

# INFORME DEL PROYECTO SV-23-GIJÓN-1-16

Estudio de la implementación de cogeneración con la tecnología de un ciclo higroscópico. Análisis de la viabilidad técnica y medioambiental (COG-HCT)

---

## **Fechas inicial y final del proyecto:**

01 / 09 / 2023 al 21 / 02 / 2024

## **Investigador/a Principal:**

Juan Manuel González-Caballín Sánchez

## **Otros investigadores:**

Santiago García-Maribona López-Sela

Antonio José Gutiérrez Trashorras

Juan Carlos Ríos Fernández

Roberto Martínez Pérez

## **Personal contratado:**

Santiago García-Maribona López-Sela

## **Fechas inicial y final de contratación:**

01 / 09 / 2023 al 31 / 12 / 2023

## **Empresas o instituciones colaboradoras:**

Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias (IUTA)

Fundación Universidad de Oviedo (FUO)

IMASA, Ingeniería y Proyectos, S.A

## **Redes sociales de investigadores y empresas:**

Santiago García-Maribona López-Sela:

UO277503@uniovi.es

Juan Manuel González-Caballín Sánchez

gonzalezsjuan@uniovi.es

## Resumen Gráfico

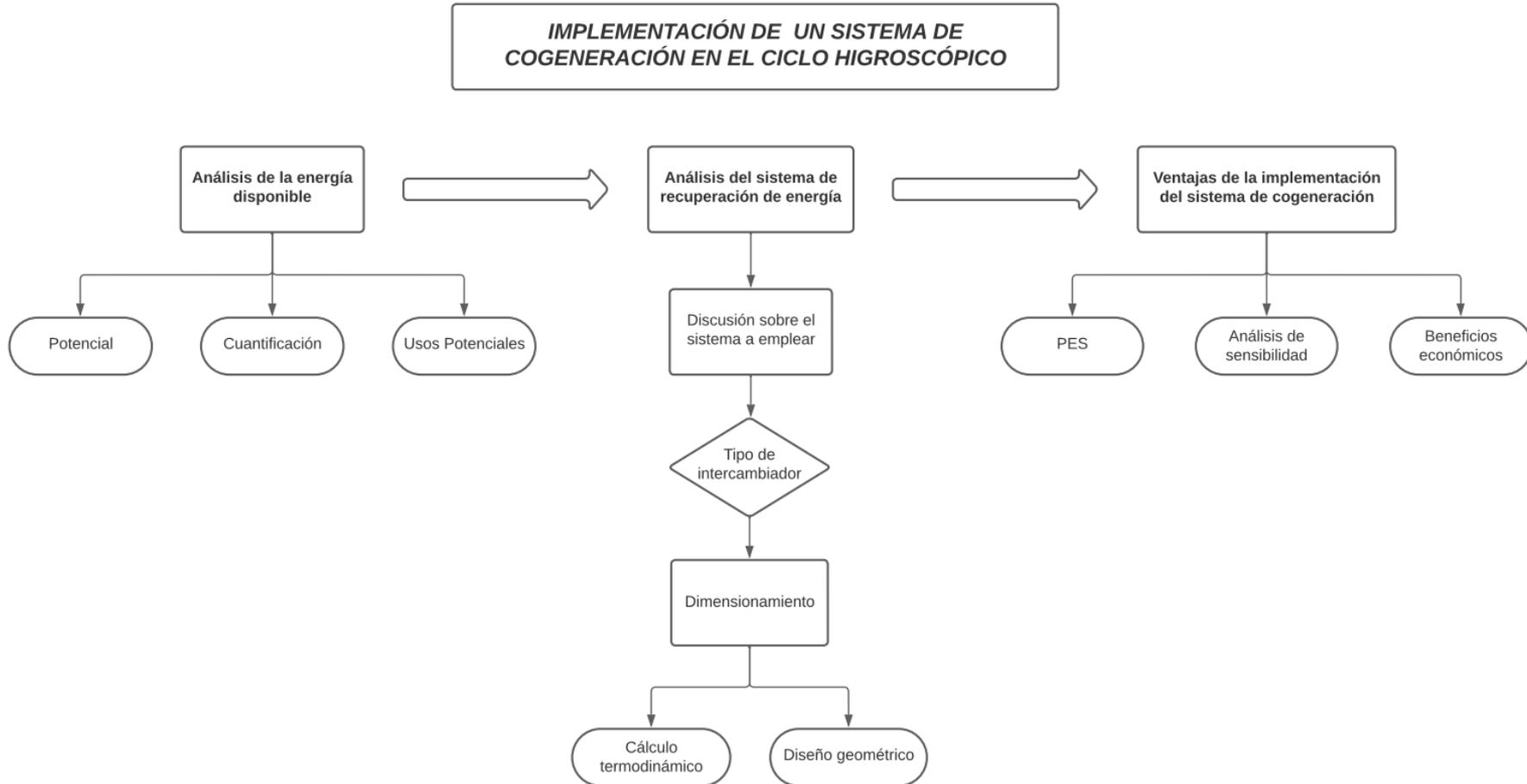


Figura 01. Diagrama de flujo del proyecto

## Memoria descriptiva del proyecto

### 1. Resumen ejecutivo

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar el aprovechamiento del calor residual en el flujo de recirculación de una central de ciclo higroscópico, así como diseñar el sistema de recuperación de calor a emplear, determinar las ventajas de su implementación y proponer distintos usos de la energía recuperada. Concretamente, el estudio se centra en la central térmica de biomasa de Vetejar, ubicada en Palenciana, Córdoba.

El ciclo higroscópico es un ciclo termodinámico similar al Rankine convencional, en el que se sustituye el condensador por un absorbedor de vapor. En este, el proceso de condensación se basa en las propiedades higroscópicas de diferentes compuestos como el bromuro de litio (LiBr) o los propios componentes del agua. La central térmica de Vetejar emplea agua para este proceso.

Los compuestos higroscópicos tienden a absorber el vapor de agua en su entorno, favoreciendo la transferencia de calor entre el vapor a la salida de la turbina y el flujo de recirculación, optimizando así el proceso de condensación. Una mayor efectividad en la condensación permite lograr temperaturas de condensación mayores para una misma presión. Esto conlleva varias ventajas:

- Permite que la central opere a **temperaturas ambiente elevadas**, por encima de los 40°C.
- **Reduce los costes de refrigeración** y permite prescindir de la torre de refrigeración.
- **Aumenta el rendimiento de la central** respecto al ciclo Rankine convencional.

El aumento de la temperatura de condensación supone un aumento de la temperatura del flujo de recirculación a la salida del absorbedor. Este aumento dependerá del compuesto higroscópico empleado y su concentración, pudiendo alcanzar el flujo de recirculación temperaturas cercanas a los 70-80°C para disoluciones de LiBr con concentraciones del 55%. En el caso concreto de la planta de Vetejar, que emplea agua como compuesto higroscópico, se alcanzan temperaturas de 43,1°C.

Estas elevadas temperaturas, en términos relativos, dan pie a un aprovechamiento energético del calor residual en el flujo de recirculación que de otra forma se disiparía en la atmósfera. Esto es, un sistema de cogeneración a partir de calor residual. Para su diseño y justificación se han llevado a cabo las siguientes etapas:

#### Análisis de la energía disponible

La central térmica de Vetejar tiene una potencia de diseño de 10MW, consumiendo 28MW de energía primaria (alperujo) y cediendo 18MW al exterior en la refrigeración del flujo de recirculación a través de un enfriador seco. En este se enfría un flujo másico de 357kg/s desde 43°C hasta 21°C.

Se ha valorado la posibilidad de sustituir el enfriador seco por un intercambiador de calor convencional, refrigerando el flujo de recirculación con agua de red, cuya temperatura media anual en Córdoba es de 15°C. Esto permitiría reducir el flujo de recirculación a 152kg/s, enfriándolo desde 43°C hasta 15°C.

En condiciones ideales se conseguirían extraer 18MW del flujo de recirculación, lo que supone una cantidad muy relevante de energía. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta energía térmica es de baja entalpía y sus posibles usos limitados.

#### Análisis del sistema de recuperación de calor

Tras un análisis exhaustivo, se ha determinado que la tipología óptima de intercambiador de calor a emplear es un intercambiador de carcasa y tubos con cuatro pasos por los tubos y cinco por la carcasa. Este logra grandes áreas de intercambio de calor sin introducir pérdidas de carga elevadas que aumenten los costes de bombeo.

Para su dimensionamiento ha sido necesario combinar cálculos termodinámicos y geométricos. Finalmente se ha obtenido un área de intercambio de calor necesaria de 2000m<sup>2</sup>, obteniendo una eficiencia del 88,64% en el intercambiador y 17,85MW de calor recuperados.

#### Ventajas y justificación del sistema de cogeneración

Una vez conocida la energía recuperada mediante el sistema de cogeneración, se ha calculado la eficacia de la misma en base al factor PES (Primary Energy Savings), establecido en la Directiva UE 2023/1791. Se ha obtenido un PES del 43,94%, superando el 10% establecido en la directiva para las instalaciones de cogeneración de alta eficiencia, luego puede considerarse como tal.

Este ahorro de energía primaria, además de beneficios económicos por la venta de energía, conlleva ventajas ambientales, reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación a si se obtuviera mediante combustibles fósiles. Si esta energía se generara mediante la combustión de gas natural, se emitirían 31.900 toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente. En el caso de emplear carbón, ascenderían a 54.260 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

Finalmente se han evaluado posibles usos de la energía recuperada. Es importante tener en cuenta que esta se recupera a temperaturas bajas, cerca de los 40°C, por lo que sus aplicaciones se limitan a aquellas que requieran temperaturas reducidas. Entre las propuestas destacan:

- Producción de agua caliente sanitaria (ACS).
- Procesos de precalentamiento o calentamiento escalonado.
- Procesos de secado.
- District heating.
- Generación por gradiente de salinidad.
- Desalación.

## 2. Objetivos iniciales del proyecto y grado de consecución

Tipo	Objetivo	Imagen	Grado de consecución
Principal	Estudio de la implementación de un sistema de cogeneración en el ciclo higroscópico		90%
Secundario	Análisis de la energía disponible. Cantidad y características.		100%
Secundario	Diseño de un sistema de recuperación de calor adecuado para la planta en estudio		100%
Secundario	Estudio de las ventajas derivadas de la implementación del sistema de cogeneración		90%
Secundario	Propuesta de posibles usos para la energía recuperada		70%

Figura 02. Objetivos del proyecto y grado de consecución

## 3. Tareas realizadas:

ID	Descripción	MESES				
		1	2	3	4	5
<b>Fase 1</b>	<b>Análisis de la energía disponible</b>	█				
Tarea 1.1	Estudiar el potencial de la energía disponible.	█				
Tarea 1.2	Cuantificar la energía disponible.	█				
Tarea 1.3	Posibles usos de la energía recuperada.	█				
<b>Fase 2</b>	<b>Análisis del sistema de recuperación de energía</b>		█	█		
Tarea 2.1	Discusión sobre el sistema a emplear.		█			
Tarea 2.2	Dimensionamiento del intercambiador de calor.		█	█		
<b>Fase 3</b>	<b>Beneficios de la implementación de cogeneración</b>				█	█
Tarea 3.1	Cálculo del factor PES.				█	█
Tarea 3.2	Análisis de sensibilidad. Ventajas medioambientales.				█	█
Tarea 3.3	Beneficios económicos. Posibles usos.				█	█

Figura 03. Planificación del proyecto

➤ **Fase 1:** Análisis de la energía disponible.

- **Tarea 1.1:** Estudiar el potencial de la energía disponible.

Se ha analizado el potencial de la energía residual disponible en la central de Vetejar para determinar, en primera instancia, si es factible su recuperación y aprovechamiento, atendiendo a factores de entalpía y temperatura.

- **Tarea 1.2:** Cuantificar la energía disponible.

Se han optimizado parámetros del ciclo implantado en la central de Vetejar (como la temperatura en el desgasificador y el salto térmico en la refrigeración del flujo de recirculación), optimizándolo para obtener la mayor efectividad del sistema de cogeneración. Una vez hecho esto, se ha cuantificado la energía disponible considerando condiciones ideales, sin pérdidas de energía hacia el exterior del sistema.

- **Tarea 1.3:** Posibles usos de la energía recuperada.

Atendiendo a la cantidad de energía disponible y sus características se han estudiado posibles usos a los que destinarla, tanto industriales como domésticos.

➤ **Fase 2:** Análisis del sistema de recuperación de energía.

- **Tarea 2.1:** Discusión sobre el sistema a emplear.

Se han evaluado distintos sistemas de recuperación de calor para su aplicación en la planta de Vetejar, teniendo en consideración las temperaturas del flujo de recirculación a la entrada y salida del equipo de refrigeración, así como su flujo másico.

- **Tarea 2.2:** Dimensionamiento del intercambiador de calor.

Una vez decidido el tipo de intercambiador de calor idóneo para la recuperación de la energía disponible, se ha dimensionado atendiendo a parámetros geométricos y termodinámicos, basándose en las características de la energía disponible, del flujo de recirculación y del flujo de agua de red (refrigeración). Finalmente, se ha realizado una propuesta para optimizar el funcionamiento del sistema de cogeneración implementando un depósito de inercia.

➤ **Fase 3:** Beneficios de la implantación del sistema de cogeneración.

- **Tarea 3.1:** Cálculo del PES.

Se ha determinado el valor del parámetro PES obtenido al implantar el sistema de cogeneración según las indicaciones de la Directiva UE 2023/1791. Este permite identificar la instalación como una instalación de cogeneración de alta eficiencia y comparar su eficacia con otras instalaciones de cogeneración a nivel europeo.

- **Tarea 3.2:** Análisis de sensibilidad. Ventajas medioambientales.

Se ha comparado la energía que se recuperaría mediante el sistema de cogeneración en comparación a la que se desecha actualmente sin ningún sistema de recuperación. Además, se han comparado las toneladas de CO<sub>2</sub> que se emitirían si la energía recuperada se produjera con carbón o gas natural frente a las nulas emisiones producidas por el sistema de cogeneración

- **Tarea 3.3:** Beneficios económicos. Posibles usos

Se han estudiado los beneficios económicos derivados de la energía recuperada, así como posibles aplicaciones de la misma. Esto permite focalizar la búsqueda de posibles compradores interesados. Nuevamente es importante remarcar que la cantidad de energía recuperada es muy elevada, pero las temperaturas que se pueden alcanzar a partir de esta reducidas, lo que limita enormemente sus aplicaciones.

#### 4. Resultados obtenidos:

A continuación se resumen los resultados obtenidos en la investigación:

- Se han estudiado las características de la energía disponible en el flujo de recirculación de la central de Vetejar. Esta corresponde con una fuente de energía térmica de bajo grado, recuperada a temperaturas inferiores a los 100°C, lo que limita sus aplicaciones a aquellas que demanden temperaturas reducidas. Se trata de una fuente que proporciona en condiciones ideales 18MW a temperaturas máximas de 43,1°C.
- Se ha determinado que el sistema de recuperación de calor idóneo para este caso es un intercambiador de calor de carcasa y tubos.

El intercambiador de calor de carcasa y tubos presenta menor eficiencia en la transmisión de calor en comparación a otras tipologías como pueden ser los intercambiadores de placas, pero también induce pérdidas de carga más reducidas. Al funcionar con flujos máxicos elevados, entre 100 y 300kg/s, es idóneo emplear intercambiadores de calor de carcasa y tubos.

- El empleo de agua de red como refrigerante y fluido caloportador de la energía recuperada aporta dos ventajas esenciales.

En primer lugar, sus temperaturas se mantienen estables a lo largo del año, variando entre 10°C en los meses más fríos y 21°C en los más cálidos en el caso de Córdoba. La temperatura media anual es de 15°C. Así se consigue un funcionamiento estable de la instalación a lo largo del año, sin grandes variaciones estacionales que comprometan su eficiencia.

En segundo lugar, estas bajas temperaturas junto con el calor específico elevado del agua (4,18kJ/kg°C), logran una refrigeración muy efectiva del flujo de recirculación, reduciendo la temperatura y presión de condensación y aumentando la eficiencia del ciclo higroscópico.

➤ Se han fijado las temperaturas de entrada y salida de los flujos de recirculación y agua de red, a partir de las cuales se ha dimensionado el intercambiador de calor idóneo para la instalación de cogeneración

El flujo de recirculación entra al intercambiador a una temperatura de 43,1°C y saldría a 22°C, logrando un salto térmico de 21,1°C. El flujo másico asociado a este salto es de 202,1 kg/s.

En cuanto al agua de red, su temperatura de entrada varía a lo largo del año. Para los cálculos se ha tomado su temperatura media anual en la provincia de Córdoba, equivalente a 15°C. Su temperatura de salida se ha fijado a 40°C, logrando un salto térmico de 24,8°C. Esto corresponde a un flujo másico de 172kg/s

➤ Se ha dimensionado el intercambiador de calor a emplear. Este es de cinco pasos por la carcasa y cuatro pasos por los tubos, con un área de intercambio de calor de 2000m<sup>2</sup>. Esta se logra mediante 3772 tubos de 19mm de diámetro exterior, 1,5mm de espesor y 9m de longitud dispuestos en 55 filas. La separación entre tubos es de 23,75mm de centro a centro. El diámetro interior de la carcasa para alojar los tubos es de 1,65m. Por la carcasa circula el flujo de recirculación y por el interior de los tubos el agua de red.

El sistema antes descrito da lugar a un flujo de agua de red de 172kg/s a 40°C. Esto corresponde a una energía recuperada de 17,85MW frente a un máximo de 20,13MW, obteniendo una eficiencia del intercambiador del 88,64%. Se logra un coeficiente global de transmisión de calor de 3,931 kW/m<sup>2</sup>°C.

Las pérdidas de carga introducidas por el intercambiador requieren un aporte de potencia mediante bombeo de 289,4kW para el flujo de recirculación y 104,3kW para el agua de red.

➤ Recuperar esta energía mediante cogeneración supone un beneficio ambiental. Si se empleara carbón se emitirían 54.260 toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente. En el caso de emplear gas natural, se emitirían 31.900 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales.

➤ La implementación del sistema de cogeneración también aporta beneficios económicos. Al obtener un PES superior al 10% la instalación de cogeneración se puede considerar de alta eficiencia, permitiendo optar a diversas ventajas y subvenciones. Además, se obtendrían ganancias extra derivadas de la venta de la energía recuperada.

➤ Se han estudiado posibles usos en los que emplear el calor de bajo grado recuperado. Los más factibles son procesos de precalentamiento a nivel industrial, agua caliente sanitaria y "District Heating". Además, podría emplearse en tecnologías menos desarrolladas como la generación eléctrica por gradiente de salinidad o la desalación mediante calor de bajo grado.

## 5. Trabajos o necesidades futuras

En un futuro sería deseable ahondar en un diseño más complejo del sistema de cogeneración, implementado distintos elementos que permitan ajustar la oferta de energía a la demanda en cada momento, como un depósito de inercia. Esto permitiría lograr un mejor funcionamiento de la instalación de cogeneración y una mejor integración con el ciclo higroscópico existente.

Por otro lado, sería de interés estudiar en profundidad distintas aplicaciones capaces de aprovechar la energía recuperada, como es el caso de las redes de "District Heating", generación por gradiente de salinidad, desalación, agua caliente sanitaria, etc.

## 6. Divulgación de los resultados

El presente proyecto será presentado en la Jornada de Proyectos de Investigación 2023 organizada por el IUTA, que se llevará a cabo en 2024. Además, se espera publicar el proyecto en una revista científica de impacto.

Título	Autores	PTT	Congreso	Lugar y fecha
Implementación de un sistema de cogeneración en el ciclo higroscópico. Viabilidad técnica y ambiental	Santiago García-Maribona López-Sela Juan Manuel González-Caballín Sánchez	Charla invitada	Jornadas de Proyectos IUTA	Gijón (España), 2024

### Memoria económica:

#### 1. Gastos:

Concepto	Gasto
Personal (IUTA)	4.700 €
Fungibles	0.000 €
Amortización	0.000 €
Otros (Desplazamientos, Inscripciones a Congresos, etc)	0.000 €
<b>TOTAL GASTOS</b>	<b>4.700 €</b>



## 2. Ingresos:

Entidad/Empresa financiadora Ref. Proyecto/Contrato	Concepto	Ingreso
IUTA	Ayuda IUTA: Contratación de personal	4.700 €
Otras entidades / empresas financiadoras		0.000 €
Financiación propia		0.000 €
<b>TOTAL INGRESOS</b>		<b>4.700 €</b>