

**CÁTEDRA
DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA**



PUBLICACIÓN:

*“INTEGRACIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA EN
EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE LA CERVEZA.”*

**CÁTEDRA FUNDACIÓN REPSOL DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA
EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA DE COMILLAS ICAI SOBRE
LA DESCARBONIZACIÓN EN LA INDUSTRIA**

Autor: Gabriela Calvo Abad, Estudiante en la Universidad Pontificia de Comillas ICAI

Autor: José Ignacio Linares Hurtado, Director de la Cátedra Fundación Repsol en
Transición Energética en la Universidad Pontificia Comillas ICAI

Autor: Eva María Arenas Pinilla, Profesora y Directora de la Cátedra de Nuevas
Tecnologías Energéticas en la Universidad Pontificia de Comillas ICAI

Resumen de la Publicación:

Integrando una bomba de calor de alta temperatura en la producción cervecera para aprovechar el calor residual y reducir el uso de combustibles fósiles.

Introducción

Uno de los campos con mayor proyección dentro de la transición energética es la valorización de corrientes de calor residual a media y baja temperatura. Este tipo de energía, abundante en procesos industriales como la cocción, suele desaprovecharse pese a su elevado contenido térmico. En un contexto donde la demanda térmica industrial representa una de las principales fuentes de emisiones directas de CO₂, su recuperación se plantea como una estrategia clave para avanzar en la descarbonización del sector. Transformar este calor en energía útil, ya sea para calentar fluidos de proceso, generar vapor o alimentar subsistemas térmicos, permite reducir la dependencia de calderas convencionales y mejorar la eficiencia energética de la planta. En este sentido, las bombas de calor de alta temperatura (HTHP) ofrecen una solución eficiente, totalmente electrificable y capaz de elevar térmicamente estas corrientes residuales con un alto coeficiente de rendimiento. Su integración en industrias intensivas en calor, como la cervecera, permite sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles y, al mismo tiempo, reutilizar internamente energía que antes se perdía, cerrando el balance térmico del sistema y reduciendo significativamente tanto el consumo energético como las emisiones asociadas.

Integración de una bomba de calor de alta temperatura en el proceso de producción de la cerveza

Autor: Calvo Abad, Gabriela

Directores: Linares Hurtado, José Ignacio y Arenas Pinilla, Eva María

Entidad Colaboradora: Cátedra Fundación Repsol de Transición Energética

RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto se centra en el aprovechamiento del calor residual del mosto tras la cocción en una planta cervecera para generar agua caliente de proceso y vapor industrial, mediante una bomba de calor de alta temperatura basada en un ciclo Rankine inverso regenerativo transcrito con CO₂ como fluido de trabajo. El sistema propuesto permite calentar agua de red hasta 90 °C y alimentar un subsistema de aceite térmico que genera vapor de proceso, sustituyendo parcialmente el uso de calderas convencionales y *chillers* eléctricos, reduciendo así el consumo energético y las emisiones directas de CO₂ asociadas a los sistemas térmicos tradicionales. El ciclo ha sido optimizado para maximizar la eficiencia térmica bajo condiciones variables de temperatura del agua de red (8–24 °C). Se ha alcanzado un coeficiente de rendimiento (COP) entre 3,7 y 6,162 (incluyendo tanto el efecto de calor como el de frío), lo que demuestra una alta eficiencia térmica incluso en condiciones desfavorables. Se han dimensionado intercambiadores, conductos y turbomáquinas bajo criterios normativos [3][4]. En términos económicos, el sistema presenta una inversión total (FCI) de 5,85 millones de euros en el escenario base, y de 7,73 millones de euros en los dos escenarios optimistas. El coste nivelado del calor (LCOH) se sitúa entre 68,78 y 83,13 €/MWh, según el grado de aprovechamiento térmico. Los costes operativos anuales (OPEX) ascienden a 3,32 M€ en el caso base, 6,63 M€ en el escenario optimista 2, y 7,32 M€ en el escenario optimista 1. El periodo de retorno (PR) es de 4,8 años en el escenario optimista 1, 5,3 años en el escenario optimista 2, y 17 años en el caso base.

Palabras clave: bomba de calor, ciclo Rankine inverso, CO₂, alta temperatura, descarbonización industrial, cervecera.

1. Introducción

Uno de los campos con mayor proyección dentro de la transición energética es la valorización de corrientes de calor residual a media y baja temperatura. Este tipo de energía, abundante en procesos industriales como la cocción, suele desaprovecharse pese a su elevado contenido térmico. En un contexto donde la demanda térmica industrial representa una de las principales fuentes de emisiones directas de CO₂, su recuperación se plantea como una estrategia clave para avanzar en la descarbonización del sector. Transformar este calor en energía útil, ya sea para calentar fluidos de proceso, generar vapor o alimentar subsistemas térmicos, permite reducir la dependencia de calderas convencionales y mejorar la eficiencia energética de la planta. En este sentido, las bombas de calor de alta temperatura (HTHP) ofrecen una solución eficiente, totalmente electrificable y capaz de elevar térmicamente estas corrientes residuales con un alto coeficiente de rendimiento. Su integración en industrias

intensivas en calor, como la cervecera, permite sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles y, al mismo tiempo, reutilizar internamente energía que antes se perdía, cerrando el balance térmico del sistema y reduciendo significativamente tanto el consumo energético como las emisiones asociadas.

La Figura 1.1 muestra el esquema de partida del sistema actual, donde se representa la configuración convencional de una planta cervecera con calderas alimentadas por gas, biogás o biomasa, un sistema de recuperación de calor del mosto y un *chiller* eléctrico para enfriamiento. A partir de este esquema se planteará la integración de una bomba de calor de alta temperatura, con el fin de optimizar el aprovechamiento del calor residual y sustituir el uso de combustibles fósiles en el suministro térmico del proceso.

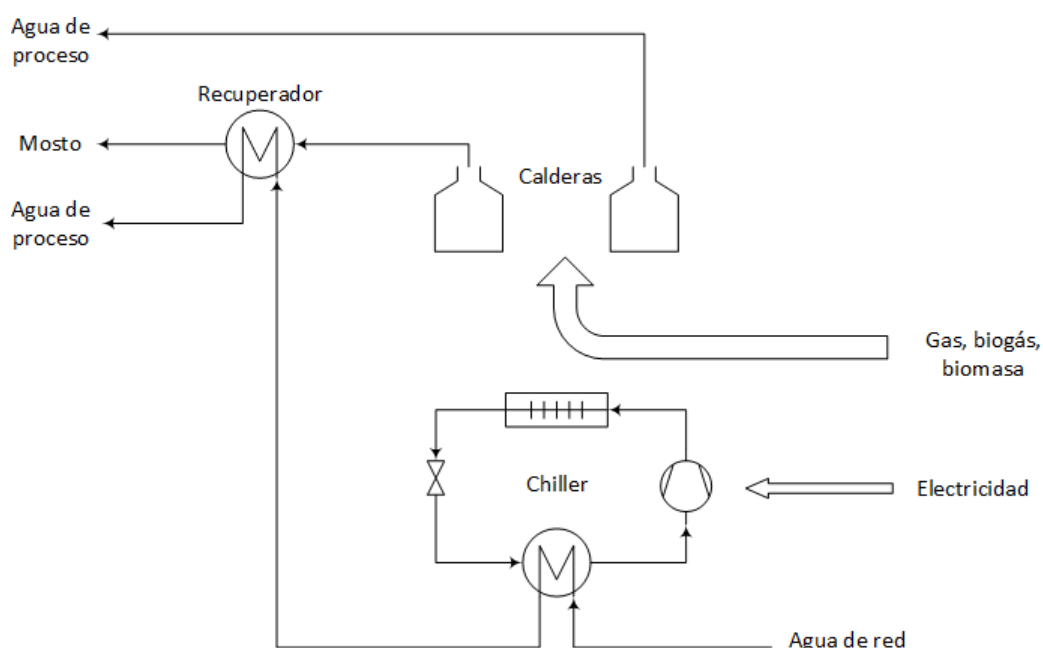


Figura 1-1. Esquema del proceso térmico actual en una planta cervecera convencional.

2. Estado de la técnica

Más del 50 % de la energía final consumida en la industria europea se emplea en forma de calor, y más de la mitad de esa demanda requiere temperaturas superiores a 100 °C, especialmente en industrias como la alimentaria, la cervecera o la textil [1]. Según el informe *Industrial Heat Pump Technology Roadmap* [2], más del 30 % de la demanda térmica industrial en economías avanzadas podría cubrirse con bombas de calor utilizando tecnologías ya disponibles en el mercado, lo que evidencia un alto potencial de recuperación y valorización del calor residual actualmente desaprovechado.

Ante esta situación, diversas líneas de investigación han explorado tecnologías capaces de recuperar y aprovechar ese calor residual. Entre las más prometedoras se encuentran las bombas de calor de alta temperatura (HTHP), que pueden basarse en ciclos Rankine o Brayton inversos, especialmente adecuados para aplicaciones térmicas industriales exigentes. Una bomba de calor es un sistema termodinámico que transfiere energía desde una fuente fría a una fuente caliente, habitualmente mediante el trabajo de un compresor. En

su funcionamiento básico, el fluido de trabajo extrae calor del foco frío (evaporador), se comprime para elevar su temperatura y presión, y entrega calor útil en el foco caliente (condensador). En configuraciones avanzadas, como las regenerativas, se incluye un intercambiador intermedio que permite precalentar el fluido de entrada con parte del calor del fluido a la salida del compresor, lo que incrementa el rendimiento global del sistema.

Desde el punto de vista técnico, las bombas de calor no solo permiten reutilizar corrientes térmicas residuales, sino que además pueden integrarse fácilmente en esquemas industriales existentes, sin necesidad de rediseñar la infraestructura térmica. Al tratarse de sistemas electrificados y de operación continua, resultan compatibles con estrategias de eficiencia energética, reducción de emisiones y aprovechamiento de electricidad renovable.

La figura 2.1 muestra un esquema general de funcionamiento de una bomba de calor agua-agua típica basada en un ciclo de compresión de vapor:

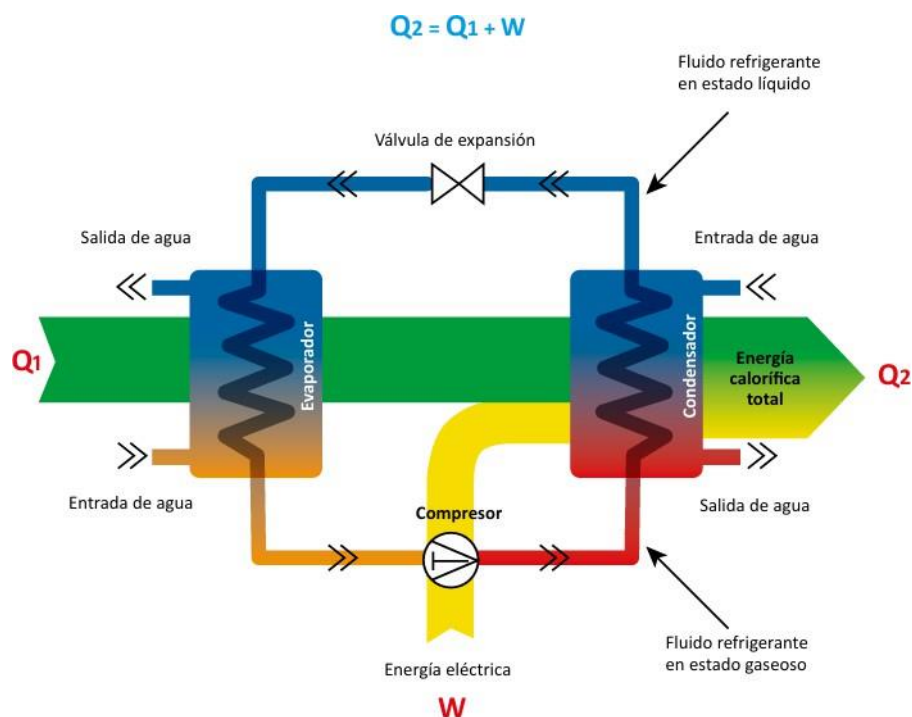


Figura 2-1. Ciclo frigorífico de compresión en calefacción, bomba de calor agua-agua [5]

En función del fluido de trabajo y del diseño del ciclo, estas bombas pueden alcanzar distintos rangos operativos. Mientras que los sistemas convencionales permiten calentar agua hasta unos 60–70 °C, las HTHP diseñadas con ciclos avanzados y fluidos apropiados pueden superar los 100–120 °C. En configuraciones optimizadas, es posible alcanzar temperaturas por encima de los 200 °C, lo que amplía considerablemente su campo de aplicación en sectores como el alimentario, el químico o el papelerero, donde se requiere vapor o agua caliente a alta temperatura.

Para alcanzar estos niveles térmicos, resulta clave la elección del fluido de trabajo. Entre los candidatos más adecuados, destaca el dióxido de carbono (CO_2) ha sido identificado como uno de los fluidos de trabajo más prometedores para este tipo de aplicaciones. Gracias a su bajo impacto ambiental, buena conductividad térmica y capacidad para operar a presiones

elevadas, el CO₂ permite alcanzar temperaturas de condensación útiles para generar vapor o calentar agua de proceso sin recurrir a combustibles fósiles.

El presente proyecto se enmarca en esta tendencia tecnológica, aplicando un ciclo Rankine inverso regenerativo transcrito con CO₂ para recuperar el calor del mosto tras la cocción en una planta cervecera. La energía extraída se reutiliza térmicamente para calentar agua de red y alimentar un subsistema de aceite térmico que sustituye parcialmente el uso de calderas.

3. Metodología

La metodología seguida en este trabajo parte del análisis del sistema en función de la temperatura del agua de red, una variable que varía a lo largo del año y condiciona de forma significativa el rendimiento global del ciclo. Para ello, se analizaron distintos escenarios térmicos de entrada del agua de red, dentro de un rango de temperaturas, simulando cómo afectaba dicha variable a la eficiencia de la bomba de calor y al equilibrio energético del sistema. Este enfoque permitió caracterizar el comportamiento del sistema ante distintas condiciones estacionales y sirvió de base para el posterior dimensionado de los componentes. Entre las distintas temperaturas analizadas, se adoptó un valor de 10 °C como referencia representativa para el caso base, por ser una de las condiciones más comunes en el suministro de agua de red, tal como se muestra en la Figura 3.1, que representa la distribución de temperaturas considerada.

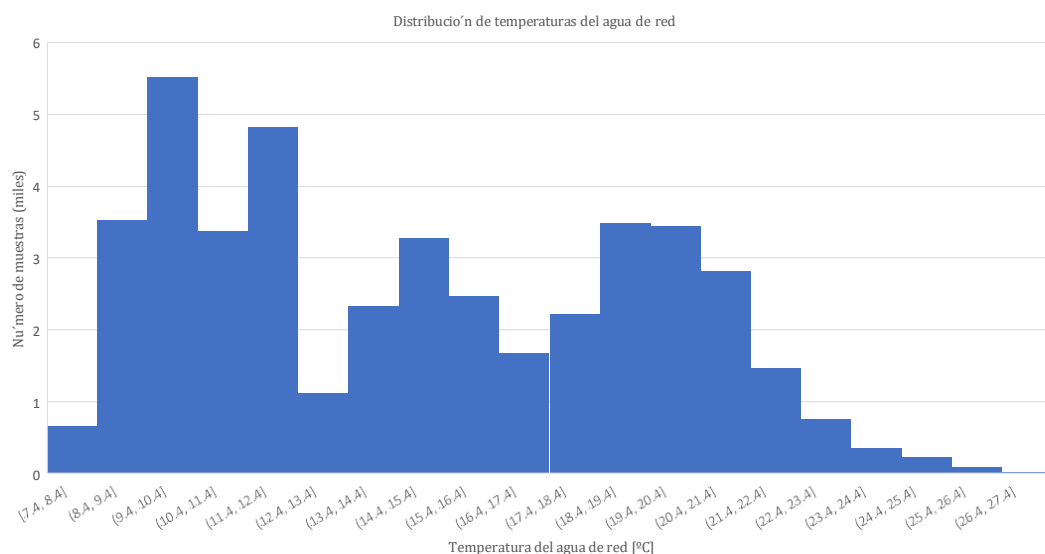


Figura 3-1. Distribución de temperaturas del agua de red

A partir del modelo termodinámico, se estableció el diseño funcional del sistema, que incluye un intercambiador para recuperar el calor del mosto cocido, un compresor que eleva la temperatura y presión del fluido, un regenerador interno para mejorar el rendimiento térmico, y un intercambiador con aceite térmico (Therminol VP-1) que transfiere el calor útil al agua de proceso. El esquema general del ciclo propuesto se representa en la Figura 3.2.

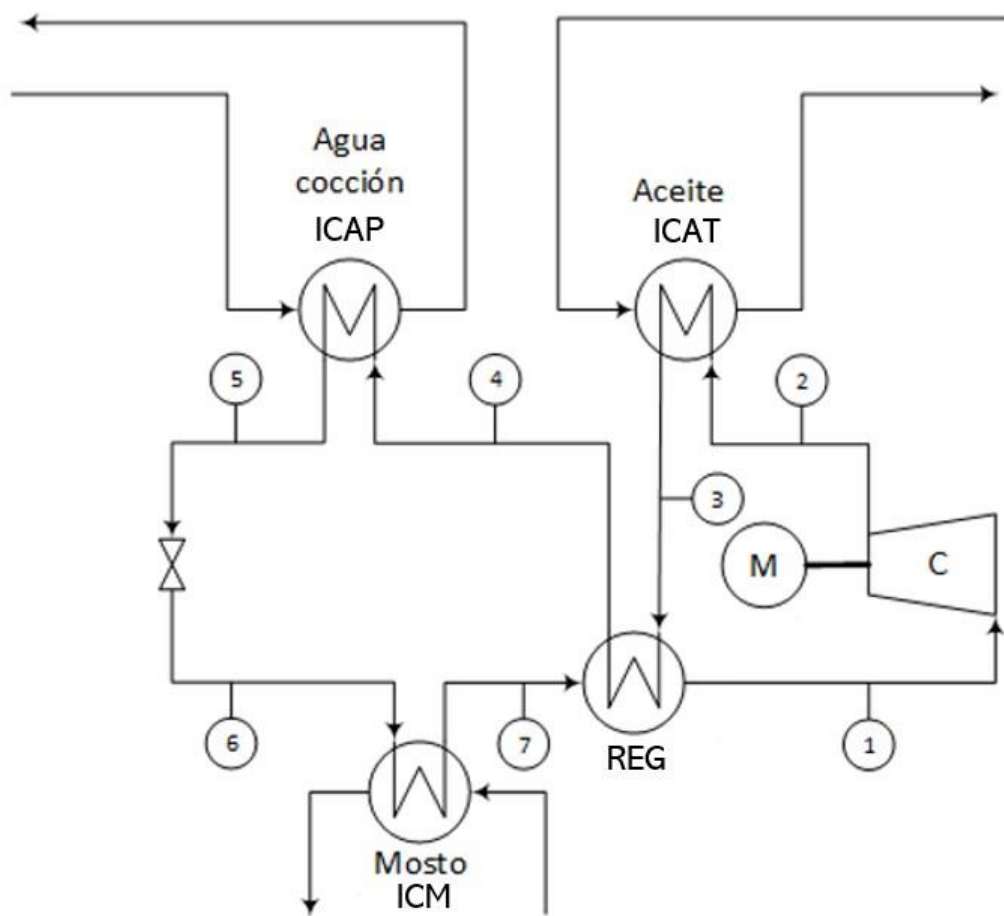


Figura 3-2. Diseño del ciclo propuesto

Definido el esquema del ciclo, se identificaron los parámetros a optimizar, tal y como se puede ver en la tabla 3.1.

Tabla 1-1: Parámetros a optimizar

Parámetro	Unidad
COP	p.u
Consumo del Compresor (W_{comp})	kW
Caudal másico de CO_2 ($\dot{m}_{CO_2}$)	kg/s
Caudal másico de agua ($\dot{m}_{agua}$)	kg/s
Caudal másico de mosto ($\dot{m}_{mosto}$)	kg/s
Caudal másico de aceite ($\dot{m}_{aceite}$)	kg/s

Además, se abordó el dimensionado preliminar de los distintos componentes del sistema. Para el cálculo de los intercambiadores se utilizaron correlaciones específicas de transferencia de calor, estableciendo el valor de UA necesario en función del acercamiento térmico disponible y de las temperaturas de trabajo. Se aplicaron criterios normativos como los de NORSOK P-001[3] y ASME B31.1 [4] para establecer los límites de caída de presión y velocidad en tuberías. El compresor se ha dimensionado mediante un análisis basado en el trabajo requerido en el ciclo y en el uso del diagrama de Balje, estimando la relación de compresión, la velocidad de giro, el número de etapas y el tipo de compresor (axial, radial o mixto).

Por último, se llevó a cabo un análisis económico que incluyó tanto la estimación de los costes de inversión como de operación. Se calcularon indicadores como el coste normalizado de calor (LCOH) y el periodo de retorno (PR) comparando el sistema propuesto con el sistema convencional alimentado por calderas. El cálculo del coste normalizado de calor (LCOH) se ha realizado empleando una expresión directa basada en la suma de los principales componentes económicos del sistema. En concreto, se han considerado los costes de inversión (CAPEX), los costes de operación y mantenimiento (OPEX_{OM}), y el consumo eléctrico anual del compresor (OPEX_{elec}), tal y como se indica en la Ecuación 3.1:

$$LCOH \left(\frac{\text{€}}{MWh} \right) = CAPEX + OPEX_{OM} + OPEX_{elec} \quad (3.1)$$

El estudio incluyó un análisis de sensibilidad del periodo de retorno frente a distintas subvenciones a la inversión, seguido de un análisis de tres escenarios: uno base sin ayudas ni mejoras, y dos optimistas con mayor capacidad térmica y condiciones económicas más favorables, con el objetivo de evaluar la viabilidad del sistema en distintos contextos.

4. Resultados

Tras aplicar la metodología descrita, se obtuvieron los resultados clave del diseño y análisis del sistema propuesto. En primer lugar, el modelado permitió determinar las condiciones de operación del ciclo, definiendo el comportamiento térmico de los distintos fluidos. Se seleccionaron materiales adecuados para cada circuito, atendiendo a la normativa aplicable y a las condiciones de presión y temperatura: para los circuitos de CO₂ se utilizó acero al carbono ASTM A106 Grado B, para las líneas de agua y mosto AISI 316L (acero inoxidable resistente a la corrosión), y para el aceite térmico se optó por acero al carbono ASTM A53 Grado B. La disposición general de los conductos se representa en la Figura 4.1, así como la ubicación de los intercambiadores de calor. Estos se dimensionaron considerando las cargas y un acercamiento térmico mínimo de 10 °C como criterio de diseño. Se obtuvieron valores representativos de UA de 382,6 kW/K en el ICAT, 156,7 kW/K en el regenerador, 385,1 kW/K en el ICM y 844,5 kW/K en el ICAP, garantizando así la transferencia térmica necesaria en cada fase del ciclo.

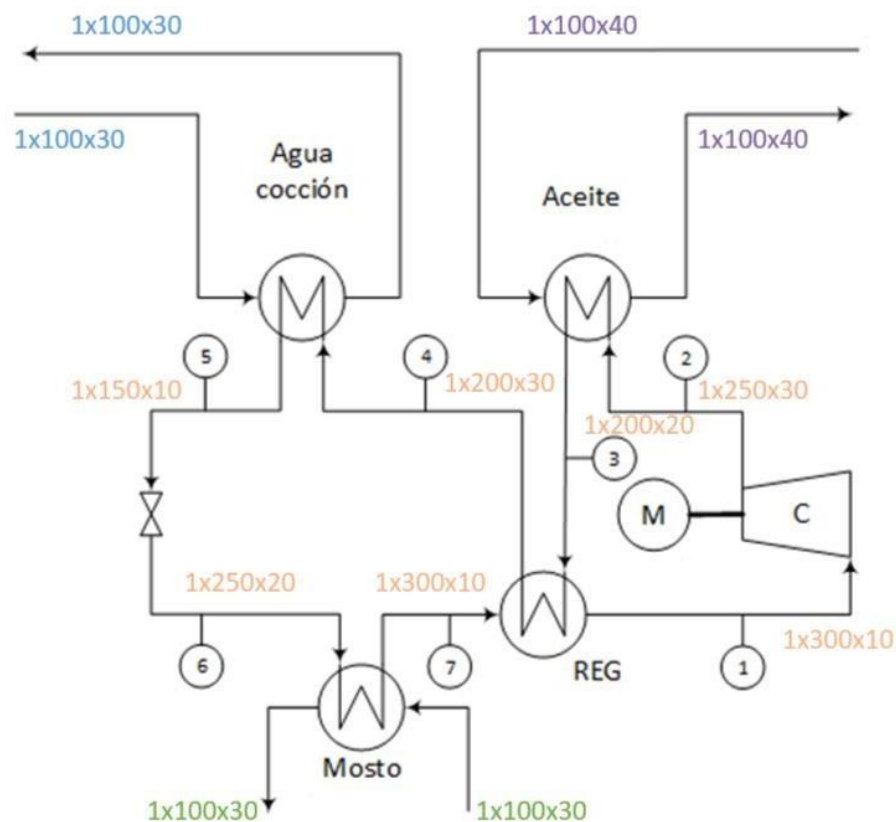


Figura 4-1. Dimensionado de conductos

En cuanto al compresor, el análisis basado en el diagrama de Balje condujo a la elección de un compresor radial, con una velocidad de giro estimada de 40.000 rpm y un diseño de una única etapa, suficiente para alcanzar la relación de compresión requerida sin comprometer la eficiencia del ciclo.

Respecto al análisis económico, el sistema presenta un periodo de retorno (PR) que mejora significativamente con subvenciones a la inversión, reduciéndose de forma notable con el aumento de la subvención, tal y como se puede ver en la Figura 4.2. Este análisis confirma la viabilidad económica del sistema, especialmente en contextos con precios energéticos elevados o apoyo institucional.

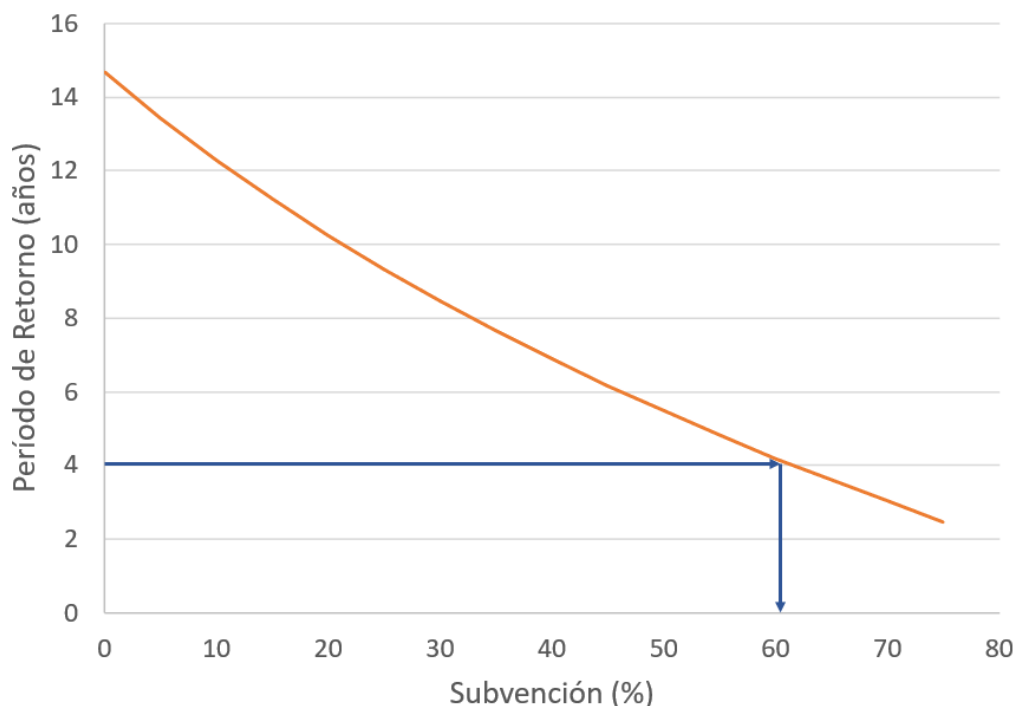


Figura 4-2. Análisis de sensibilidad del periodo de retorno frente a la subvención

Se ha estimado una inversión total que oscila entre 5,8 y 7,7 millones de euros en función del escenario considerado. El coste nivelado de calor (LCOH) obtenido se sitúa entre 68,78 y 83,13 €/MWh, siendo los escenarios optimistas los que ofrecen mejores resultados y mayor competitividad frente a los costes actuales del gas natural industrial. A modo de referencia, el escenario base alcanza un LCOH de 81,13 €/MWh.

5. Conclusiones

El sistema desarrollado en este trabajo se plantea como una solución innovadora para reaprovechar el calor residual del proceso de cocción del mosto en una planta cervecera. Mediante un ciclo Rankine inverso regenerativo con CO₂, se logra elevar el nivel térmico de esta energía para reutilizarla dentro del proceso, reduciendo así el uso de calderas convencionales alimentadas por combustibles fósiles y favoreciendo la electrificación del suministro térmico.

A nivel técnico, se han definido todos los parámetros de diseño clave: selección de materiales adecuados por circuito, configuración de un compresor radial capaz de alcanzar la relación de compresión requerida, e integración de intercambiadores de calor con valores UA representativos, garantizando una transferencia eficiente manteniendo un pinch point mínimo de 10 °C.

En cuanto al rendimiento energético, el sistema alcanza COPs máximos superiores a 6 y un COP medio estacional de 4,78, confirmando una recuperación eficiente del calor. Desde el punto de vista económico, la inversión necesaria se estima entre 5,8 y 7,7 millones de euros, mientras que el LCOH oscila entre 68,78 y 83,13 €/MWh, siendo competitivo frente al coste del gas industrial. Los costes operativos anuales varían entre 3,3 y 6,6 millones de euros, con

una sensibilidad alta al precio de la electricidad, lo que refuerza el interés por estrategias de autoconsumo o suministro renovable.

En conjunto, el proyecto demuestra que esta tecnología puede ser viable, eficiente y escalable para su aplicación en otros entornos industriales con necesidades térmicas similares, constituyendo una alternativa realista para avanzar en la descarbonización de la industria.