

INFORME DEL PROYECTO REF. SV-23-GIJÓN-1-08

Modelo para el estudio de las condiciones de inyección del vapor de
agua proveniente de plantas termosolares en ciclos combinados
(MINYC-SOLCC)

Fechas inicial y final del proyecto:

01 / 09 / 2023 al 30 / 12 / 2023

Investigador/a Principal:

PEDRO GARCÍA REGODESEVES

Otros investigadores:

ANDRÉS MEANA FERNÁNDEZ, GUILLERMO LAINE CUERVO, JORGE LUIS
PARRONDO GAYO, MARÍA JOSÉ SUÁREZ LÓPEZ, RAÚL BARRIO PEROTTI

Personal contratado:

PAULA IGLESIAS VARELA

Fechas inicial y final de contratación:

01 / 09 / 2023 al 30 / 12 / 2023

Empresas o instituciones colaboradoras:

TSK Electrónica y Electricidad

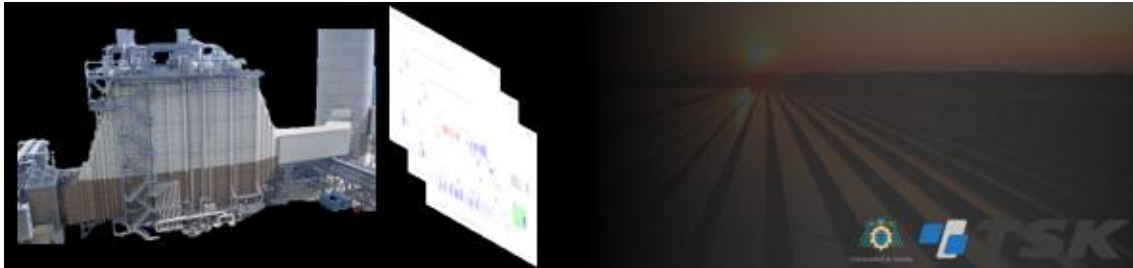
Redes sociales de investigadores y empresas:

TSK LinkedIn: <https://www.linkedin.com/company/grupotsk/>

TSK web: <https://www.grupotsk.com/>

Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo: <https://energia.uniovi.es/>

Resumen Gráfico



Memoria descriptiva del proyecto

1. Resumen ejecutivo

La tecnología de ciclos combinados tiene un papel destacado dentro del mix eléctrico para cubrir la demanda de energía, siendo de importancia su contribución en los picos de generación diaria. Así, de acuerdo con el Balance Energético de España, elaborado por la Secretaría de Estado de Energía, el consumo de gas natural supuso un 18,6% de la energía final total en 2021. Con relación al gas natural, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, encargado de elaborar balances periódicos del estado de la Fase de Alerta, del nivel de llenado de los almacenamientos y del nivel de consecución del compromiso de reducción de la demanda de gas natural, entre otros indicadores, muestra un descenso de un 21%-23% en el consumo de gas natural. Por otro lado, la Unión Europea está inmersa en el reto de la transición energética para la reducción de la contaminación ambiental mediante la adopción de fuentes de energía renovables. En este contexto, la hibridación de plantas convencionales de ciclo combinado existentes, mediante la integración con un campo termosolar, resulta potencialmente beneficiosa al reducir tanto el consumo de gas natural como el coste de integración de la energía solar en la red. De entre los retos que surgen de la adopción de esta tecnología, este trabajo principalmente se centra en evaluar la inyección en el ciclo combinado del vapor de agua generado en el campo solar. Así, se ha hecho un estudio termodinámico para valorar en términos de eficiencia neta del ciclo la idoneidad de los puntos del ciclo combinado que son a priori candidatos. Adicionalmente, el trabajo también plantea la conveniencia de usar un sistema de inyección basado en el efecto Venturi, en contraposición a un sistema convencional de unión en te.

La Figura 1 muestra un esquema del funcionamiento de la planta de ciclo combinado similar al que se plantea realizar la integración del campo solar. En la parte superior se encuentra el ciclo Bryton con la turbina de gas, en la parte inferior derecha se encuentra el ciclo Rankine con la turbina de vapor. Ocupando la posición central se tiene el conjunto HRSG, que combina el aporte de ambos ciclos para elevar la eficiencia global del ciclo. En general, un módulo HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*) está integrado por un sobrecalentador (S), un evaporador (E), un economizador (E) y un calderín (D). El ciclo que se analizará en este proyecto consta de una parte de alta (H), media (I) y baja (B) presión (P), lo que requiere de los correspondientes módulos SEED en el HRSG. La representación del campo termosolar se encuentra la parte inferior izquierda. El ciclo cuenta además con un recalentador (R), un condensador y las bombas necesarias.

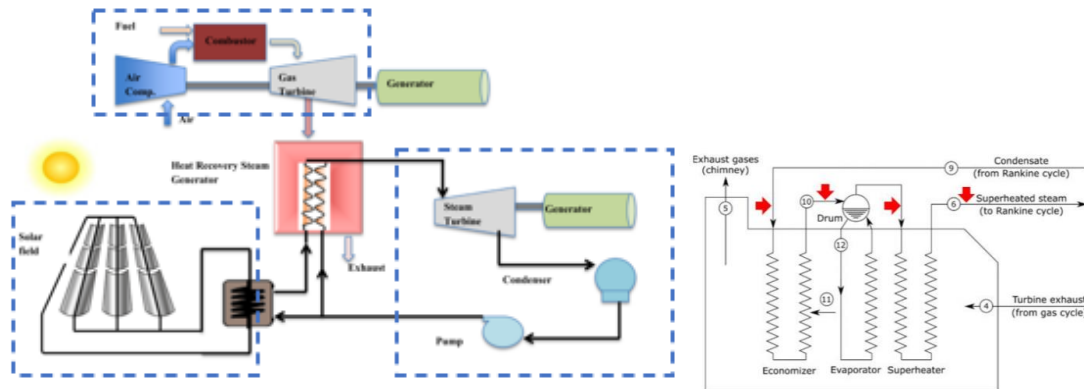


Figura 1. Esquema de integración de un campo solar en un ciclo combinado (Adaptado de Alqahtani et al. (2016): Integrated Solar Combined Cycle Power Plants)

Figura 2. Puntos de inyección de vapor en el HRSG.

La inyección del vapor de agua requiere el análisis de (1) los puntos del HRSG en el que se realizará la inyección, (2) la temperatura de la contribución del campo solar, y (3) el modo de operación. Así, los puntos de inyección propuestos se indican en la Figura 2. Una temperatura alta tiene como ventajas una mejora de la eficiencia, pero con un coste mayor, mientras que una temperatura baja es más flexible y tiene un coste menor, pero la eficiencia se reduce. As su vez, para temperatura media-bajas, la contribución del vapor de agua del campo solar se puede considerar como un incremento de la producción de energía, *Power Boosting*, o como una reducción en el gasto de combustible gas natural, *Fuel Saving*. Así, el efecto específico que se persigue con cada uno de ellos muestra el Figura 3.

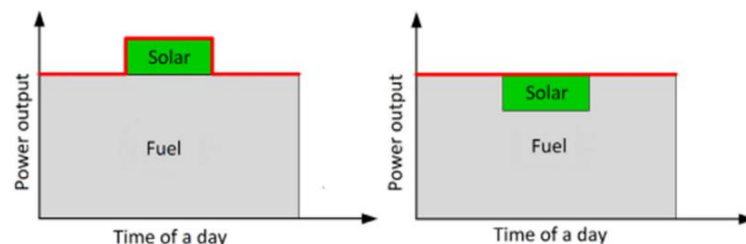


Figura 3. Modos de funcionamiento *Power Boosting* (izquierda) y *Fuel Saving* (derecha) (Adaptado de Qin et al. (2020) Solar aided power generation: A review).

El modelo termodinámico desarrollado en Thermoflex permite simular el ciclo termodinámico completo. La colaboración con TSK ha permitido disponer de datos reales relativos a las condiciones de operación del ciclo. Además, aquellos escenarios susceptibles de introducir efectos perjudiciales para el normal funcionamiento de otros componentes del ciclo fueron descartados siguiendo las recomendaciones de TSK, los cuales participaron activamente en este proyecto.

En paralelo, se desarrolló un modelo CFD para poder visualizar el efecto de mezcla de las dos corrientes de vapor provenientes del campo termosolar y del ciclo combinado. Las geometrías fueron en T y por efecto Venturi. La geometría T se usó como base para el modelo numérico debido a que este tipo de unión es muy usado en la industria. Con la geometría por efecto Venturi además se tiene la intención de plantear una metodología para su optimización con simulaciones CFD.

2. Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Tipo	Objetivo	Imagen	Grado de consecución
Principal	Generar conocimiento científico-técnico en hibridación de ciclos combinados para usar el excedente de vapor de agua producido en plantas termosolares.		100%
Secundario/ Específico	Revisión de la literatura para determinar las opciones existentes de reinyección del vapor y los métodos de modelización.		100%
Secundario/ Específico	Desarrollo de un modelo termodinámico con el software THERMOFLEX para determinar en qué parte del circuito combinado es más conveniente realizar la inyección de vapor de agua proveniente del módulo solar.		100%
Secundario/ Específico	Realización de simulaciones con técnicas CFD con geometrías específicas para inyectar el vapor: T y por efecto Venturi.		75%
Secundario/ Específico	Transferencia y difusión de los resultados obtenidos.		5%

3. Tareas realizadas:

ID	Descripción	MESES					
		1	2	3	4	5	6
Fase 1	Coordinación y revisión bibliográfica						
Tarea 1.1	Reuniones de coordinación con TSK						
Tarea 1.2	Revisión bibliográfica						
Fase 2	Desarrollo de los modelos numéricos						
Tarea 2.1	Desarrollo del modelo termodinámico: Thermoflex						
Tarea 2.2	Desarrollo del modelo CFD: ANSYS Fluent						
Tarea 2.3	Verificación y validación de los modelos						
Fase 3	Resultados y conclusiones						
Tarea 3.1	Análisis de los resultados y conclusiones						
Tarea 3.2	Resumen de resultados						
Tarea 3.2	Redacción de la memoria final del proyecto						
Fase 4	Difusión de los resultados						
Tarea 4.1	Preparación de artículos para revistas científicas y de conferencias						
Tarea 4.2	Participación en actividades de difusión						

Figura 4. Planificación del proyecto.

4. Resultados obtenidos:

El modelo que se ha desarrollado permite simular adecuadamente el ciclo termodinámico a partir de las condiciones de operación. La Figura 5 muestra el ciclo completo, mientras que en la Figura 6 se muestra la relación entre la temperatura, y el calor intercambiado.

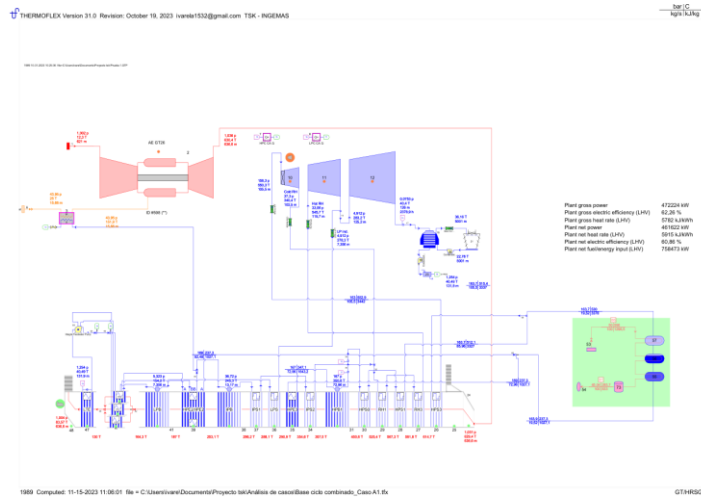


Figura 5. Ciclo completo del caso A1

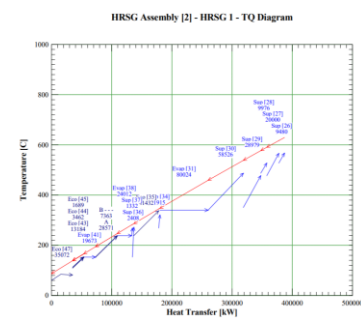


Figura 6. TvsQ del caso A1

La Figura 7 muestra la mejora en la eficiencia del ciclo global de los casos simulados. La configuración A2 es la que permite obtener la mayor eficiencia.

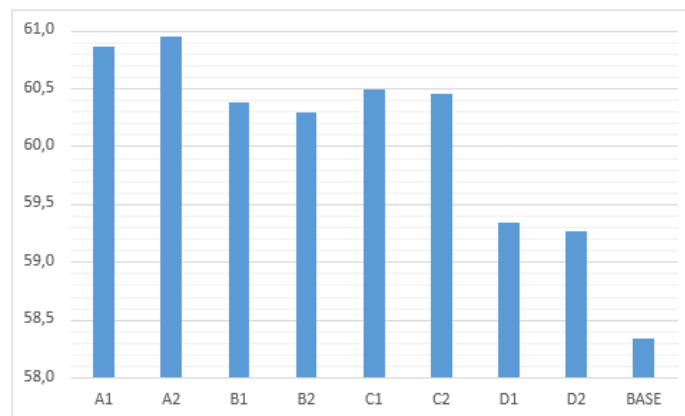


Figura 7. Eficiencia global obtenida para cada uno de los escenarios planteados y el caso base.

En total se han realizado 8 simulaciones del ciclo termodinámico, cuatro para cada uno de los modos de optimización: *Power boosting* y *Fuel saving*. A continuación, se resumen todos los escenarios simulados.

Caso: A1	Modo de optimización: <i>Power boosting.</i> Punto de inyección: Entre el economizador y el sobrecalentador de alta presión. Efecto beneficioso: Calienta el vapor de agua antes de entrar en el sobrecalentador. El vapor pierde menos calor (ya que el agua tiene más temperatura) y hace que la caldera en general sea más efectiva. Valoración: La eficacia de la planta en general aumenta y se produce más potencia.
Caso: A2	Modo de optimización: <i>Fuel saving.</i> Punto de inyección: Entre el economizador y el sobrecalentador de alta presión. Efecto beneficioso: Calienta el vapor de agua antes de entrar en el sobrecalentador. De este modo el vapor pierde menos calor (ya que el agua tiene más temperatura) y hace que la caldera en general sea más efectiva. Valoración: La eficacia de la planta en general aumenta y se ahorra combustible.
Caso: B1	Modo de optimización: <i>Power boosting.</i> Punto de inyección: Entre el economizador y el recalentador de media presión. Efecto beneficioso: Calienta el vapor de agua antes de entrar en el recalentador. De este modo el vapor pierde menos calor (ya que el agua tiene más temperatura) y hace que la caldera en general sea más efectiva. Valoración: La eficacia de la planta en general aumenta y se produce más potencia.
Caso: B2	Modo de optimización: <i>Fuel saving.</i> Punto de inyección: Entre el economizador y el recalentador de media presión. Efecto beneficioso: Calienta el vapor de agua antes de entrar en el sobrecalentador. De este modo el vapor pierde menos calor (ya que el agua tiene más temperatura) y hace que la caldera en general sea más efectiva. Valoración: La eficacia de la planta en general aumenta y se ahorra combustible.
Caso: C1	Modo de optimización: <i>Power boosting.</i> Punto de inyección: Entre el economizador y la turbina de media presión. Efecto beneficioso: Calienta vapor de agua antes de entrar en la turbina de media presión. De este modo, se consigue que en el recalentado haya menos cantidad de vapor, haciendo así más eficaz la caldera entera, ya que el gas pierde menos calor. Observaciones: No es necesario un primer economizador en la parte del ciclo solar, ya que el agua ya está lo suficientemente caliente como para entrar en el evaporador directamente. Valoración: La eficacia de la planta en general aumenta y se produce más potencia.
Caso: C2	Modo de optimización: <i>Fuel saving.</i> Punto de inyección: Entre el economizador y la turbina de media presión. Efecto beneficioso: Calienta vapor de agua antes de entrar en la turbina de media presión. De este modo, se consigue que en el recalentado haya menos cantidad de vapor, haciendo así más eficaz la caldera entera, ya que el gas pierde menos calor. Observaciones: No es necesario un primer economizador en la parte del ciclo solar, ya que el agua ya está lo suficientemente caliente como para entrar en el evaporador directamente. Valoración: La eficacia de la planta en general aumenta y se ahorra combustible.
Caso: D1	Modo de optimización: <i>Power boosting.</i> Punto de inyección: Entre el economizador y el sobrecalentador de baja presión. Efecto beneficioso: Calienta el vapor de agua antes de entrar en el sobrecalentador. De este modo el gas pierde menos calor (ya que el agua tiene más temperatura) y hace que la caldera en general sea más efectiva. Observaciones: No es necesario un primer economizador en la parte del ciclo solar, ya que el agua ya está lo suficientemente caliente como para entrar en el evaporador directamente. Valoración: La eficacia de la planta en general aumenta y se produce más potencia.
Caso: D2	Modo de optimización: <i>Fuel saving.</i> Punto de inyección: Entre el economizador y el sobrecalentador de baja presión. Efecto beneficioso: Calienta el vapor de agua antes de entrar en el sobrecalentador. De este modo el vapor pierde menos calor (ya que el agua tiene más temperatura) y hace que la caldera en general sea más efectiva. Observaciones: No es necesario un primer economizador en la parte del ciclo solar, ya que el agua ya está lo suficientemente caliente como para entrar en el evaporador directamente. Valoración: La eficacia de la planta en general aumenta y se ahorra combustible.

Como objetivo secundario, se está desarrollando un modelo numérico para estudiar la mezcla del vapor del campo solar inyectado en la tubería de vapor del ciclo combinado usando el software comercial Ansys Fluent. Las ecuaciones de gobierno del flujo son conservación de masa, de cantidad de movimiento y de energía. La mezcla de dos vapores con propiedades distintas se ha implementado con modelos multifase. El proyecto ha permitido determinar que la modelización de la mezcla es compleja, llegando a identificarse los siguientes aspectos importantes que afectan a los resultados numéricos:

- El modelo multifase. El modelo VOF predice una bolsa de vapor inmediatamente después de la unión de los dos fluidos. Sin embargo, el modelo multifase euleriano no presenta esa bolsa.

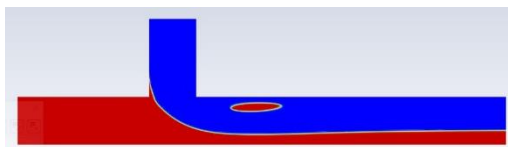


Figura 8. Fracción másica: VOF

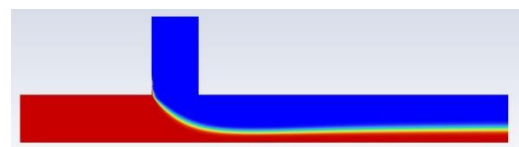


Figura 9. Fracción másica: Euleriano

- El efecto del perfil de velocidad en la entrada. Se ha impuesto un perfil uniforme de velocidad como condición de contorno en la entrada de los fluidos. Sin embargo, esta suposición tiene efecto en el espacio físico en la tubería del dominio computacional para llegar a que el flujo se desarrolle, y así adquiera un perfil de velocidad similar al teórico.

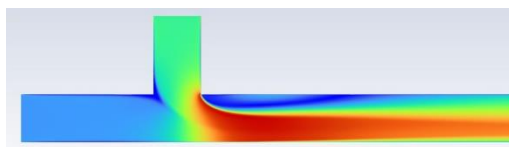


Figura 10. Velocidad: VOF

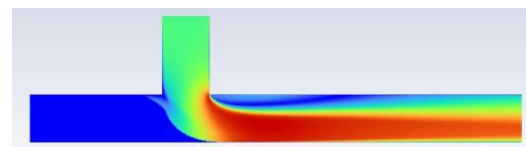


Figura 11. Velocidad: Euleriano

- Esquinas afiladas. La geometría en T no posee redondeos, lo que lleva a fenómenos más complejos en las aristas. Esta decisión ha sido motivada por la necesidad de mallados sencillos en previsión de optimizar la geometría, por lo que el efecto de la capa límite puede afectar a la solución.

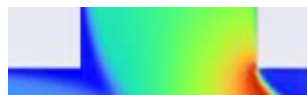


Figura 12. Detalle del comportamiento en las aristas

- Geometría por efecto Venturi: La forma de modelizar la entrada del campo solar ha sido muy simplificada. El tiempo de simulación necesita ser ampliado para alcanzar el tiempo de residencia y la convergencia.

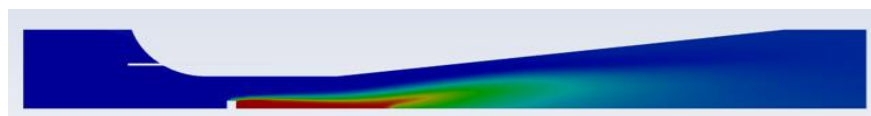


Figura 13. Resultados de los primeros pasos temporales de la simulación.

5. Trabajos o necesidades futuras

La parte del modelo termodinámico se ha finalizado con éxito y la colaboración con TSK continuará con reuniones previstas para el mes de enero (2024). Además, Se va a mejorar el

modelo numérico que se tiene en CFD para simular la inyección de vapor y completar lo que ha quedado pendiente. La línea planteada para establecer una metodología de optimización de la geometría usando resultados del modelo numérico es muy interesante y se va a seguir trabajando en ello en el futuro inmediato.

6. Divulgación de los resultados

Se tiene previsto asistir a congresos internacionales de reconocido prestigio y la redacción de un artículo científico para enviarlo a revistas científicas indexadas con factor de impacto. También se dará visibilidad al proyecto con la publicación de las actividades en la página del Departamento de Energía cuando esté finalizado. Los resultados se presentarán en la Jornada de Presentación de Proyectos del IUTA.

Memoria económica:

1. Gastos:

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	5.000,00 €
Fungibles	0,00 €
Amortización	0,00 €
Otros (Desplazamientos, Inscripciones a Congresos, etc)	0,00 €
TOTAL GASTOS	5.000,00 €

2. Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA	Ayuda IUTA: Contratación de personal	5.000,00 €
Otras entidades / empresas financiadoras		0,00 €
Financiación propia		0,00 €
TOTAL INGRESOS		5.000,00 €

En Gijón, a 22 de enero de 2024

Fdo.: Pedro García Regodeseves