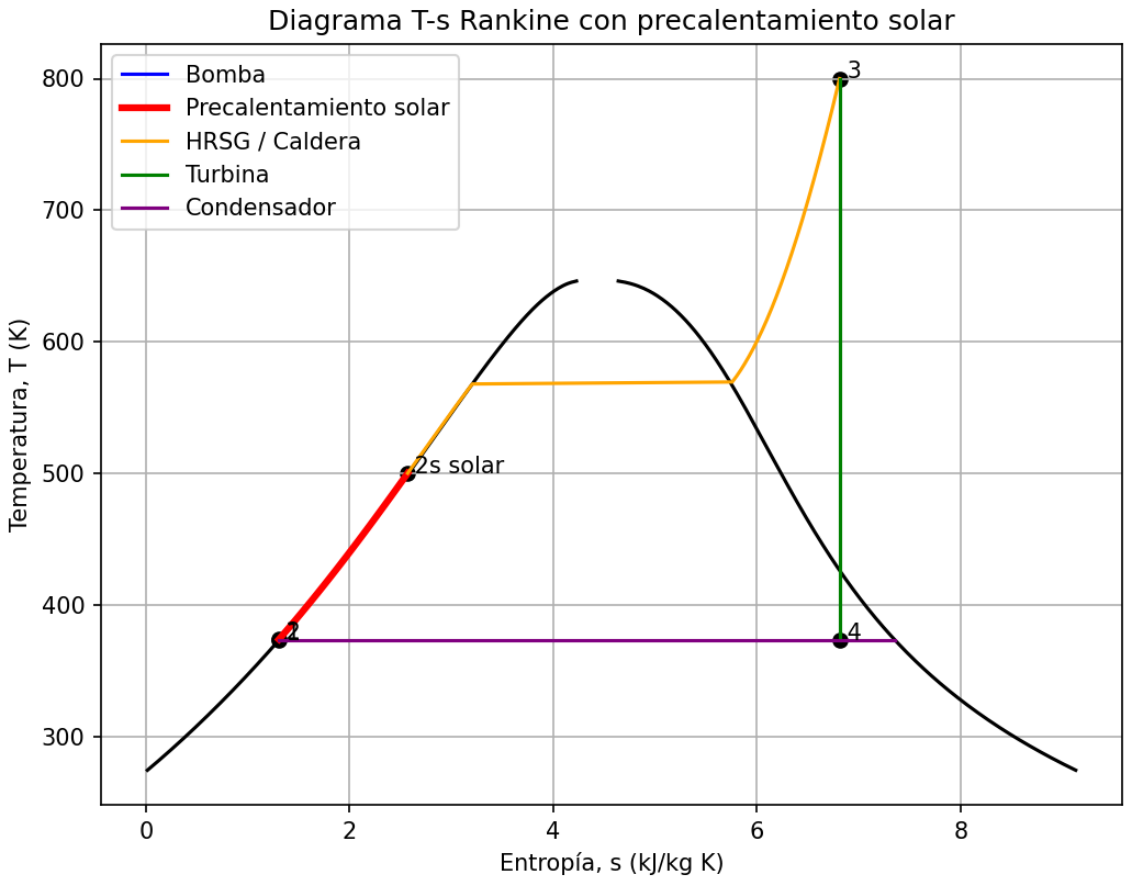



Figura 10: Diagrama T-S Rankine con precalentamiento solar.

La figura 10 muestra el diagrama temperatura-entropía (T-s) del ciclo Rankine considerado en el modelo, incluyendo el precalentamiento solar. El punto 1 representa la entrada del agua a la bomba, considerada como líquido saturado a la presión de baja del ciclo. El proceso de bombeo lleva el fluido hasta el punto 2, correspondiente

a la presión de alta del ciclo. A continuación, el tramo que se le denomina "precalentamiento solar" representa el incremento de temperatura del agua mediante el aporte térmico procedente del sistema solar antes de su entrada a la HRSG.

El punto 2S representa el estado del agua después del precalentamiento solar, mientras que el tramo posterior representa el aporte térmico asociado a la HRSG hasta alcanzar el estado 3, correspondiente a la entrada del vapor a la turbina. En este punto se considera una temperatura de 800 K (526 °C) y una presión de 8 MPa. La expansión del vapor desde el punto 3 hasta el punto 4 se considera isentrópica en el modelo, obteniéndose posteriormente el condensado a la presión de baja del ciclo. Finalmente, el proceso de condensación devuelve el fluido al estado inicial, lo cual cierra el ciclo.

El diagrama permite ver que el aporte solar no sustituye el proceso completo de generación de vapor, sino que actúa sobre una parte del calentamiento del agua antes de la HRSG. De esta manera, la energía térmica aportada después por la HRSG se reduce en la misma porción en que el aporte solar cubre parte de la demanda térmica considerada.

### 5.5.2. Balances de energía y eficiencia.

El análisis energético del sistema híbrido se realizó mediante balances de energía aplicados a los principales componentes del ciclo combinado. Para eso se consideró la interacción entre ciclo Brayton, el ciclo Rankine y el precalentamiento solar térmico.

En el modelo se considera que parte de la energía necesaria para elevar la temperatura del fluido de trabajo es suministrada por el calor que proviene de la HRSG, mientras que otra fracción puede ser aportada por medio de la energía solar térmica. En caso de que la energía suministrada por estas dos fuentes no sea suficiente, el sistema requeriría un aporte complementario de combustible fósil.

A partir de los balances energéticos desarrollados, fue posible cuantificar la contribución individual que aporta cada fuente de energía dentro del sistema. Esto permitió determinar la energía aportada por la solar térmica, el calor recuperado del ciclo Brayton y el combustible fósil requerido para completar el calentamiento del fluido de trabajo.

La eficiencia térmica del ciclo del vapor se calculó mediante la relación entre el trabajo neto desarrollado por la turbina de vapor y la energía total suministrada al ciclo Rankine. El trabajo útil de la turbina se obtuvo a partir de las diferencias de entalpía entre la entrada y la salida de la expansión, mientras que el trabajo consumido por la bomba fue considerado para determinar el rendimiento neto del ciclo.

Se desarrolló también un análisis comparativo entre la operación convencional y la operación con precalentamiento solar, evaluando el efecto del área de captación sobre el comportamiento energético global del sistema. Este análisis permitió identificar tendencias relacionadas con la reducción del consumo de combustible fósil y el aprovechamiento progresivo del aporte solar.

Los balances energéticos implementados también permitieron estudiar el comportamiento del sistema bajo diferentes superficies de captación solar bajo una condición de irradiancia de referencia, proporcionando una aproximación conceptual al comportamiento de una planta híbrida de ciclo combinado con integración termosolar.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la figura 11 y figura 12, en los cuales se muestra la distribución de las fuentes de energía y la reducción del consumo fósil en función del área solar considerada.

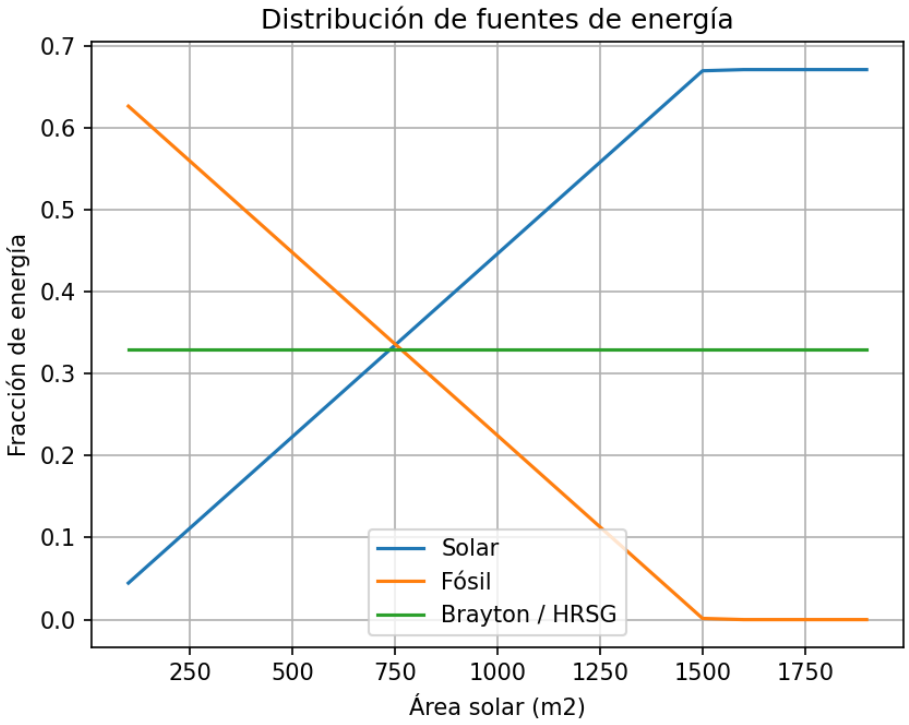



Figura 11: Distribución de fuentes de energía

La figura 11 muestra la contribución de cada fuente de energía sobre el calor total suministrado al ciclo Rankine en función del área solar. La línea verde corresponde a "Brayton/HRSG" y se mantiene constante en aproximadamente 0,33, o que representa la fracción del calor recuperado de los gases de escape de la turbina de gas que se considera en el modelo. La línea azul muestra el incremento del aporte solar según aumenta el área de captación, hasta alcanzar un máximo valor de 0,67 al llegar a los 1600 $m^2$ , momento en el cual el aporte fósil (línea naranja) se reduce a cero.

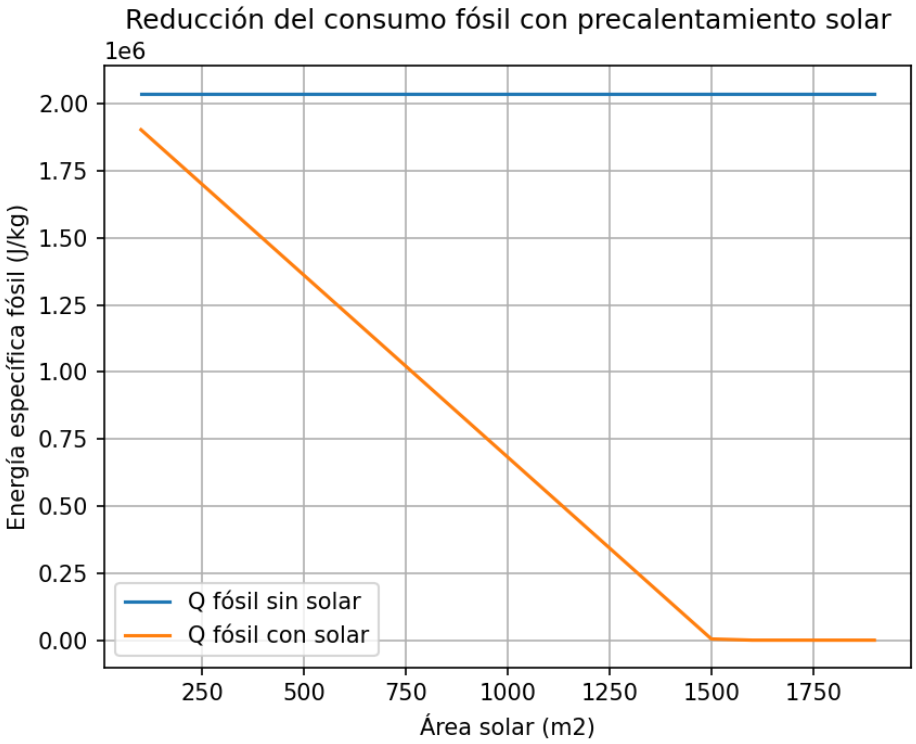



Figura 12: Reducción del consumo fósil.

La figura 12 presenta la energía específica de origen fósil necesaria para el calentamiento del fluido de trabajo. La línea azul corresponde al escenario sin precalentamiento solar con un valor constante. La línea naranja muestra la reducción del consumo fósil conforme aumenta el área solar, alcanzando un valor nulo para 1600 $m^2$ , lo que indica que, en las condiciones del modelo, el aporte solar es suficiente para cubrir la totalidad del aporte fósil restante. A partir de esta superficie el consumo fósil se mantiene en cero, ya que un mayor aumento del área no genera una reducción adicional dentro de las hipótesis consideradas.

### 5.5.3. Cálculo de rendimientos y consumos energéticos.

Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema híbrido bajo distintas condiciones al operar, se desarrolló un análisis paramétrico orientado al estudio de los rendimientos térmicos y del consumo energético asociado al sistema.

El análisis se centró principalmente en la influencia del área de captación solar sobre la eficiencia global del ciclo y sobre el consumo específico de combustible fósil. Para

esto se realizaron simulaciones variando progresivamente el tamaño del campo solar y observando el comportamiento energético que va resultando.

Los resultados obtenidos muestran que el incremento del área solar produce una reducción significativa del requerimiento de energía de combustible fósil, debido a que el sistema termo solar aporta parte del calor necesario durante la etapa de precalentamiento del fluido del trabajo. Esta reducción se presenta de forma progresiva hasta alcanzar una condición cercana al equilibrio energético, donde el aporte solar y el calor recuperado del HRSG son suficientes para cubrir prácticamente toda la demanda térmica que se considera en el modelo.

El modelo permitió identificar un área de captación cercana a 1600 $m^2$ como condición de máximo aprovechamiento energético, obteniendo un ahorro fósil superior a 2 MJ/kg y una reducción prácticamente total del consumo fósil complementario.

También se observó que el precalentamiento solar no produce incrementos muy elevados en la eficiencia térmica global del ciclo. Sin embargo, sí representa una mejora importante desde el punto de vista energético y ambiental, ya que reduce considerablemente la dependencia de combustibles fósiles sin modificar de forma significativa la infraestructura principal del sistema.

Se analizó al mismo tiempo el comportamiento de la eficiencia térmica en función de la temperatura de entrada en la turbina, en el cual se observó un incremento progresivo de la eficiencia conforme aumenta la temperatura del vapor. Este comportamiento coincide con la teoría termodinámica de los ciclos Brayton y Rankine, en donde mayores temperaturas de operación permiten obtener un mayor trabajo útil durante la expansión de la turbina.

Finalmente, los resultados que se obtuvieron permitieron establecer una relación entre el tamaño del campo solar y el aprovechamiento energético global del sistema híbrido, proporcionando una aproximación conceptual al potencial de integración de tecnologías termo solares en centrales de ciclo combinado.

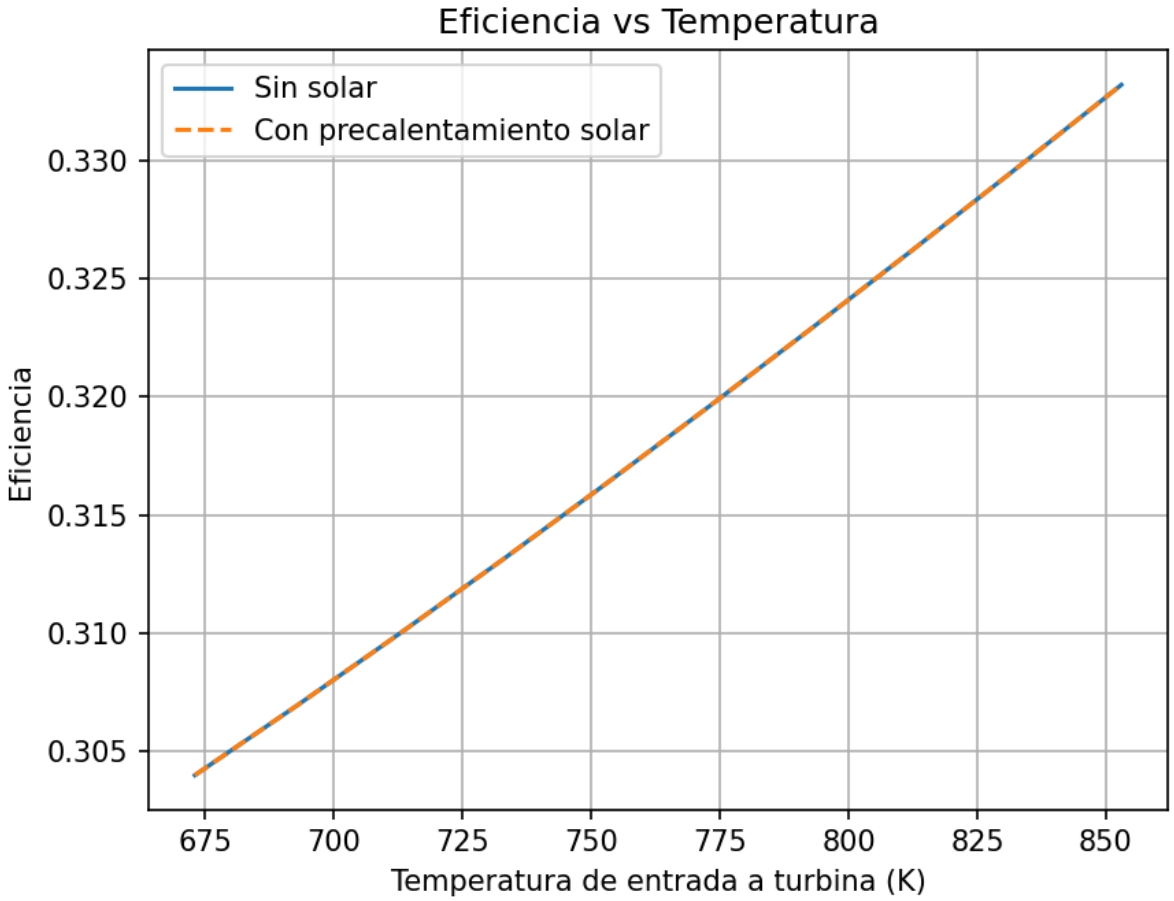



Figura 13: Eficiencia vs temperatura con y sin precalentamiento solar.

# 6. DESARROLLO DE LA PROPUESTA.

## 6.1. Análisis energético del ciclo combinado sin integración solar.

Una vez descrito el funcionamiento del ciclo combinado en el apartado 4.1.3, procederemos a analizar energéticamente la configuración base empleada en este trabajo. Este análisis es el punto de referencia desde donde se evaluará el impacto que tiene la integración de energía termo solar para el precalentamiento del líquido de trabajo.

La configuración usada de referencia es una central de ciclo combinado conformada por una turbina de gas operando bajo el ciclo Brayton y una de vapor operando bajo el ciclo Rankine. Los dos ciclos se encuentran acoplados mediante una caldera de recuperación (HRSG), la cual se encarga de aprovechar la energía térmica proveniente del ciclo Brayton.

El calor recuperado por la HRSG permite que se genera vapor para el ciclo Rankine, esto incrementa el aprovechamiento global de la energía contenida en el combustible. Incluso con esta recuperación de energía térmica, el sistema sigue dependiendo principalmente de combustibles fósiles para satisfacer los requerimientos energéticos de la planta.

Para el desarrollo del modelo termodinámico se consideró la configuración sin el aporte solar, donde toda la energía requerida para alcanzar las condiciones de operación del ciclo del vapor proviene del calor recuperado de la HRSG y cuando es necesario, también se implementa un aporte térmico adicional procedente de combustible fósil.

El análisis que se realizó con la simulación permitió determinar el comportamiento energético de esta configuración base, calculando parámetros como la energía suministrada al ciclo, el trabajo suministrado por la turbina de vapor y la eficiencia térmica global del sistema. Estos resultados constituyen la línea base frente a la cual se compararán después las mejoras por la incorporación del sistema termo solar.

Los resultados obtenidos muestran que el ciclo combinado presenta un comportamiento energético estable y una gran capacidad de aprovechamiento del calor residual. También se identifica una dependencia significativa del combustible fósil para cubrir la totalidad de la demanda térmica requerida por el ciclo Rankine,

especialmente cuando se buscan condiciones de operación que maximicen la producción de trabajo útil.

Esta dependencia representa una oportunidad para la incorporación de energías renovables capaces de suministrar parte de la energía térmica necesaria al ciclo del vapor. En este contexto, el uso de los sistemas de precalentamiento solar surge como una alternativa viable para reducir el consumo de combustible fósil sin modificar en gran medida la infraestructura de la central

Por lo tanto, el análisis de la configuración convencional permite establecer una referencia energética clara, la cual es necesaria para ver los beneficios asociados a la integración solar, tanto en términos de ahorro de combustible como de aprovechamiento energético global.

### 6.2. Diseño conceptual del sistema de precalentamiento solar del agua.

Con el objetivo de poder reducir el consumo de combustible fósil para el ciclo del vapor, se propone la integración de un sistema de precalentamiento solar térmico en una central de ciclo combinado convencional. La propuesta está basada en aprovechar la energía solar disponible para elevar parcialmente la temperatura del agua antes de su ingreso al sistema de recuperación de calor, de esta manera se disminuiría la energía térmica adicional que se requiere para alcanzar las condiciones de operación que se desean.

A diferencia de otras configuraciones híbridas donde la energía solar sustituye parte del proceso de generación del vapor, la propuesta de este trabajo se basa en la etapa del precalentamiento del fluido de trabajo. Esta estrategia tiene la ventaja de requerir modificaciones mucho más reducidas en la infraestructura que ya existe, lo que facilita su integración en las centrales de ciclo combinado.

El sistema que se propone está construido por un campo de colectores solares térmicos encargado de captar la radiación solar y transformarla en energía térmica, para esto se considera el uso de colectores cilindro-parabólicos, los cuales son una de las tecnologías más maduras y utilizadas en aplicaciones termo solares de generación eléctrica.

Los colectores emplean superficies que son reflectantes con geometría parabólica que concentran la radiación solar sobre un tubo receptor situado en la línea focal del

sistema. A través de este tubo circula un fluido térmico que se encarga de absorber la energía concentrada y transportarla hacia un intercambiador de calor. En la configuración planteada, el fluido de transferencia de calor (HTF) circula por el campo de colectores y transporta la energía térmica captada hasta el intercambiador de calor, donde esta se transfiere al agua de alimentación del ciclo Rankine. Para el modelo que se desarrolló en Python se consideran unas condiciones de referencia de entrada y salida del HTF de 300 K y 500 K, obteniéndose una temperatura media de operación de 425 K. Estas condiciones se emplean para estimar el rendimiento térmico del campo solar y el calor útil disponible para el precalentamiento. Este mecanismo permite alcanzar temperaturas superiores a las obtenidas mediante sistemas solares convencionales, aumentando el aprovechamiento energético de la instalación. Cabe señalar que, debido al carácter simplificado del modelo, no se desarrolla de forma independiente el balance termodinámico del circuito HTF ni se modelan las pérdidas específicas del intercambiador HTF-agua como calor solar útil disponible para el precalentamiento.

La energía térmica captada por el campo solar se transfiere al agua del ciclo Rankine mediante un intercambiador de calor, de esta manera el agua que procede de la bomba incrementa su temperatura antes de ingresar a la HRSG. Gracias a esto, se reduce la cantidad de energía térmica que debe de aportar el sistema convencional, lo que reduce el requerimiento de combustible fósil necesario para completar el calentamiento del fluido.

Desde el punto de vista energético, el sistema térmico solar actúa como una fuente térmica complementaria al calor recuperado de los gases de escape del ciclo Brayton. Por lo tanto, la energía térmica que se necesita para alcanzar las condiciones de operación del ciclo Rankine procede principalmente del calor recuperado de los gases de escape del ciclo Brayton, al que se le añade el aporte solar como una fuente térmica complementaria. Cuando el aporte solar no es suficiente para cubrir la demanda térmica, la fracción restante se considera como aporte térmico convencional (combustible fósil).

El aporte solar considerado NO tiene como objetivo alcanzar por sí solo la temperatura final del vapor a la entrada de la turbina. En las condiciones usadas en el modelo, la temperatura de salida del HTF es de 500 K (226 °C), mientras que la temperatura

objetivo del vapor a la entrada de la turbina es de 800 K (526 °C). Por lo tanto, el campo solar actúa exclusivamente como una fuente de precalentamiento, reduciendo la cantidad de energía térmica que debe aportar el sistema convencional para poder alcanzar las condiciones finales de operación del ciclo Rankine.

La figura 14 muestra de forma esquemática la integración de la propuesta. Puede observarse cómo el agua impulsada por la bomba atraviesa al principio el sistema de precalentamiento solar antes de que se incorpore al proceso convencional de recuperación de calor. Esta configuración permite aprovechar la energía solar disponible sin alterar significativamente el funcionamiento central de la planta.

El modelo desarrollado considera una condición de irradiancia solar de referencia y no realiza una simulación horaria de disponibilidad solar. En ausencia de radiación suficiente, el aporte solar se consideraría nulo y el ciclo combinado continuaría operando mediante su configuración convencional utilizando energía fósil si lo requiere. De esta manera, la integración solar se plantea como un sistema de apoyo que no condiciona la disponibilidad de la central. El análisis de la variación horaria de irradiancia, nubosidad y almacenamiento térmico queda fuera del alcance del presente trabajo.

La principal ventaja de esta estrategia está en la reducción progresiva del consumo de combustible fósil conforme aumenta la contribución solar. También ayudaría a reducir las emisiones asociadas a la generación eléctrica y se incrementa la participación de fuentes renovables.

Por lo tanto, la configuración propuesta permite estudiar el potencial de integración de un sistema solar térmico de precalentamiento en una central de ciclo combinado, manteniendo el funcionamiento convencional de la planta y utilizando el aporte solar como fuente térmica complementaria.

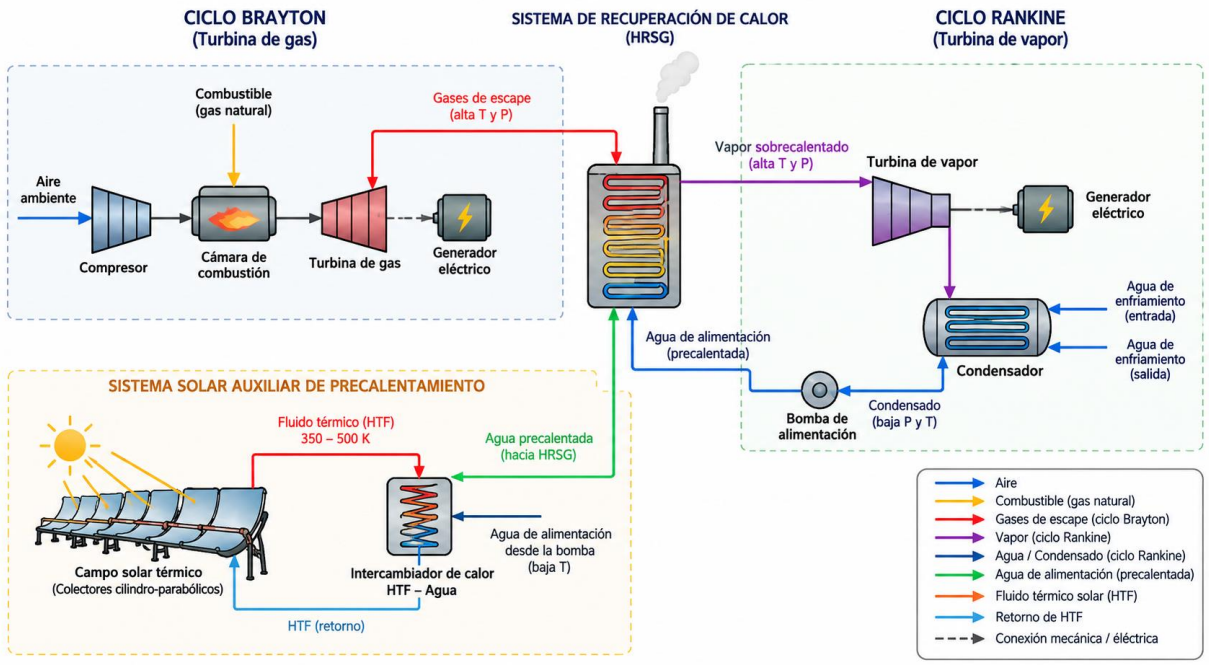



Figura 14: Integración conceptual del sistema de precalentamiento solar en una central de ciclo combinado.

Fuente: Elaboración propia con Inteligencia Artificial (ChatGPT).

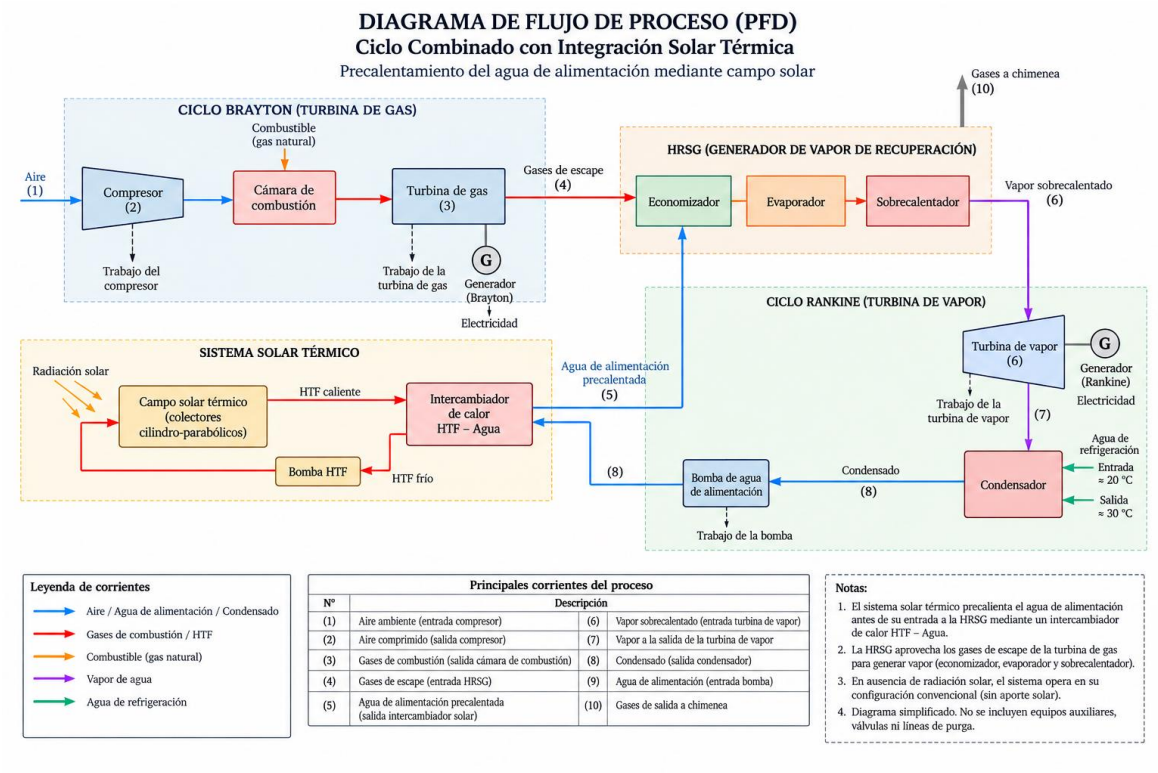



Figura 15: Diagrama de flujo de proceso (PFD) de la integración solar térmica en una central de ciclo combinado.

Fuente: Elaboración propia con Inteligencia Artificial (ChatGPT).

## 6.3. Evaluación energética del ciclo Rankine con apoyo solar.

Una vez definido el diseño conceptual del sistema de precalentamiento solar, se procedió a evaluar su influencia sobre el comportamiento energético del ciclo Rankine mediante el modelo termodinámico desarrollado en Python. El objetivo principal de este análisis consistió en cuantificar el efecto del aporte solar sobre las necesidades energéticas del ciclo de vapor y determinar su impacto en el consumo de combustible fósil y en el comportamiento térmico del ciclo Rankine.

La evaluación se realizó considerando un sistema híbrido en el que la energía solar no sustituye completamente al sistema convencional de recuperación de calor, sino que actúa como una fuente térmica complementaria durante la etapa de precalentamiento del agua de alimentación. De esta manera, el agua impulsada por la bomba incrementa parcialmente su temperatura antes de ingresar a la caldera de

recuperación de calor, esto reduce la energía adicional que se debe suministrar por el sistema convencional.

Para representar este comportamiento se desarrolló un modelo en Python utilizando la librería CoolProp para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua y del vapor. El modelo permitió obtener las propiedades de cada estado del ciclo Rankine, calcular los balances de energía y determinar el trabajo desarrollado por la turbina, el consumo energético del sistema y la eficiencia térmica bajo diferentes condiciones de operación.

Como variable principal de estudio se seleccionó el área de campo solar, evaluando progresivamente la influencia que tiene esta misma sobre el aporte térmico suministrado al agua de alimentación. Conforme aumenta el área de captación la cantidad de energía solar disponible también se incrementa, esto permite reducir la energía térmica procedente de combustible fósil necesaria para alcanzar las condiciones de operación del ciclo.

Los resultados obtenidos muestran que la integración del precalentamiento solar produce una disminución progresiva del consumo específico de combustible fósil, esto mantiene prácticamente constante la eficiencia térmica global del ciclo. Este comportamiento resulta coherente desde el punto de vista termodinámico, ya que el objetivo del sistema propuesto no es incrementar el rendimiento del ciclo Rankine, sino más bien sustituir parte de la energía convencional por una fuente renovable.

Asimismo, el modelo permitió analizar la distribución de distintas fuentes de energía que intervienen en el proceso. Conforme aumenta el aporte solar, la participación del combustible fósil disminuye de forma progresiva, mientras que la contribución de calor recuperado por la HRSG permanece prácticamente constante. Esta tendencia confirma que el Sistema Solar actúa como un complemento energético capaz de reducir la dependencia de combustible convencional sin modificar el funcionamiento principal del ciclo combinado.

El análisis también permitió identificar un área de captación próxima a los 1600 m² como condición máximo aprovechamiento energético dentro de las hipótesis consideradas en el modelo. Para esta condición el consumo específico de combustible fósil se reduce prácticamente hasta cero, alcanzándose un ahorro energético superior

a 2 MJ/kg. A partir de este punto, incrementos adicionales del área solar no generan mejoras apreciables debido a que la demanda térmica del proceso ya ha sido cubierta.

Desde el punto de vista de transición energética, estos resultados muestran que la integración de sistema solares térmicos puede representar una alternativa viable para disminuir el consumo de combustibles fósiles en centrales de ciclo combinado, aprovechando la infraestructura existente y reduciendo las emisiones asociadas a la generación eléctrica sin afectar significativamente la operación del sistema.

### 6.4. Comparación energética entre el escenario convencional y el sistema híbrido con integración termosolar.

Con el propósito de evaluar el impacto de la propuesta desarrollada, se realizó una comparación entre el funcionamiento convencional de una central de ciclo combinado y el sistema híbrido que incorpora el precalentamiento solar del agua de alimentación. Esta comparación permitió cuantificar los cambios producidos en el consumo de combustible fósil, la distribución de las fuentes de energía y el comportamiento térmico del ciclo Rankin.

Como condición de referencia, se consideró el funcionamiento convencional de la planta de ciclo combinado, en el cual la totalidad de la energía necesaria para el calentamiento del agua proviene del calor recuperado en la caldera de recuperación, cuando éste resulta insuficiente se le da un aporte térmico adicional con combustible fósil. En esta configuración la energía solar no participa en el balance energético del sistema.

En el escenario híbrido se incorpora un campo de colectores solares cilindro-parabólicos encargados de suministrar energía térmica durante la etapa de precalentamiento del agua. Esta contribución reduce progresivamente la energía convencional requerida para alcanzar las condiciones de operación del ciclo Rankin, esto hace que no se modifique el funcionamiento del ciclo Brayton y del resto de los equipos principales de la central.

La figura 13 representa la evolución de la eficiencia térmica del sistema en función de la temperatura de entrada de la turbina. Como podemos ver, el incremento de la temperatura favorece un mayor aprovechamiento energético del ciclo Rankin, así se

obtiene un aumento gradual de la eficiencia térmica. Sin embargo, la incorporación del precalentamiento solar produce únicamente variaciones poco significativas en este parámetro, ya que la energía solar actúa como una fuente de sustitución del combustible fósil y no como un mecanismo destinado a incrementar directamente el rendimiento termodinámico del ciclo.

El análisis de la distribución de fuentes de energía nos muestra una modificación importante en el balance energético de la planta. Conforme aumenta el área del campo solar la participación de energía solar dentro del sistema se incrementa progresivamente, mientras que la contribución o uso del combustible fósil disminuye de forma prácticamente proporcional. El aporte energético procedente del ciclo Brayton que se recupera mediante la HRSG permanece prácticamente constante durante todas las simulaciones, al tratarse de una condición propia del funcionamiento de la turbina de gas.

Uno de los resultados más relevantes del estudio corresponde a la reducción del consumo específico de combustible fósil. Las figuras 12 y 13 muestran que, conforme aumenta el área de captación solar la demanda de energía fósil disminuye de manera continua hasta alcanzar valores prácticamente nulos para un área cercana a los 1600 m². Bajo estas condiciones, el sistema híbrido es capaz de cubrir la totalidad de la demanda térmica asociada al precalentamiento mediante energía solar, esto hace que se elimine la necesidad de un aporte fósil adicional para la etapa de este proceso.

Este comportamiento se refleja también en el ahorro energético obtenido, en el cual se alcanza una reducción superior a los 2 MJ/kg de energía fósil respecto al escenario convencional. Este resultado nos muestra que hay un punto de operación óptimo desde el punto de vista técnico y energético, evitando el sobredimensionamiento innecesario del sistema solar.

Los resultados obtenidos demuestran que la incorporación de un sistema de precalentamiento solar constituye una estrategia eficaz para reducir el consumo de combustibles fósiles en centrales de ciclo combinado. Aunque la eficiencia térmica global del ciclo permanece prácticamente constante, el desplazamiento progresivo de combustible convencional por energía solar representa una mejora significativa en términos de sostenibilidad, reducción de emisiones y aprovechamiento de fuentes renovables. La propuesta también conserva la arquitectura básica de la planta, lo que

favorece su posible implementación en instalaciones existentes sin requerir modificaciones estructurales de gran magnitud.

### 6.5. Impacto energético y ambiental de la integración del sistema de precalentamiento solar.

Al incorporar un sistema de precalentamiento solar se modifica el balance energético del ciclo combinado al momento en el que se sustituye el aporte térmico convencional por energía que procede de una fuente renovable. Aunque el funcionamiento general de la planta prácticamente no se altera, la redistribución de las fuentes de energía produce efectos importantes desde el punto de vista ambiental.

De acuerdo con los resultados que se obtuvieron en el modelo desarrollado, podemos ver que la integración del sistema termosolar no genera un aumento significativo en la eficiencia térmica global del ciclo combinado. Este comportamiento era esperado, ya que la propuesta planteada no modifica el diseño termodinámico del ciclo Brayton ni el del ciclo Rankine, sino que actúa únicamente sobre la etapa de precalentamiento del agua de alimentación.

Gracias a esto, el trabajo realizado por la turbina de vapor y el rendimiento global de la planta permanecen prácticamente constantes. Sin embargo, la energía necesaria para alcanzar las condiciones de operación del ciclo se obtiene cada vez en mayor medida a partir del recurso solar, lo que reduce progresivamente el uso de combustible fósil.

Este resultado nos deja ver que el principal aporte del sistema híbrido no consiste en incrementar la eficiencia térmica de la planta, sino en mejorar la calidad de la energía empleada para producir la misma cantidad de trabajo útil. Para explicarlo de otra forma, el sistema mantiene un rendimiento similar al de una central convencional, pero disminuye la dependencia de combustibles fósiles mediante el aprovechamiento de una fuente renovable.

El análisis realizado también nos permitió identificar un área aproximada de 1600m $^2$ como condición de máximo aprovechamiento energético. Bajo esta condición, el aporte solar es suficiente para cubrir prácticamente la totalidad del precalentamiento del agua, lo que elimina la necesidad de un aporte fósil adicional en esta etapa del proceso. Este resultado nos dice que hay un punto óptimo de dimensionamiento, a

partir del cual incrementos adicionales del área solar ya no producen beneficios debido a que la demanda térmica del sistema ya ha sido satisfecha.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, esta estrategia nos da ventajas relevantes al reducir el consumo específico del combustible fósil y las emisiones de dióxido de carbono asociadas a la generación eléctrica. Además, la integración propuesta aprovecha la infraestructura ya existente del ciclo combinado, lo que representa una ventaja frente a otras alternativas que requieren modificaciones más profundas en la configuración de la planta.

Debe señalarse que el presente estudio corresponde a un modelo conceptual desarrollado bajo determinadas hipótesis simplificadoras, por lo que factores como las variaciones de irradiación solar, condiciones climáticas, pérdidas térmicas en tuberías e intercambiadores y la operación dinámica de la plata no han sido consideradas a detalle. No obstante, el modelo permite identificar de una forma consistente las tendencias energéticas asociadas a la integración del sistema termosolar y constituye una base sólida para futuros estudios de optimización y validación experimental.

En conjunto, los resultados que se obtuvieron permiten concluir que la implementación de un sistema de precalentamiento termosolar constituye una alternativa que es técnicamente viable para reducir el consumo de combustibles fósiles en centrales de ciclo combinado. Aunque el incremento de le eficiencia térmica global es reducido, la sustitución de la energía convencional por energía solar es una mejora significativa desde el punto de vista energético, ambiental y de transición hacia sistemas de generación que sean más sostenibles.

# 7. ANÁLISIS DE VIABILIDAD.

Una vez que ya se evaluó el comportamiento energético de la propuesta mediante el modelo termodinámico que se desarrolló, es necesario analizar la viabilidad de su implementación en una central de ciclo combinado. Aunque los resultados que se obtuvieron dejan ver que hay una reducción significativa del consumo de combustible fósil mediante el empleo de un sistema de precalentamiento solar, la aplicación de esta energía también depende de diferentes factores técnicos, económicos y ambientales.

En este capítulo se analizará la facilidad de integrar un sistema de energía solar térmica en una central de ciclo combinado convencional, considerando las características operativas de este tipo de instalaciones y las condiciones que se necesitan para su funcionamiento. También se examinarán las principales ventajas, limitaciones y retos asociados a su implementación, esto para establecer una valoración global de la propuesta que se desarrolló en este trabajo.

## 7.1. Viabilidad técnica de la integración de la energía solar térmica.

La integración de un Sistema Solar térmico en una central de ciclo combinado existente requiere analizar la compatibilidad entre el sistema de captación solar y los equipos que ya forman parte del ciclo de vapor. En la propuesta desarrollada en este trabajo, la energía solar no sustituye el ciclo Brayton ni a los principales equipos de ciclo Rankine, sino que se incorpora como una fuente térmica adicional para el precalentamiento del agua de alimentación antes de su entrada a la HRSG. Esta configuración permite mantener el funcionamiento convencional de la central y utilizar la energía solar como complemento del aporte térmico procedente de los gases de escape de la turbine de gas.

Desde el punto de vista de la infraestructura necesaria, la integración requiere principalmente la incorporación de un campo de colectores, cilindro-parabólicos, un circuito de circulación de fluido térmico (HTF), un intercambiador de calor entre HTF y el agua de ciclo Rankine, así como las correspondientes tuberías, bombas, instrumentación y sistemas de control. Estos elementos constituyen los principales componentes adicionales respecto a unas centrales de ciclo combinado convencional.

Debido a que el aporte solar se realiza en una etapa previa a la generación de vapor, la propuesta busca limitar las modificaciones sobre los equipos principales de la central, manteniendo la HRSG como elemento encargado de completar el aporte térmico necesario.

Una condición importante para la integración es la compatibilidad entre las condiciones de operación del Sistema Solar y las necesidades térmicas de ciclo Rankine. En el modelo desarrollado, el fluido térmico se considera como una temperatura de entrada de 350 K (76 °C) y una temperatura de salida de 500 K (226 °C), utilizando una temperatura media de 425 K (151 °C) para la estimación del rendimiento del campo solar. Bajo estas condiciones, el sistema solar proporciona un aporte térmico destinado al precalentamiento del agua, pero no constituye por sí mismo la fuente necesaria para alcanzar la temperatura de entrada del vapor a la turbina.

Esta última consideración es especialmente importante para determinar el papel que desempeña la energía solar dentro de la configuración propuesta. La temperatura considerada a la entrada turbina de vapor en el modelo es de 800 K (526 °C), mientras que la temperatura máxima considerada para el HTF a la salida del campo solar es de 500 K. Por lo tanto, el campo solar no puede proporcionar por sí solo toda la energía necesaria para alcanzar condiciones finales del vapor sobrecalentado. El aporte procedente de la energía solar debe entenderse como un precalentamiento que reduce la cantidad de energía térmica convencional necesaria posteriormente en la HRSG. De esta manera, el ciclo combinado conserva su capacidad para alcanzar las condiciones de operación requeridas, incluso cuando el aporte solar sea insuficiente.

Otro aspecto técnico relevante es la dependencia del sistema respecto a la disponibilidad de radiación solar. El modelo desarrollado utiliza una irradiancia solar de referencia de 2000 $W/m^2$ para analizar el efecto del incremento del área de captación. Esta condición representa un escenario de cálculo y no una condición constante de operación de una planta real. Durante periodos de baja irradiancia ausencia de radiación, el aporte solar disminuiría hasta desaparecer. En el límite de radiancia nula, el calor útil proporcionado por el campo solar sería igual a cero y la central recuperaría el funcionamiento convencional utilizando el calor disponible de la HRSG y el aporte térmico procedente del combustible fósil. Por tanto, la integración

propuesta no depende exclusivamente del sistema solar para mantener la generación eléctrica.

La superficie disponible constituye también una condición de diseño relevante. El análisis energético realizado mediante el modelo identifica una superficie de captación de aproximadamente 1600 m² como el mínimo de las áreas estudiadas que permite cubrir el aporte térmico fósil, que puede ser sustituido bajo las condiciones de cálculo adoptadas. Este valor no debe interpretarse como un tamaño óptimo definitivo del campo solar para la instalación real, ya que el dimensionamiento final dependería de la irradiancia disponible, las características del emplazamiento, las pérdidas térmicas, las condiciones de operación de la central y los costes de inversión. Además, aumentar el área por encima de este valor no proporciona un ahorro adicional de combustible en el modelo cuando la demanda térmica sustituible ya ha sido cubierta.

La integración también requiere un sistema de control capaz de coordinar el aporte térmico solar con el funcionamiento convencional de la central. En condiciones de suficiente radiación, el sistema solar puede proporcionar parte del calor necesario para el precalentamiento del agua, mientras que cuando este aporte disminuye, debe reducirse progresivamente su contribución y mantenerse el suministro térmico convencional. Este funcionamiento permite que la energía solar actúe como fuente complementaria sin comprometer la continuidad de operación del ciclo combinado.

Por otra parte, el modelo desarrollado presenta algunas simplificaciones que deben tenerse en cuenta al valorar la viabilidad técnica. El circuito de HTF y el intercambiador HTF-agua no se modelan como subsistemas independientes, sino que el aporte solar útil se incorpora directamente al balance energético del lado del agua. Por esto, las pérdidas térmicas específicas del circuito de transporte y del intercambiador no se calculan individualmente. Tampoco se realiza una simulación horaria de la irradiancia solar ni el comportamiento de la central a diferentes condiciones de carga. Estas cuestiones deberán analizarse en una etapa posterior mediante un modelo de mayor detalle.

En consecuencia, desde el punto de vista técnico, la propuesta presenta condiciones favorables para su integración conceptual en una central de ciclo combinado ya existente, principalmente porque mantiene la arquitectura fundamental de los ciclos Brayton y Rankine y utiliza la energía solar como porte térmico complementario. Sin

embargo, la implementación real requeriría una ingeniería de detalle que permitiera verificar la disponibilidad de espacio, dimensionamiento de campo solar, pérdidas del circuito HTF, las características del intercambiador, los sistemas de control y la compatibilidad con las condiciones específicas de operación de la central.

## 7.2. Viabilidad económica.

Además de demostrar la viabilidad técnica de la propuesta, resulta fundamental analizar su factibilidad desde el punto de vista económico. La incorporación de un sistema de precalentamiento solar implica una inversión inicial asociada a la adquisición e instalación de nuevos equipos, así como determinados costes de operación y mantenimiento durante la vida útil de la instalación.

Esta inversión puede verse compensada por la reducción progresiva del consumo de combustible fósil que se obtiene mediante el aprovechamiento de energía solar. Debido a esto la evaluación económica permite determinar si los beneficios derivados del ahorro energético justifican la implementación del sistema propuesto.

En este apartado se realizará una estimación conceptual de los principales costes asociados a la integración del sistema termosolar, considerando tanto la inversión inicial como los gastos de operación y mantenimiento. Asimismo, se analizarán de forma cualitativa los beneficios económicos derivados del ahorro de combustible y de la posible reducción de emisiones asociadas a la generación eléctrica.

### 7.2.1. Estimación de costes de instalación, operación y mantenimiento del sistema solar térmico.

La implementación de un sistema de precalentamiento solar basado en colectores cilindro parabólicos implica una inversión inicial asociada principalmente al campo solar, al sistema de transferencia de calor y a los equipos auxiliares necesarios para su integración con el ciclo Rankine. En este trabajo se realiza una estimación económica de carácter preliminar, con el objetivo de establecer el orden de magnitud de la investigación y no desarrollar un presupuesto de ingeniería de detalle.

De acuerdo con las referencias económicas consultadas, el coste del campo de colectores cilindro parabólicos puede estimarse en un rango aproximado de 150 a 200 € el $m^2$. Estudios realizados con la tecnología EuroTrough han reportado valores

cercanos a los 200 € el $m^2$ para este tipo de campo solar, por lo que para esta estimación se usará un valor de referencia de 170 € el $m^2$. Para el sistema de transferencia de calor como el HTF, tuberías, bombas e intercambio térmico, se adopta un valor de referencia de 70 € el $m^2$. Este valor se puede entender como una aproximación, ya que el coste real depende de las características del proyecto, la escala de instalación, la tecnología empleada y las condiciones de integración. (Widyolar, (2021))

Adicionalmente, el sistema de transporte de calor que influye en el fluido térmico, las tuberías, las bombas y los elementos necesarios para realizar el intercambio térmico representan una parte adicional de la inversión, para la estimación conceptual del trabajo se utiliza un coste de referencia de 70 € el $m^2$. Como en el caso anterior, estos valores son de aproximación y para tener una idea inicial de la inversión, no constituyen un presupuesto de ingeniería. El modelo emplea un caudal másico de 1kg/s para normalizar los balances energéticos, mientas que la planta de referencia presenta una potencia eléctrica combinada de 388,12 MW y caudales de operación significativamente superiores. Por lo tanto, sería necesario realizar un escalado posterior para determinar la superficie real del campo solar en una instalación de tamaño comercial.

En centrales termosolares de gran escala y en la literatura puesta en la bibliografía, los costes totales de instalación pueden alcanzar una cifra bastante más alta, debido a que corresponden a centrales de generación eléctrica completas, las cuales incluyen el campo solar, el bloque de potencia y sistemas de almacenamiento térmico, siendo el campo solar una de las principales componentes de la inversión total. Sin embargo, en el contexto de este trabajo se considera una integración parcial destinada únicamente al precalentamiento del agua, lo cual reduce significativamente la inversión requerida.

En cuanto a los costes de operación y mantenimiento, estos pueden ser relativamente bajos en comparación con la inversión inicial, debido a que principalmente las tareas que se hacen son de limpieza de colectores, mantenimiento de bombas y sistemas de control. Como una referencia para las instalaciones solares térmicas de este tipo, se ha visto en las mismas literaturas ya citadas que el coste de la operación y mantenimiento suele estar al rededor del 2% anual del coste del campo solar.

A partir de los valores anteriores es posible realizar una estimación simplificada del coste de implementación del sistema propuesto. Considerando una superficie de captación solar de aproximadamente 1600 m² obtenida en el análisis energético, con esto se puede estimar que:

- Campo solar: ~ 1600 m² x 170 €/m²: 272.000 €
- Sistema de transferencia de calor: ~ 1600 m² x 70 €/m²: 112.000 €
- Sistema de control e integración: ~ 30.000 €
- Instalación, ingeniería y puesta en marcha: Se considera un incremento de 20-30% adicional sobre los costos anteriores, el cual se utiliza como una hipótesis preliminar para representar costes indirectos que estén asociados a la integración del sistema.

Lo que conduce a una inversión total aproximada en el rango de aproximadamente:

500.000 - 540.000 €

Esta cifra representa únicamente la estimación conceptual del sistema de integración solar y no el coste de una central de ciclo combinado completa. Tampoco incluye un desglose detallado de obra civil, modificaciones específicas en los equipos existentes, contingencias permisos o ingeniería de detalle.

Para relacionar este orden de magnitud con la escala de la instalación de referencia, cuya potencia eléctrica es de 388,12 MW, la inversión estimada equivale a aproximadamente 1.290-1.390 €/MW de potencia eléctrica de referencia. Este indicador no debe interpretarse como un coste específico de instalación de un campo solar por MW de central, debido a que la superficie de 1600 $m^2$ procede de un modelo normalizado y no de un dimensionamiento físico de la planta completa. Su finalidad es únicamente facilitar la comparación entre la magnitud de la inversión considerada y la escala de la instalación de referencia.

En cuanto a los costes de operación y mantenimiento, las principales actividades asociadas al sistema solar serían la limpieza y mantenimiento de los colectores, inspección del circuito HTF, mantenimiento de bombas, válvulas, instrumentación y sistemas de control. Como aproximación preliminar, se considera un coste de un 2%

anual del coste del campo solar. Para el escenario considerado, esto supondría un aproximado de 5.440 €/año.

Finalmente, debe señalarse que la estimación económica presenta un grado de incertidumbre elevado debido al carácter conceptual del modelo. El coste real dependería principalmente de la superficie solar finalmente requerida, las condiciones de irradiancia del emplazamiento, la distancia entre el campo solar y la central, las modificaciones necesarias en la infraestructura ya existente y las condiciones comerciales de adquisición e instalación. Por este motivo, los valores obtenidos se utilizarán posteriormente para comparar el orden de magnitud de la inversión con el ahorro potencial de combustible, sin considerarlos como una predicción definitiva de rentabilidad.

### 7.2.2. Ahorro de combustible fósil y análisis económico comparativo.

El principal beneficio económico asociado a la integración del sistema de precalentamiento solar radica en la reducción de consumo de combustible fósil necesario para el calentamiento del agua en el ciclo Rankine. Este efecto se traduce a una disminución directa de los costes operativos de la planta.

A partir del modelo desarrollado en este trabajo, se ha estimado que el sistema de precalentamiento solar permite reducir el aporte térmico procedente de combustible fósil en aproximadamente 2,04 MJ/kg de vapor en condiciones óptimas. Este valor corresponde al aporte térmico fósil residual calculado por el modelo antes de la integración solar.

Para obtener una estimación coherente con el modelo desarrollado, se considera que el área de 1600 $m^2$como el mínimo de las áreas analizadas que permite alcanzar el máximo ahorro fósil bajo las condiciones de irradiancia consideradas. En este punto, el aporte solar úti queda limitado por el aporte fósil residual, alcanzándose un ahorro térmico fósil de aproximadamente 2,04 MJ/kg de vapor.

Bajo estas condiciones, el aporte solar representa un 67,1% del calor total requerido por el ciclo Rankine, mientras que el resto corresponde al aporte térmico procedente de la HRSG. Este resultado corresponde al caso de estudio bajo las condiciones de referencia utilizadas y no debe interpretarse como una fracción solar anual de una central real, ya que el modelo no contempla una simulación horaria de irradiancia.

Para evaluar el impacto económico, se adopta a un precio medio del gas natural de 30 EUR por mega watt térmico, equivalente a aproximadamente:

0.0083 €/MJ

Por lo tanto, el ahorro económico por unidad de masa de vapor es

Ahorro = ~ 2,04 MJ/kg x 0.0083 €/MJ = ~ 0.0169 €/kg de vapor

Este valor permite realizar una primera aproximación del valor económico del aporte térmico fósil sustituido. Sin embargo, debido a que el modelo utiliza un caudal normalizado de 1 kg/s, no resulta adecuado extrapolar directamente este valor a un ahorro económico anual de la planta sin disponer del caudal real de vapor, las horas efectivas de funcionamiento y el recurso solar disponible.

Por este motivo, el análisis económico se considera de carácter preliminar. El coste estimado de la integración obtenido en el apartado anterior, situado en aproximadamente 500.000 a 540.000 €, puede compararse con el valor del calor fósil sustituido, pero el periodo de retorno definitivo requiere un análisis anual más detallado que considere las condiciones reales de operación de la central.

En comparación con el escenario sin integración solar, donde el calentamiento del agua depende exclusivamente de combustible fósil, la propuesta permite reducir de forma significativa los costes operativos, bajo las condiciones de referencia analizadas, sin afectar la capacidad de generación ni la estabilidad del sistema.

Adicionalmente, la reducción del consumo de gas natural implica una disminución de las emisiones de $CO^2$, lo cual puede traducirse en beneficios económicos adicionales en contextos regulados mediante mercados de carbono o políticas de penalización de emisiones.

En conjunto, el análisis realizado permite identificar un potencial de ahorro térmico y económico asociado a la integración de energía solar térmica en el ciclo Rankine. No obstante, debido a las simplificaciones del modelo, los resultados económicos deben considerarse preliminares y no permiten establecer por sí solos la rentabilidad definitiva del sistema.

### 7.3. Viabilidad administrativa y regulatoria.

La implementación de un sistema de precalentamiento solar Integrado en una central de ciclo combinado ya existente requiere considerar el marco administrativo y regulatorio aplicable a las instalaciones de generación eléctrica y a las modificaciones de sus equipos e infraestructuras. En este sentido, la viabilidad administrativa de la propuesta depende principalmente de las características concretas de la modificación, su desplazamiento y de los posibles efectos que pueda producir sobre la instalación existente y sobre el medio ambiente.

En España, la ley 24/2013 del 26 de diciembre del sector eléctrico establece que la puesta en funcionamiento y modificación de las instalaciones de producción eléctrica están sometidas al régimen de autorizaciones administrativas correspondiente. La misma normativa contempla la necesidad de autorización administrativa previa y de construcción para determinadas modificaciones, aunque también permite que las modificaciones consideradas no sustanciales puedan quedar exentas de determinadas actualizaciones de acuerdo con lo que establezca la administración competente.

Esta consideración resulta especialmente relevante para la propuesta desarrollada en este trabajo, la integración del sistema solar térmico no pretende modificar la potencia eléctrica instalada de la central ni sustituir el ciclo Brayton, la HRCG o la turbina de vapor existentes. El sistema propuesto actúa como una fuente térmica complementaria destinada al precalentamiento del agua del ciclo Rankine. Por lo tanto, el proyecto presenta unas características diferentes a las de una instalación de generación eléctrica nueva, aunque la clasificación administrativa definitiva dependería del proyecto en ejecución y de la valoración realizada por el órgano competente.

Desde el punto de vista documental, una eventual implementación requeriría definir técnicamente el campo solar, los equipos de intercambio térmico, las tuberías, bombas, sistemas de control y los puntos de conexión con la instalación existente. En función del alcance de la modificación, podrían ser necesarios proyectos técnicos, certificados, permisos y autorizaciones asociados a las instalaciones industriales y también a las condiciones de seguridad de los equipos. La legislación eléctrica

también establece que las instalaciones y elementos técnicos deben cumplir las correspondientes formas de seguridad y calidad industrial.

En cuanto al material ambiental, también debe analizarse si la modificación propuesta está sometida a algún procedimiento de evaluación ambiental. La Ley 21/2013 del 9 de diciembre de evaluación ambiental, establece el marco aplicable a los proyectos que puedan producir efectos significativos sobre el medio ambiente y contempla procedimientos de evaluación ordinaria y simplificada en función de las características del proyecto y de sus posibles impactos.

Para este caso, algunos de los principales aspectos que deberían evaluarse serían la superficie ocupada por el campo solar, los posibles movimientos de Tierra, la afección al paisaje, la utilización de recursos híbridos, la generación de residuos durante la construcción y el mantenimiento, así como la posible afección a espacios naturales o elementos del patrimonio. La necesidad de realizar una evaluación ambiental concreta dependería de la localización y de las características definitivas del proyecto, por lo que no se puede afirmar de forma general que toda integración termosolar de este tipo esté sometido al mismo procedimiento ambiental.

Otro aspecto administrativo que sería importante señalar, es determinar si la actuación afecta a las condiciones de conexión eléctrica central. En este proyecto, el sistema temosolar propuesto no genera electricidad de forma independiente ni incorpora una nueva unidad de generación conectada a la red, sino que proporciona energía térmica al ciclo Rankine existente. Por ello, no se plantea un nuevo punto de conexión eléctrica como consecuencia directa de la integración solar. Esto diferencia la propuesta de una planta fotovoltaica o termosolar de generación independiente. El régimen de permisos de acceso y conexión establecido por el Real Decreto 1183/2020, está dirigido a las nuevas instalaciones que desean conectarse a redes de transporte o distribución.

Desde el punto de vista de carácter renovable, la situación requiere un análisis especial. El Real Decreto 413/2014 incluye dentro de la categoría de instalaciones que utilizan energías renovables no fósiles al grupo b.1, correspondiente a la energía solar y en el subgrupo b.1.2 para instalaciones que utilizan procesos térmicos para transformar energía solar en electricidad. Por lo tanto, la energía térmica procedente del campo solar considerada en este trabajo tiene un origen renovable.

Sin embargo, esta consideración no implica que toda la electricidad que se produce en un ciclo combinado que incorpore un sistema de precalentamiento solar pueda ser considerada automáticamente como electricidad renovable ni que pueda recibir directamente la retribución específica asociada a las instalaciones renovables. La normativa establece condiciones concretas para las instalaciones híbridas y para la percepción del régimen retributivo específico. En particular, el decreto 413/2014 contempla la hibridación tipo 3 cuando una instalación con derecho a régimen retributivo específico se incorpora una tecnología renovable, estableciendo además la necesidad de poder determinar de forma diferenciada la energía atribuible a cada tecnología mediante los equipos de medida correspondientes.

En el caso concreto de esta propuesta, la situación es muy particular, ya que el campo solar no genera electricidad de forma independiente, sino que aporta energía térmica al agua de alimentación del ciclo Rankine. Por lo tanto, la electricidad final se obtiene mediante el ciclo combinado y no mediante una unidad solar termoeléctrica independiente. Esto dificulta el poder atribuir de forma directa la totalidad de la electricidad producida a la fuente solar y hace necesario determinar mediante una metodología de atribución energética y los correspondientes sistemas de medida, qué parte de la energía eléctrica producida se puede asociar al aporte renovable.

Con todo esto más claro, no puede afirmarse a partir del análisis realizado que la electricidad que se generó mediante la configuración propuesta tenga automáticamente derecho a las retribuciones específicas correspondientes a la generación renovable. La energía térmica solar utilizada sí tiene carácter renovable, pero el reconocimiento regulatorio de la electricidad asociada y el acceso a un régimen retributivo dependerían de la configuración definitiva de la instalación, de su inscripción administrativa, de la metodología de imputación de la energía renovable y del régimen económico vigente en el momento de su puesta en funcionamiento. El Real Decreto 413/2014 establece que el régimen retributivo específico para instalaciones renovables se aplica bajo determinadas condiciones y, en el caso de instalaciones híbridas, también tiene contemplado reglas específicas para determinar la energía atribuible a cada tecnología.

Desde el punto de vista regulatorio, también será necesario considerar la normativa de seguridad industrial aplicable a los nuevos equipos y circuitos incorporados. El

sistema deberá garantizar las condiciones adecuadas de operación para elementos como tuberías, bombas, intercambiadores de calor, equipos de control y circuitos que trabajen a temperaturas y presiones elevadas. La integración deberá realizarse de forma que no se comprometa en las condiciones de seguridad ni la disponibilidad de la central existente.

En consecuencia, la integración propuesta presenta una viabilidad administrativa y regulatoria condicionada, debido principalmente a que esta se plantea como una modificación de carácter térmico sobre la infraestructura de generación ya existente y no como una construcción nueva de una central eléctrica independiente. Sin embargo, el reconocimiento del carácter renovable de la energía solar y especialmente el posible acceso a mecanismos de retribución asociados a la generación renovable, deberán determinarse específicamente para la configuración definitiva del proyecto.

En términos generales, el principal reto administrativo no estaría relacionado con la tecnología solar en sí misma, sino con determinar correctamente el alcance jurídico y técnico de la modificación, así como garantizar el cumplimiento de la normativa eléctrica, industrial, ambiental y de seguridad que se tenga que aplicar. Esta consideración refuerza la importancia de realizar una ingeniería de detalle antes de una eventual implementación comercial.

Tabla 3: Principales aspectos administrativos y regulatorios de la propuesta.

| Aspecto | Consideración para el proyecto |
|---|---|
| Modificación de la central existente | Debe determinarse si la modificación es sustancial o no sustancial. |
| Autorización administrativa | Dependerá del alcance definitivo de la modificación. |
| Evaluación ambiental | Debe determinarse según emplazamiento, características y posibles impactos. |
| Nueva conexión eléctrica | No prevista, al tratarse de un sistema térmico integrado. |
| Seguridad industrial | Aplicable a los nuevos equipos, tuberías y sistemas auxiliares. |
| Proyecto técnico de ejecución | Necesario para definir la integración y justificar el cumplimiento normativo. |

| | |
|---|---|
| Cumplimiento ambiental | Debe garantizarse durante construcción y operación. |
| Organismo competente | Dependerá de las competencias estatales y autonómicas aplicables. |

### 7.4. Análisis global de viabilidad del sistema propuesto.

La evaluación realizada en los apartados anteriores permite realizar un análisis en conjunto de la viabilidad del sistema de precalentamiento solar propuesto por su integración en una central de ciclo combinado. Para esto se consideraron 3 aspectos principales que fueron la viabilidad técnica, la viabilidad económica y la viabilidad administrativa y regulatoria. El análisis conjunto de estos 3 factores permite valorar no solamente el comportamiento energético del sistema, sino también las condiciones necesarias para su posible implementación en una instalación real.

Desde el punto de vista técnico, los resultados obtenidos demuestran que la integración de un campo solar térmico destinado al precalentamiento del agua de alimentación es compatible con la configuración general de una central de ciclo combinado. La propuesta no requiere modificar el funcionamiento fundamental del ciclo Brayton ni sustituir los principales equipos de ciclo Rankine, sino solamente incorporar una fuente térmica adicional en una etapa determinada de proceso, esta característica reduce lo complejo de la integración y permite mantener el aporte de la HRSG. y del sistema convencional como respaldo cuando la disponibilidad energética solar sea insuficiente.

Asimismo, el análisis energético realizado mediante el modelo desarrollado en Python permitió identificar un área de captación solar aproximadamente de 1600 m² como condición de máximo ahorro de combustible dentro de la hipótesis generada. A partir de este punto, un incremento adicional del área solar deja de producir beneficios proporcionales debido a que la demanda térmica que puede ser sustituida mediante el sistema termosolar ya se encuentra prácticamente cubierta. Este resultado constituye un criterio importante para evitar el sobredimensionamiento del campo solar.

Desde el punto de vista económico, la integración del sistema supone una inversión inicial asociada principalmente al campo de colectores, los sistemas de transferencia

de calor, los intercambiadores, las bombas, las tuberías, los sistemas de control y las labores de instalación. La estimación realizada de este trabajo proporciona un orden de magnitud inicial de la inversión necesaria, el cual deberá ser posteriormente refinado mediante presupuestos comerciales de una ingeniería de detalle.

El principal beneficio económico se encuentra en la reducción del consumo de combustible fósil. El modelo que se desarrolló permite estimar un ahorro energético máximo del orden de 2 MJ/kg en las condiciones analizadas, asociado al desplazamiento del aporte térmico convencional mediante energía solar. Al considerar las limitaciones propias de operación real como la disponibilidad de recurso solar, las pérdidas térmicas y las condiciones variables del funcionamiento de la planta, el ahorro económico efectivo será inferior al obtenido bajo condiciones Ideales. Por este motivo, los resultados económicos presentados deben interpretarse como una estimación preliminar destinada a determinar el orden de magnitud del proyecto y no como un presupuesto definitivo de inversión o rentabilidad.

En cuanto a la viabilidad administrativa y regulatoria, la propuesta presenta la ventaja de plantearse como una integración térmica dentro de una infraestructura de generación existente, en lugar de constituir una nueva central eléctrica independiente. A pesar de esto, una implementación real requerirá determinar el alcance administrativo de la modificación y comprobar el cumplimiento de la legislación eléctrica, ambiental, industrial y de seguridad aplicable. También sería necesario valorar las características específicas del emplazamiento, la superficie disponible y las posibles afecciones ambientales asociadas a la construcción del campo solar.

La siguiente tabla resume la valoración global de los principales aspectos analizados.

Tabla 4. Evaluación global de la viabilidad del sistema propuesto.

| Aspecto | Evaluación | Principales consideraciones |
|---|---|---|
| Viabilidad técnica | Favorable | Tecnología disponible e integración con el ciclo Rankine existente. |
| Viabilidad energética | Favorable | Reducción del aporte fósil y aprovechamiento del recurso solar. |

| | | |
|---|---|---|
| Viabilidad económica | Potencialmente favorable | Depende de la inversión final, precio del combustible y disponibilidad solar. |
| Viabilidad administrativa | Condicionada | Depende del alcance de la modificación y de las autorizaciones necesarias. |
| Viabilidad ambiental | Favorable | Reducción potencial del consumo de combustible y de las emisiones asociadas. |
| Integración en planta existente | Favorable | No requiere sustituir los principales equipos del ciclo combinado. |
| Riesgo de implementación | Moderado | Principalmente asociado a la variabilidad solar, integración y costes iniciales. |

# 8. RESULTADOS.

En este capítulo se presentarán los principales resultados obtenidos a partir del modelo termodinámico y energético que se desarrolló para evaluar la integración de un sistema de precalentamiento solar en una central de ciclo combinado. Los resultados permiten cuantificar el comportamiento del sistema de referencia y analizar las modificaciones producidas al incorporar la energía solar como fuente térmica complementaria. El análisis se centra principalmente en la evaluación de comportamiento energético del ciclo Rankine, la contribución de las diferentes fuentes de energía y la reducción de consumo de combustible fósil asociada a la integración del sistema termosolar. También se presentan los resultados correspondientes al dimensionamiento del campo solar y se identifica la condición de operación que proporciona mayor aprovechamiento energético dentro de las hipótesis consideradas.

Los resultados se organizan en diferentes apartados con el objetivo de analizar de forma independiente los aspectos energéticos, económicos y ambientales de la propuesta. En primer lugar, se presentan los resultados energéticos obtenidos mediante la simulación del ciclo termodinámico, después se analizan las implicaciones económicas derivadas del ahorro de combustible y finalmente, se consideran los beneficios ambientales asociados a la reducción del consumo de combustibles fósiles.

De esta manera, el capítulo permite establecer cuantitativamente los beneficios que se tienen mediante la integración del sistema de precalentamiento solar y proporciona los elementos necesarios para valorar el cumplimiento de los objetivos planteados en el presente trabajo.

## 8.1. Resultados energéticos.

A partir del modelo termodinámico desarrollado en Python se obtuvieron los principales resultados energéticos correspondientes al funcionamiento del ciclo combinado y a la integración del sistema de precalentamiento solar propuesto. El análisis permitió determinar el comportamiento del ciclo Rankine, cuantificar las diferentes contribuciones energéticas y evaluar el efecto de la incorporación de energía solar sobre el consumo de combustible fósil.

En primer lugar, el modelo permitió determinar el trabajo específico desarrollado por la turbina de vapor y el trabajo requerido por la bomba. Estos parámetros son una parte fundamental del balance energético del ciclo Rankine, ya que permiten determinar la cantidad de trabajo útil obtenida a partir de la energía térmica suministrada al sistema.

El análisis también permitió determinar la energía térmica necesaria para llevar el fluido de trabajo desde las condiciones de salida de la bomba hasta las condiciones de entrada de la turbina. Esta energía necesaria ayuda a determinar qué proporción puede ser cubierta mediante el calor recuperado en la HRSG, el aporte solar y cuando resulta necesario el combustible fósil.

La incorporación del sistema de precalentamiento solar modifica progresivamente este balance energético, a medida que aumenta el área del campo de colectores se incrementa la energía térmica captada y transferida de agua de alimentación. Como consecuencia de esto, disminuye la cantidad de energía que debe ser proporcionada mediante el combustible fósil para satisfacer las necesidades térmicas del ciclo.

El análisis realizado para diferentes áreas de captación permitió identificar un área aproximada de 1600 m² como condición de máximo ahorro de combustible fósil, dentro de la hipótesis considerada. Para esta condición, el modelo calculó un ahorro energético máximo de aproximadamente 2.038 MJ/kg, mientras que el aporte solar asociado al sistema permite reducir prácticamente hasta cero el aporte fósil adicional requerido para la etapa analizada.

La eficiencia del colector solar calculada para las condiciones consideradas en el modelo fue de aproximadamente 67.79%. Este valor representa la fracción de la radiación solar incidente que puede ser aprovechada como energía térmica útil por el sistema de captación bajo las condiciones de temperatura establecidas.

La eficiencia térmica del sistema es uno de los parámetros considerados en el modelo para evaluar la eficiencia del ciclo. Su análisis permite estudiar cómo la incorporación del aporte solar modifica el balance entre la energía térmica suministrada y el trabajo obtenido. El efecto de la integración solar se debe analizar en conjunto con la reducción del aporte fósil, debido a que el objetivo principal de la propuesta es sustituir parte de la energía procedente de combustible fósil mediante una fuente renovable.

En la siguiente tabla se presenta la distribución de las diferentes fuentes de energía en función del área de captación solar. Podemos observar que conforme aumenta el área del campo solar, la participación de la energía solar se incrementa y la contribución de combustible fósil disminuye. El aporte energético procedente del ciclo Brayton y recuperado mediante la HRSG permanece relativamente estable al mantenerse las condiciones consideradas para este sistema.

Tabla 5. Principales resultados energéticos del sistema de precalentamiento solar.

| Parámetro | Resultado |
|---|---|
| Presión de baja | 101,325 Pa |
| Presión de alta | 8 MPa |
| Temperatura de entrada a la turbina | 800 K |
| Radiación solar considerada | 2000 W/m² |
| Flujo másico de referencia | 1 kg/s |
| Aporte efectivo HRSG | 1,000,000 J/kg |
| Eficiencia del colector | 67.79% |
| Área mínima para alcanzar el máximo ahorro | 1600 m² |
| Máximo ahorro fósil | 2.038 MJ/kg |
| Aporte fósil mínimo en el modelo | 0 J/kg |

Estos resultados permiten establecer que la incorporación del sistema de precalentamiento solar modifica favorablemente el balance energético de la planta, al incrementar la participación de una fuente renovable y reducir el consumo de combustible fósil. El comportamiento obtenido mediante la simulación proporciona una buena base para evaluar las implicaciones económicas y ambientales de la propuesta.

En términos generales, el modelo que se desarrolló demuestra que el aprovechamiento de energía solar térmica puede cubrir una parte significativa de la

demanda energética asociada al calentamiento del agua del ciclo Rankine, la identificación de un área de aproximadamente 1600m² como la superficie mínima para alcanzar el máximo ahorro fósil permite además establecer un criterio de dimensionamiento inicial para el campo solar, evitando incremento de superficies que no produzcan beneficios energéticos adicionales.

## 8.2. Aprovechamiento del calor residual.

En una central de ciclo combinado, una parte fundamental de aprovechamiento energético procede de la recuperación del calor contenido en los gases de escape de la turbina de gas. Estos gases después de atravesar la turbina del ciclo Brayton, todavía contienen una cantidad importante de energía térmica que puede ser aprovechada mediante una caldera de recuperación de calor. Esta configuración actúa como elemento de conexión entre los ciclos Brayton y Rankine utilizando el calor residual de los gases para generar el vapor que posteriormente alimenta la turbina de vapor.

Para este trabajo se consideró un aporte térmico nominal de 2,000,000 J/kg procedente de la HRSG. Después, con un factor de contribución de 0.5 se estableció un aporte efectivo de 1,000,000 J/kg para el análisis realizado. Esta simplificación permite representar la contribución de calor recuperado procedente del ciclo Brayton dentro del balance energético empleado para estudiar la integración solar.

La importancia de este aporte radica en que la energía procedente de la HRSG constituye una fuente térmica ya disponible en la configuración del ciclo combinado. Por lo tanto, el sistema termosolar propuesto no sustituye directamente el aprovechamiento del calor residual, sino que actúa como una fuente térmica complementaria que permite reducir el aporte adicional de combustible fósil necesario para completar la demanda técnica del ciclo Rankine.

Esta diferencia es importante para interpretar los resultados obtenidos, ya que la incorporación de colectores solares no pretende reemplazar la función de la HRSG, sino más bien aprovechar una fuente renovable adicional antes de que sea necesario recurrir al aporte térmico convencional.

El modelo mantiene constante la contribución de la HRSG al variar el área solar. Por este motivo, en la gráfica de distribución de fuentes de energía, la participación asociada al Brayton/HRSG permanece relativamente estable, mientras que la participación solar aumenta progresivamente conforme se incrementa el área de captación.

Este comportamiento permite comprobar que la integración propuesta mantiene el principio fundamental del ciclo combinado, que es aprovechar el calor residual de la turbina de gas para producir vapor y generar trabajo adicional mediante el ciclo Rankine. La energía solar se incorpora de una forma complementaria en la que simplemente modifica la distribución del aporte térmico sin eliminar la recuperación del calor procedente del ciclo Brayton. La recuperación del calor de escape es precisamente uno de los elementos que permite que los ciclos combinados alcancen eficiencias superiores a los de los ciclos Brayton simples.

Desde el punto de vista energético, esta configuración presenta una ventaja adicional, la cual es que permite reducir la cantidad de energía térmica que se debe suministrar mediante el combustible fósil, sin desaprovechar la energía residual disponible en los gases de escape.

### 8.3. Análisis de sensibilidad e incertidumbre.

Los resultados que se obtuvieron mediante el modelo que se desarrolló dependen de una serie de parámetros de entrada que en una instalación real pueden presentar variaciones respecto a los valores utilizados en la simulación. Entre estos parámetros se encuentra la radiación solar disponible, la eficiencia de colector, las temperaturas de operación y el área destinada a la captación solar. Por este motivo, además de analizar el escenario de referencia, también es conveniente evaluar la sensibilidad del sistema frente a posibles variaciones de estas variables.

El análisis de sensibilidad permite terminar como una modificación en los parámetros de entrada afecta los resultados obtenidos por el modelo. En el caso de los sistemas solares térmicos, este tipo de análisis resulta especialmente relevante debido a la variabilidad natural de la radiación solar y a la dependencia del rendimiento del colector respecto a las condiciones de temperatura y operación.

Para este trabajo se consideran como principales variables de sensibilidad y radiación solar, la eficiencia del colector y el área de captación. Estas variables fueron seleccionadas debido a su influencia directa sobre la cantidad de energía solar útil que puede ser incorporada al ciclo Rankine**.** De acuerdo con el modelo que se utilizó, la energía solar aprovechable depende directamente de la relación independiente del área disponible y de la eficiencia del colector según la relación.

$$Q_{solar=G\cdot A\cdot n_{colector}}$$

En la que “G” representa la irradiación solar, “A” el área de captación y “n colector” la eficiencia térmica del colector.

Sensibilidad respecto a la irradiancia solar.

La irradiancia es una de las variables que tienen más influencia sobre la producción térmica del campo solar. En el este escenario se considera una irradiancia de 2,000 W/$m^2$, pero en condiciones reales, este valor varía a lo largo del día y del año como consecuencia de la posición solar, la nubosidad, la orientación del campo y condiciones atmosféricas.

Una disminución de la irradiancia disponible produce directamente una reducción de la energía térmica captada por los colectores. Como consecuencia de esto, el aporte solar disponible para el precalentamiento del agua disminuye y aumenta nuevamente la necesidad del aporte térmico convencional. Por lo contrario, condiciones de mayor irradiancia permiten incrementar el aprovechamiento solar hasta alcanzar el límite establecido por la demanda térmica del sistema.

Por lo tanto, el resultado obtenido por el área de 1600 m² debe interpretarse como unas condiciones de irradiancia consideradas en el modelo y no como un valor universal aplicable a cualquier emplazamiento o condición meteorológica.

Sensibilidad respecto a la eficiencia del colector.

La eficiencia del colector es algo fundamental, ya que determina qué fracción de la radiación incidente puede transformarse en energía térmica útil. Para las condiciones establecidas en el modelo se obtuvo una eficiencia de 67.79%.

Una reducción de esta eficiencia provocada por mayores pérdidas térmicas, temperaturas de operación superiores, suciedad, condiciones ambientales desfavorables u otros factores disminuiría la energía solar útil disponible. Al mismo tiempo, una mejora en el rendimiento del colector permitiría obtener una mayor cantidad de energía térmica utilizando la misma superficie de captación.

La incertidumbre asociada a la eficiencia del colector es especialmente relevante porque los modelos de rendimiento dependen de parámetros obtenidos mediante la caracterización y ensayo de los conectores.

Sensibilidad respecto al área de captación.

El área de captación constituye una variable directamente relacionada con el dimensionamiento del campo solar. En este modelo se analizaron varias superficies entre 100 y 1900 m², en las cuales se observaron un incremento progresivo del aporte solar conforme al Aumento del área.

Sin embargo, el incremento de superficie no produce indefinidamente un aumento del ahorro de combustible. Una vez cubierta la demanda térmica fósil considerada en el modelo, una superficie adicional no proporciona un beneficio energético equivalente. Ya que la energía solar adicional no puede ser utilizada como aporte útil dentro del balance establecido.

Este comportamiento permite identificar los 1600 m² como la superficie mínima analizada, capaz de alcanzar el máximo ahorro fósil bajo las condiciones de referencia. Por lo tanto, el resultado no debe interpretarse únicamente como un punto de máxima eficiencia, Sino como un criterio inicial de dimensionamiento que permite evitar un sobredimensionamiento del campo solar.

Incertidumbre de los resultados.

Además de la sensibilidad de los parámetros, existen incertidumbres asociadas a las simplificaciones realizadas en el modelo. Entre ellas se encuentra la utilización de irradiancia constante, la consideración de un flujo másico de referencia de 1 kg/S, la representación simplificada del aporte de la HRSG mediante un factor de 0.5 y la utilización de condiciones de temperatura constantes para el colector.

Estas hipótesis permiten desarrollar un modelo termodinámico manejable y comparar diferentes configuraciones, pero también hacen que los resultados deban interpretarse como estimaciones de carácter conceptual. En una instalación real sería necesario utilizar datos meteorológicos, horarios de emplazamiento, características comerciales de los colectores, curvas de rendimiento proporcionadas por el fabricante y condiciones reales de operación en la central.

Como consecuencia de todo esto, el valor de 1600 m² obtenido en este trabajo representa una condición de referencia derivada del modelo y no de un dimensionamiento definido de una instalación comercial.

En conjunto, el análisis de sensibilidad permite establecer qué rendimiento de la propuesta depende principalmente de la disposición de recurso solar, de la eficiencia real de los colectores y de las condiciones de operación e la instalación.

A pesar de estas incertidumbres, el comportamiento general identificado por el modelo se mantiene: el incremento del aprovechamiento solar permite reducir el aporte fósil hasta alcanzar el límite determinado por la demanda térmica considerada.

# 9. CONTRIBUCIONES A LA SOSTENIBILIDAD E INNOVACIÓN.

En este capítulo se analizarán las principales contribuciones que presenta el sistema propuesto desde una perspectiva de sostenibilidad energética y ambiental, así como los elementos innovadores y las aportaciones específicas desarrollada en el presente trabajo. La propuesta se plantea como una estrategia de integración de energía solar térmica en una central de ciclo combinado existente. Con el objetivo de aprovechar una fuente renovable para reducir parcialmente el aporte térmico procedente de combustibles fósiles.

## 9.1. Contribución del sistema propuesto a la sostenibilidad energética y ambiental.

La transición hacia sistemas energéticos más sostenibles requiere incrementar progresivamente la participación de fuentes renovables y al mismo tiempo, mejorar el aprovechamiento de las infraestructuras energéticas que ya existen. Por lo tanto, la propuesta desarrollada en este trabajo plantea la incorporación de energía solar térmica como fuente complementaria para el ciclo Rankine de una central de ciclo combinado.

La principal contribución desde el punto de vista de la sostenibilidad energética consiste en utilizar una fuente renovable para cubrir una parte de la demanda térmica necesaria para el funcionamiento del ciclo Rankine. De esta manera, la energía solar puede sustituir parcialmente el aporte que, si no fuera de esta manera, tendría que proceder de combustible fósil.

Los resultados obtenidos mediante el modelo desarrollado muestran que, bajo las condiciones consideradas, un área de captación de aproximadamente 1600 m² permite alcanzar el máximo ahorro de combustible fósil previsto por el modelo, con un ahorro energético específico de aproximadamente: 2.038 MJ/kg. Este resultado demuestra el potencial de integración de energía solar térmica para disminuir la dependencia de combustibles fósiles en el suministro de calor al ciclo.

Esta contribución adquiere especial importancia debido a que la propuesta no pretende sustituir completamente al sistema convencional, sino complementarlo. La central mantiene el funcionamiento del ciclo Brayton y el aprovechamiento del calor residual mediante la HRSG, mientras que la energía solar se incorpora como una

fuente térmica adicional. De esta forma, el sistema puede mantener su capacidad de operación convencional cuando las condiciones solares no sean suficientes.

Desde el punto de vista ambiental, la reducción del consumo de combustible fósil implica una reducción potencial a las emisiones asociadas a su combustión. Entre estas emisiones destaca principalmente el dióxido de carbono ($CO^2$), El cual es el responsable de una parte importante del impacto climático asociado a la generación eléctrica mediante combustibles fósiles.

La magnitud exacta de las emisiones evitadas dependerá de la cantidad de combustible realmente sustituida durante la operación de la planta y su correspondiente factor de emisión. Por este motivo, los resultados obtenidos en este trabajo permiten establecer el potencial de reducción, pero una cuantificación anual de las emisiones evitadas requeriría incorporar al modelo datos reales de operación, como el flujo másico de la planta, las horas anuales de funcionamiento, el recurso solar disponible y el combustible utilizado.

Otro aspecto relacionado con la sostenibilidad es el aprovechamiento de una infraestructura energética que ya existe. La propuesta utiliza el ciclo Rankine y los sistemas de recuperación de calor de la central, evitando plantear la construcción de una nueva unidad de generación eléctrica exclusivamente para aprovechar la energía solar. Esto permite plantear la integración renovable como una modificación progresiva de una infraestructura existente.

Además, la utilización de energía solar térmica permite reducir el consumo de recursos energéticos no renovables durante las horas en las que existe suficiente disponibilidad de recurso solar. Esta sustitución parcial puede contribuir a mejorar la sostenibilidad del proceso de generación eléctrica sin comprometer la capacidad de respaldo proporcionada por el sistema convencional.

Desde una perspectiva más amplia, la propuesta se encuentra alineada con los objetivos de transición hacia sistemas energéticos con una mayor participación de energías renovables, una menor intensidad de emisiones y un uso más eficiente de los recursos disponibles. Su aplicación podría resultar especialmente interesante en instalaciones localizadas en regiones con elevada disponibilidad de radiación solar y

con centrales de ciclo combinado que dispongan de un espacio suficiente para instalar un campo de captación térmica.

No obstante, debe considerarse que la sostenibilidad global del sistema no depende únicamente de la reducción del consumo de combustible durante su operación. Una evaluación ambiental completa debería considerar también los materiales utilizados en la fabricación de los colectores, las necesidades de agua, las actividades de construcción y mantenimiento y el final de vida de los componentes. Estos aspectos podrían ser estudiados posteriormente mediante un análisis de ciclo de vida.

En conjunto, los resultados permiten considerar que la integración de energía solar térmica propuesta presenta una contribución favorable a la sostenibilidad energética y ambiental, principalmente mediante la incorporación de una fuente renovable, la reducción potencial y el consumo de combustible fósil y el aprovechamiento de una infraestructura de generación que ya existe.

## 9.2. Componente innovador del trabajo y aportaciones del TFM.

El componente innovador de este trabajo no se encuentra en el desarrollo de una nueva tecnología de captación solar térmica, sino en el planteamiento de una estrategia de integración de esta tecnología dentro de una central de ciclo combinado que ya existe, utilizando la energía solar como fuente térmica complementaria para reducir el aporte de combustible fósil requerido por el ciclo Rankine.

La propuesta parte de la necesidad de mejorar el aprovechamiento energético de una infraestructura de generación convencional sin plantear la sustitución completa de sus equipos principales. El trabajo propone integrar el sistema termosolar en una etapa previa al aporte térmico convencional, de manera que el agua de alimentación pueda recibir una parte de la energía necesaria mediante una fuente renovable antes de completar su calentamiento mediante la HRSG Y el aporte fósil.

Una de las principales aportaciones del TFM es el planteamiento de una configuración híbrida entre el aprovechamiento del calor residual y la energía solar térmica. Mientras que el ciclo Brayton proporciona calor residual que es recuperado mediante la HRSG, el campo solar introduce una segunda fuente térmica que permite reducir el aporte adicional de combustible fósil. De esta manera, la propuesta aprovecha

simultáneamente recursos energéticos que presentan características diferentes, manteniendo el funcionamiento convencional de la central como sistema de respaldo.

Otra aportación que también es importante es el desarrollo de un modelo computacional mediante Python y CoolProp para representar el comportamiento termodinámico del sistema. El modelo permite calcular las propiedades del agua y del vapor en diferentes estados del ciclo, evaluar los balances energéticos y analizar el comportamiento de la integración solar para diferentes superficies de captación.

Gracias a este modelo se realiza un análisis paramétrico en el que se estudian diferentes áreas de captación solar comprendidas entre 100 y 1900 m². Esto permite observar la evolución del aporte solar y del consumo de combustible fósil y establece una condición de diseño de referencia.

Como resultado de este análisis, se identificó una superficie aproximadamente de 1600 m² como el área mínima analizada, capaz de alcanzar el máximo ahorro de combustible fósil bajo las condiciones establecidas. Para esta condición, el modelo obtiene un ahorro específico de aproximadamente 2.038 MJ/kg. Este resultado es una de las principales aportaciones cuantitativas del trabajo, ya que permite establecer un primer criterio para el dimensionamiento de campo solar.

Al mismo tiempo se incorpora un modelo de eficiencia del colector solar, que considera tanto la eficiencia de referencia como las pérdidas asociadas a la diferencia de temperatura entre el colector y el ambiente. Para las condiciones utilizadas en la simulación, se obtuvo una eficiencia de colector de aproximadamente 67.79%. Esto permite que la estimación del aporte solar no dependa únicamente de multiplicarla irradiancia por el área disponible, sino también que tenga en cuenta el rendimiento térmico del sistema de captación.

El trabajo también incorpora un análisis de sensibilidad e incertidumbre, mediante el cual se reconoce que los resultados dependen de variables como irradiancia solar, la eficiencia del colector y las condiciones de operación. Esta consideración permite interpretar los resultados de forma más realista y evita que se considere el área obtenida en la simulación como un valor universal aplicable a cualquier central o emplazamiento.

Desde un punto de vista más metodológico, otra aportación consiste en establecer una secuencia de evaluación que combina el análisis termodinámico, energético, económico y viabilidad. De esta manera, la propuesta no se limita a determinar si existe un aporte solar técnicamente posible, sino que analiza también sus implicaciones sobre el consumo energético, los costes, la sostenibilidad y las condiciones necesarias para una eventual implementación.

Gracias a esto, el trabajo puede servir como una metodología preliminar de evaluación para estudiar la integración de sistemas solares térmicos en centrales de ciclo combinado ya existentes. La metodología desarrollada podría adaptarse a diferentes condiciones de presión, temperatura, irradiancia, superficie disponible o características de los colectores, permitiendo estudiar distintos escenarios antes de realizar una ingeniería en detalle.

En conjunto, las principales aportaciones del TFM pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Propuesta de integración: Incorporación conceptual de energía solar térmica como apoyo del ciclo Rankine en una central de ciclo combinado ya existente.
- Aprovechamiento energético híbrido: Combinación del calor residual recuperado mediante la HRSG con el aporte térmico procedente del campo solar.
- Modelo termodinámico: Desarrollo de un modelo de Python mediante CoolProp para el cálculo de propiedades y balances energéticos.
- Análisis paramétrico: Evaluación del comportamiento del sistema para diferentes superficies de captación solar.
- Criterio de dimensionamiento: Identificación de aproximadamente 1600 m² como superficie mínima analizada para alcanzar el máximo ahorro fósil bajo condiciones del modelo.
- Evaluación del colector: Estimación de una eficiencia de aproximadamente 67.79% para las condiciones consideradas.
- Cuantificación energética: Determinación de un ahorro fósil máximo de aproximadamente 2.038 MJ/kg en el balance modelado.
- Análisis de sensibilidad: Evaluación de la influencia de las principales variables de entrada sobre los resultados.

- Evaluación integral: Conexión de los resultados energéticos con los aspectos económicos, ambientales, técnicos y regulatorios.

Por lo tanto, la aportación principal de este trabajo debe entenderse como el desarrollo y evaluación de una estrategia de integración energética, más que como la creación de una nueva tecnología solar. La combinación del modelo termodinámico, el análisis paramétrico y la evaluación de viabilidad proporciona una base para estudiar la incorporación progresiva de energía solar térmica e instalaciones de generación ya existentes.

Realmente los resultados obtenidos constituyen una primera aproximación. Para avanzar hacia una implementación sería necesario complementar el modelo con los datos de los horarios de irradiancia del emplazamiento, las características comerciales de los colectores, condiciones reales de operación de la central, costes de equipos y una simulación dinámica del sistema. Estos aspectos representan posibles líneas de continuación del trabajo y permitirán transformar la propuesta conceptual desarrollada en este TFM en un diseño de ingeniería de mayor nivel de detalle.

# 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este trabajo se analizó la posibilidad de integrar energía solar térmica como fuente complementaria de energía del ciclo Rankine de una central de ciclo combinado, con el objetivo principal de reducir el aporte térmico procedente de combustibles fósiles y mejorar el aprovechamiento energético global de la instalación.

A partir del modelo termodinámico desarrollado en Python y en los análisis energéticos, económicos, ambientales, técnicos y regulatorios realizados, se han obtenido una serie de conclusiones que permiten valorar el potencial de la propuesta y establecer recomendaciones para una posible implementación futura.

## 10.1. Conclusiones principales del estudio.

**Conclusión 1. Viabilidad técnica de la integración.**

La primera conclusión obtenida es que la integración de energía solar térmica en una central del ciclo combinado presenta condiciones técnicamente viables a nivel conceptual. A nivel conceptual, la propuesta permite incorporar una fuente renovable de calor al del ciclo Rankine, sin modificar el principio de funcionamiento del ciclo Brayton ni eliminar el aprovechamiento de calor residual de la HRSG. De esta manera, la energía solar funciona como un aporte complementario dentro de una infraestructura de generación ya existente.

**Conclusión 2. Desarrollo y utilidad del modelo termodinámico.**

El modelo que se desarrolló en este trabajo permitió representar los principales Estados termodinámicos de ciclo Rankine y evaluar el efecto de diferentes áreas de captación solar. La utilización de Python junto con la biblioteca CoolProp permitió realizar los cálculos de propiedades termodinámicas y desarrollar un análisis de la propuesta.

**Conclusión 3. Área de captación solar.**

Uno de los principales resultados corresponde al dimensionamiento del campo solar dentro del intervalo de superficies analizado entre 100 y 1900 m². Se logró identificar una superficie aproximada de 1600 m² como área mínima necesaria para poder

alcanzar el máximo ahorro de combustible fósil previsto por el modelo bajo las condiciones establecidas.

Para esta condición se obtuvo un ahorro específico máximo de aproximadamente: 2.038 MJ/kg. Este resultado representa la cantidad de energía procedente de combustible fósil que puede ser sustituida por el aporte solar dentro del balance térmico analizado. Debe señalarse que este resultado corresponde a las condiciones utilizadas en la simulación y no representa directamente el ahorro anual de una central comercial.

**Conclusión 4. Rendimiento del sistema solar.**

El modelo también permite obtener una eficiencia del colector solar de aproximadamente 67.79% para las condiciones de temperatura y radiación consideradas. Este resultado confirma que una parte significativa de la radiación solar incidente puede convertirse en energía térmica útil para el proceso de precalentamiento.

**Conclusión 5. Distribución de las fuentes térmicas.**

Otro resultado que también es relevante es que la incorporación del sistema termosolar modifica favorablemente la distribución de las fuentes de energía utilizadas por el ciclo Rankine. A medida que aumenta el área solar, aumenta la participación de energía renovable, mientras que disminuye la necesidad del aporte fósil. También la contribución procedente de calor residual del ciclo Brayton permanece como un componente fundamental del sistema, manteniéndose el principio del funcionamiento del ciclo combinado.

Por lo tanto, la propuesta no debe interpretarse como una sustitución de la HRSG por energía solar, sino como una integración de dos fuentes térmicas complementarias, que son el calor residual procedente del ciclo Brayton y la energía solar térmica. Esta configuración permite aprovechar tanto la energía que ya se encuentra disponible en los gases de escape como una fuente renovable adicional.

**Conclusión 6. Impacto ambiental.**

Desde el punto de vista ambiental, la reducción del aporte de combustible fósil implica una potencial reducción de emisiones por su combustión, principalmente de $Co^2$ .Una

cuantificación anual precisa de las emisiones evitadas requeriría disponer de datos reales de operación de la central, incluyendo el flujo de combustible, horas de funcionamiento, condiciones meteorológicas y el factor de emisión correspondiente.

**Conclusión 7. Consideraciones económicas.**

El análisis económico realizado muestra igualmente que la propuesta puede presentar un potencial favorable, aunque la rentabilidad definitiva depende de variables como el coste real de los colectores y equipos auxiliares, el precio del combustible, las horas de operación y la disponibilidad de recurso solar. Por ello, los resultados económicos obtenidos deben considerarse como una primera aproximación y no como una evaluación financiera definitiva.

**Conclusión 8. Viabilidad administrativa y regulatoria.**

En cuanto a la viabilidad administrativa y regulatoria, la integración presenta la ventaja de realizarse sobre una infraestructura existente y no de plantear una nueva unidad independiente de generación eléctrica. Sin embargo, una implementación real requeriría determinar el alcance exacto de la modificación y comprobar las autorizaciones y requisitos ambientales, industriales y de seguridad correspondientes. Asimismo, aunque la energía solar utilizada presenta un carácter renovable, el posible reconocimiento de la electricidad asociada y el acceso a las retribuciones correspondientes dependerían de la configuración definitiva de la instalación y del régimen regulatorio aplicable.

**Conclusión 9. Consideración global y limitaciones del modelo.**

En conjunto, se concluye que la integración de energía solar térmica constituye una estrategia técnicamente consistente para reducir parcialmente la dependencia de combustibles fósiles en el ciclo Rankine de una central de ciclo combinado. El modelo que se desarrolló proporciona además una herramienta inicial para analizar diferentes configuraciones y establecer criterios preliminares de dimensionamiento.

Finalmente, debe destacarse que los resultados obtenidos corresponden a un modelo conceptual. Por lo tanto, los valores obtenidos, especialmente en el área de 1600 $m^2$ y el ahorro específico de 2.038 MJ/Kg deben entenderse como resultados de referencia dentro de las condiciones estudiadas. Una implementación real requeriría una modelización más detallada y datos específicos del emplazamiento de la central.

## 10.2. Recomendaciones técnicas.

A partir de los resultados que se obtuvieron y de las limitaciones identificadas durante el desarrollo del trabajo, se plantea una serie de recomendaciones técnicas para profundizar el estudio y avanzar hacia una posible implementación real del sistema propuesto.

**Recomendación 1. Simulación horaria anual.**

En primer lugar, se recomienda realizar una simulación horaria y anual utilizando los datos reales de radiación solar correspondientes al emplazamiento concreto de la central. En el modelo desarrollado se utiliza una irradiancia de referencia constante, mientras que una instalación real la disponibilidad del recurso solar varía durante todo el día y a lo largo del año. La incorporación de datos meteorológicos permitiría determinar con mayor precisión la energía solar realmente aprovechable.

**Recomendación 2. Utilización de datos reales de operación.**

También sería recomendable utilizar datos reales de operación de una central de ciclo combinado, incluyendo el flujo másico de agua, el vapor, temperaturas y presiones de operación, la potencia eléctrica, condiciones de los gases de escape y comportamiento de la HRSG. Esto permitiría mejorar en la precisión de los resultados con parámetros reales de la central con la que se vaya a trabajar.

**Recomendación 3. Optimización del campo solar.**

Respecto al campo solar, se recomienda utilizar un estudio de optimización más detallado del área y de la configuración de los colectores. El resultado de 1600 m² es una referencia inicial, pero el dimensionamiento definitivo debería considerar factores como la orientación, inclinación, pérdidas ópticas, pérdidas térmicas y superficie disponible en la instalación.

**Recomendación 4. Diseño del intercambiador de calor.**

Otra recomendación sería estudiar con mayor detalle el intercambiador de calor encargado de transferir la energía solar al agua de alimentación. Su diseño deberá garantizar una transferencia térmica adecuada y, al mismo tiempo, evitar condiciones

que puedan afectar la estabilidad del ciclo y producir problemas asociados a las elevadas temperaturas y presiones de operación.

**Recomendación 5. Estrategia de control.**

Asimismo, sería conveniente desarrollar una estrategia de control y gestión de aportes solar. Esto debido a la variabilidad de radiación, el sistema debería ser capaz de ajustar automáticamente la contribución solar y mantener la estabilidad del ciclo Rankine. La HRSG y el sistema convencional deberían permanecer disponibles como respaldo durante periodos de baja irradiancia o ausencia de recurso solar.

**Recomendación 6. Análisis económico detallado.**

Desde el punto de vista económico, se recomienda realizar un estudio financiero más detallado que incluya costes reales de adquisición e instalación, operación y mantenimiento, vida útil de los equipos, inflación de precio futuro de combustible, costes de financiación y posibles costos asociados a las emisiones de $CO^2$. Esto permitirá calcular un periodo de retorno más realista.

**Recomendación 7. Análisis de ciclo de vida.**

También sería recomendable realizar un análisis del ciclo de vida de la instalación para complementar la evaluación ambiental realizada. Este análisis permitirá considerar no solamente las emisiones evitadas durante la operación, sino también los impactos asociados a la fabricación, transporte e instalación, mantenimiento y final de vida de los colectores y equipos auxiliares.

**Recomendación 8. Ingeniería de detalle.**

En definitiva, la principal recomendación es avanzar desde el modelo conceptual desarrollado en este TFM hacia el modelo de ingeniería de detalle, incorporando datos reales en una central, características comerciales de los equipos y condiciones meteorológicas del emplazamiento. Esto permitirá verificar los resultados obtenidos y determinar con mayor precisión la viabilidad técnica, económica y ambiental de la propuesta.

## 11. PERSPECTIVAS Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.

La integración de energía solar térmica en central del ciclo combinado puede representar una estrategia de transición energética especialmente interesante durante las próximas décadas. Aunque el desarrollo de nuevas instalaciones de generación eléctrica renovable continúa aumentando, las centrales de ciclo combinado existentes todavía pueden desempeñar un papel relevante como sistemas de respaldo debido a su capacidad de operación flexible y a su posibilidad de proporcionar energía de manera gestionable.

La hibridación de centrales convencionales con fuentes renovables puede conducir a una vía intermedia hacia sistemas eléctricos con menores emisiones. En lugar de plantear una sustitución inmediata de toda la infraestructura existente, la incorporación progresiva de fuentes renovables puede permitir reducir el consumo de combustibles fósiles mientras se mantiene parte de la capacidad de generación disponible. La energía solar térmica presenta una característica especialmente interesante para este propósito, ya que puede incorporarse directamente como aporte de calor a determinados procesos industriales y ciclos termodinámicos.

A futuro podría producirse una mayor incorporación de sistemas de hibridación solar en instalaciones de generación existentes, especialmente en regiones con elevada disponibilidad de radiación solar. La utilización de terrenos e infraestructuras ya asociados a centrales energéticas permitiría estudiar configuraciones en las que la energía solar complemente el funcionamiento convencional durante determinadas horas del día, reduciendo progresivamente la cantidad de combustible necesaria para alcanzar las condiciones de operación del ciclo.

Una evolución adicional de esta tecnología podría producirse mediante la incorporación de sistemas de almacenamiento térmico. El almacenamiento permitiría aprovechar el excedente de energía solar producido durante los periodos de mayor irradiancia y utilizarlo posteriormente cuando la radiación disminuya. Esto ampliaría el periodo durante el cual la energía solar puede contribuir al proceso y reduciría una de las principales limitaciones de las tecnologías solares, que es su variabilidad temporal.

La combinación de generación convencional flexible, energía solar térmica y almacenamiento podría adquirir especial relevancia durante el proceso de

transformación del sistema eléctrico. Mientras tecnologías como la solar fotovoltaica y la eólica continúan aumentando su participación, será necesario disponer de mecanismos que permitan gestionar las variaciones entre generación y demanda. En este escenario, las centrales existentes podrían desempeñar temporalmente una función de respaldo mientras se desarrollan y despliegan una mayor cantidad de tecnologías de almacenamiento eléctrico y otras soluciones de flexibilidad.

En este sentido, la evolución de las baterías y de otras tecnologías de almacenamiento energético será un factor determinante para el futuro de las centrales de ciclo combinado. La mejora progresiva de la densidad energética, costes, vida útil y capacidad de respuesta en los sistemas de almacenamiento podría reducir la necesidad de utilizar generación térmica como respaldo. Sin embargo, durante las etapas de transición, la hibridación de instalaciones existentes con fuentes renovables podría contribuir a disminuir su intensidad de emisiones, mientras que se desarrollan alternativas de almacenamiento y gestión de la demanda a mayor escala.

Otro posible desarrollo consiste en combinar la energía solar térmica con otras estrategias de descarbonización de las centrales ya existentes. Entre ellas se encuentran el uso de combustibles bajos en carbono, la incorporación progresiva de hidrógeno en determinadas condiciones y las tecnologías de captura y almacenamiento de $CO^2$. La combinación de estas soluciones podría permitir reducir progresivamente las emisiones de las centrales que continúen siendo necesarias para garantizar estabilidad del sistema eléctrico.

Desde una perspectiva más amplia, la principal oportunidad futura no consiste necesariamente en que la energía solar térmica sustituya por completo a las centrales de ciclo combinado, sino en que pueda utilizarse como una de las varias herramientas de transición energética. La combinación de diferentes tecnologías permitiría adaptar las soluciones a las características de cada instalación, disponibilidad de los recursos, demanda de energía y condiciones económicas.

El desarrollo de modelos digitales y herramientas de simulación cada vez más avanzadas, permitirá optimizar las configuraciones híbridas. La incorporación de inteligencia artificial, modelos predictivos y sistemas de control avanzados podría permitir anticipar la disponibilidad solar y ajustar dinámicamente la contribución de diferentes fuentes de energías. De esta manera, la integración renovable podría pasar

de ser un simple aporte complementario para convertirse en un elemento gestionado de forma inteligente dentro de la operación global de la central.

En este escenario a futuro, la experiencia obtenida mediante estudios conceptuales como el desarrollo de este TFM pueden servir como punto de partida para evaluar diferentes alternativas de hibridación. La identificación de las condiciones técnicas, energéticas y económicas que permite integrar fuentes renovables en infraestructuras existentes, puede contribuir al desarrollo de estrategias de transición que reduzcan progresivamente las emisiones sin comprometer de manera inmediata la seguridad y estabilidad del suministro eléctrico.

En definitiva, la perspectiva futura de hibridación solar térmica en central del ciclo combinado debe entenderse como una transición energética progresiva. La incorporación de energía solar, el desarrollo de almacenamiento térmico y eléctrico, la mejora de las baterías, la integración de combustibles de menor huella de carbono y el desarrollo de sistemas de control más avanzados pueden combinarse para reducir progresivamente las emisiones del sector eléctrico.

Por todo esto, la hibridación estudiada en este trabajo puede considerarse no solamente como una alternativa para mejorar el comportamiento energético de una instalación concreta, sino también como una posible estrategia de transición entre el modelo de generación convencional y un sistema energético con una participación mucho mayor de fuentes renovables y tecnologías de almacenamiento.

## BIBLIOGRAFIA


- Behar, O., Khellaf, A., & Mohammedi, K. (2013). A review of studies on central receiver solar thermal power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 12–39. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.017

- BOE. (2013). Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-12913

- BOE. (2013). Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-13645

- BOE. (2014). Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2014-6123

- BOE. (2020). Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2020-17278

- Boyce, M. P. (2012). Gas turbine engineering handbook (4th ed.). Elsevier.

- Çengel, Y. A., Boles, M. A., & Kanoğlu, M. (2019). Thermodynamics: An engineering approach (9th ed.). McGraw-Hill Education.

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes (4th ed.). Wiley.

- Franco, A., & Russo, A. (2002). Combined cycle plant efficiency increase based on the optimization of the heat recovery steam generator operating parameters. International Journal of Thermal Sciences, 41(9), 843–859.

https://doi.org/10.1016/S1290-0729(02)01378-9

- Geyer, M. A., Lüpfert, E., Osuna, R., Esteban, A., Schiel, W., Schweitzer, A., Zarza, E., Nava, P., Langenkamp, J., & Mandelberg, E. (2003). EuroTrough: Parabolic trough collector developed for cost efficient solar power generation. SolarPACES.

- Houghton Villoldo, O. (2016). Instalación solar térmica experimental de colectores cilindro parabólico. Universitat Politècnica de Catalunya. https://upcommons.upc.edu/entities/publication/40a2c320-4c15-4dde-9d49-6d967b87d7f7

- International Energy Agency. (2022). World energy outlook 2022. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022

- International Renewable Energy Agency. (2012). Renewable energy technologies: Cost analysis series: Concentrating solar power. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2012/RE_Technologies_Cost_Analysis-CSP.pdf

- International Renewable Energy Agency. (2022). Renewable power generation costs in 2021. https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021

- Kadak, A. C. (2008). Operational reactor safety 22.091/22.903. Massachusetts Institute of Technology. https://opencw.aprende.org/courses/nuclear-engineering/22-091-nuclear-reactor-safety-spring-2008/lecture-notes/MIT22_091S08_lec08.pdf

- Kehlhofer, R. H. (2009). Combined-cycle gas & steam turbine power plants (3rd ed.). PennWell.

- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). Fundamentals of engineering thermodynamics (9th ed.). Wiley.

- National Renewable Energy Laboratory. (2020). Concentrating solar power projects database. U.S. Department of Energy. https://www.nrel.gov/solar/data-tools.html

- SmartGridsInfo. (2021, November 30). La USAL estudia el potencial de las plantas termosolares en la generación de energía eléctrica. https://www.smartgridsinfo.es/2021/11/30/usal-estudia-potencial-plantas-termosolares-generacion-energia-electrica

- Widyolar, B., Jiang, L., Bhusal, Y., Brinkley, J., & Winston, R. (2021). Solar thermal process heating with the external compound parabolic concentrator (XCPC) – 45 m² experimental array performance, annual generation (kWh/m²-year), and economics. Solar Energy, 230, 131–150. https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.027