



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR PARA UNA CALEFACCIÓN URBANA

Autor: EMMA ARANA URIGÜEN

Director: ROBERTO ZIARELLI

MADRID, Mayo 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor Dña. Emma Arana Urigüen

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: “Diseño del sistema de recuperación de calor para una calefacción urbana”, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

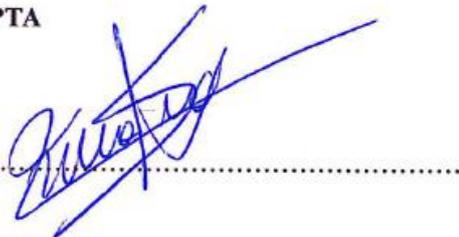
La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 24 de Mayo de 2018

ACEPTA

Fdo.....

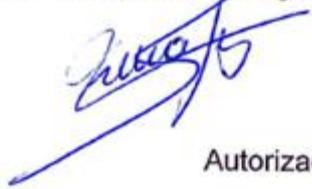


Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título "Diseño del sistema de recuperación de calor para una calefacción urbana" en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2017-2018 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Emma Arana Urigüen

Fecha: ..24 / 05 / 2018



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Roberto Ziarelli

Fecha: / / 2018





ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR PARA UNA CALEFACCIÓN URBANA

Autor: EMMA ARANA URIGÜEN

Director: ROBERTO ZIARELLI

MADRID, Mayo 2018

DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR PARA UNA CALEFACCIÓN URBANA

Autor: Arana Urigüen, Emma.

Director: Ziarelli, Roberto.

Entidad Colaboradora: Vidrala.

RESUMEN DEL PROYECTO

1. Introducción

La empresa española Vidrala, que fabrica envases de vidrio, se encuentra en período de expansión por Europa. En la fábrica de Italia se ha realizado un gran proyecto de inversión para mejorar la eficiencia del proceso: se está reconstruyendo la planta y se está cambiando la maquinaria de las líneas por otra más moderna. Con esto se pretende mejorar la rentabilidad y ser más competitivos en el mercado italiano.

Además, la renovación de la planta cuenta con proyectos de aprovechamiento de calor. Este trabajo propone utilizar el calor de los humos de la chimenea para venderlos a una central de generación de calefacción urbana, que se encuentra muy próxima a la planta. De esta forma se obtiene un ingreso a partir del calor de unos humos que actualmente se disipa al ambiente.

En la práctica solamente se venderá calor por la simplicidad del proyecto. Sin embargo, se estudia la posibilidad de vender calor y electricidad a través de un ciclo Rankine simple. Para ambos escenarios se hace un estudio técnico y se analiza su viabilidad económica.

2. Escenario 1: producción de calor

En el escenario 1 se hacen pasar los humos por un intercambiador de calor que calientan un circuito intermedio de agua. Este circuito intercambia calor directamente con la red de calefacción. El proceso se muestra en la Figura 1.

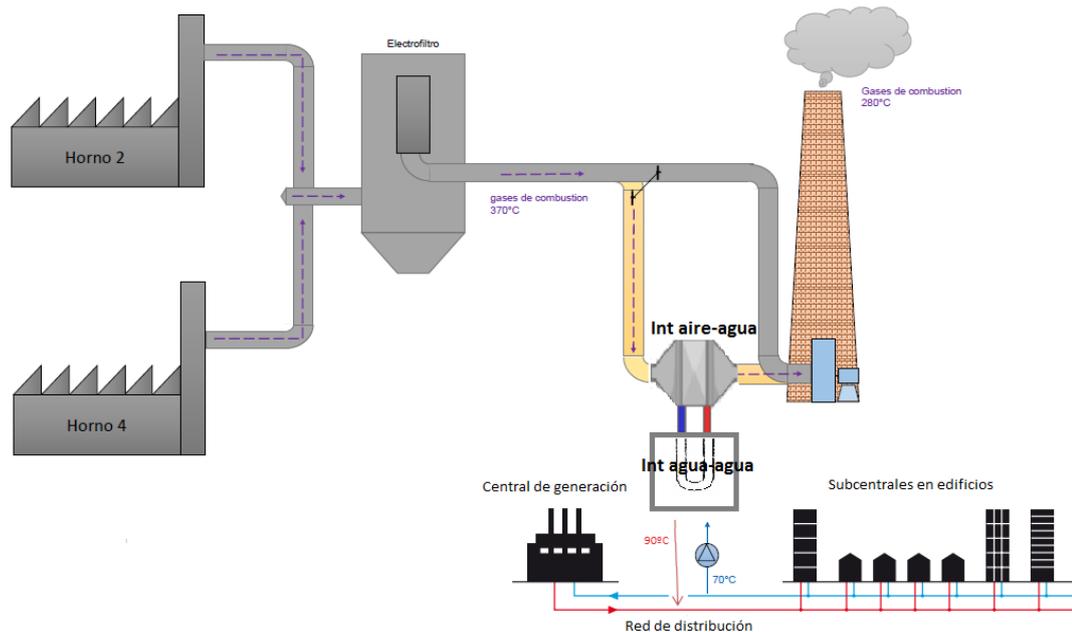


Figura 1. Circuito Escenario 1

El estudio se ha desarrollado para una temperatura de salida de los humos de 370°C y se limita la temperatura de salida por la chimenea a 160°C, por encima de su punto de rocío ácido. Con un caudal de $70.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ se obtiene una potencia de 5,57 MW que los humos son capaces de entregar. La red de calefacción del cliente tiene sus condiciones: el agua caliente circula a 85°C y la fría a 65°C, con un caudal de 50 kg/s. Eso supone que el cliente va a necesitar una potencia de 4,18 MW, el 75% de lo que los humos son capaces de aportar. La potencia aportada se controla haciendo circular los humos por un by-pass.

Los intercambiadores se han calculado con el método $\epsilon - NTU$. El primer intercambiador aire-agua será un intercambiador de flujo cruzado con una eficiencia del 71% y 25,70 kW/K. El intercambiador agua-agua será un intercambiador de placas con una eficiencia del 67% y 442,83 kW/k, más grande que el anterior.

Por otro lado, se requiere que la inversión sea pequeña y con retorno rápido. Esto se debe a que el gran proyecto de inversión es prioritario y todo proyecto ajeno supone mayor inversión y complicaciones. Se han estudiado distintos escenarios en función del precio de venta del calor, precio de la inversión... En el caso más desfavorable el payback sería de 1,14 años y la inversión sería de un millón de euros. Estos valores son razonables para que la dirección apruebe el proyecto.

3. Escenario 2: producción de electricidad y calor

Vidrala no está interesado actualmente en los proyectos de generación eléctrica porque añaden gran complejidad al proceso, y puede perjudicar al proyecto de inversión. Sin embargo, se hace un estudio por si en un futuro se tiene la posibilidad de instalarlo.

Para ello se va a utilizar un ciclo Rankine simplificado con un fluido de trabajo de isopentano, muy utilizado en este tipo de procesos. Los humos calientan el fluido, que hace girar la turbina para generar electricidad. El fluido que sale de la turbina se condensa en un intercambiador que calentará la red de calefacción urbana. Finalmente se bombea el fluido hacia la entrada del primer intercambiador.

Se va a utilizar un ciclo supercrítico, por donde el fluido supera la temperatura crítica y no pasa por la campana en el diagrama T-s, como se muestra en la Figura 2. Con este proceso se consigue una temperatura del fluido muy alta, por encima de su temperatura crítica, de este modo la eficiencia de este intercambiador será mayor, ya que las temperaturas se acercan más a la de los humos. El inconveniente se encuentra en que se tendrá que trabajar a presiones mayores y la inversión de la instalación será mayor.

Se fija una presión máxima de 38 bar y una temperatura de saturación del condensador a 100°C (7,22 bar). El cliente exigiría un mínimo de 700 kW de potencia eléctrica. Con el programa EES Calculator se obtienen las características de los puntos del ciclo, cuyo diagrama T-S se muestra en la Figura 2, con los puntos del proceso sobre el diagrama.

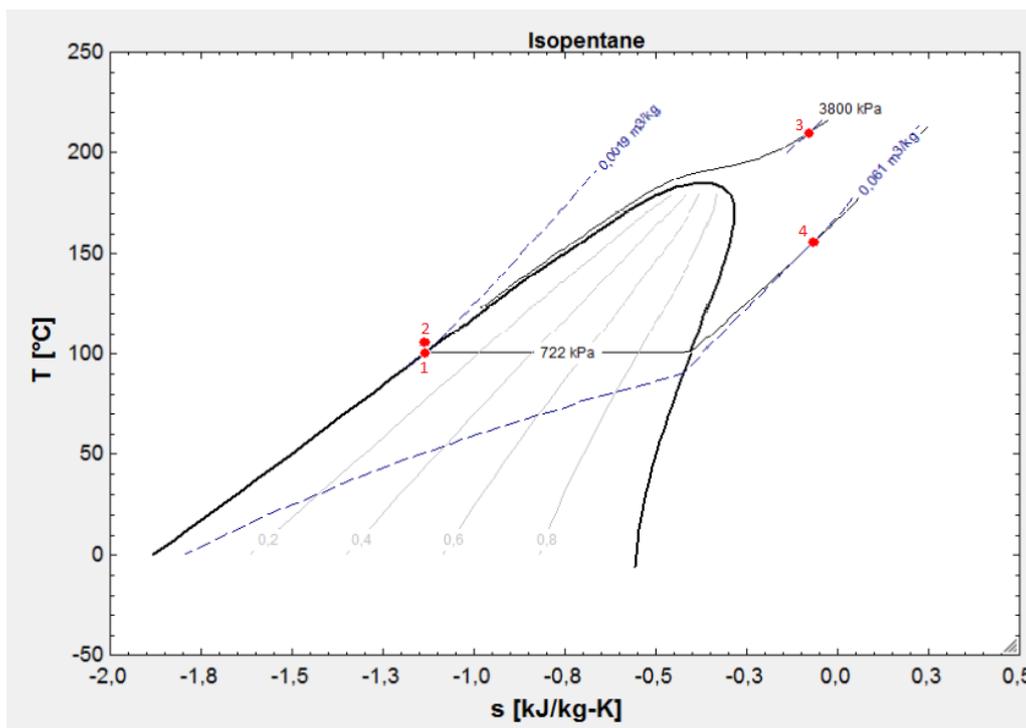


Figura 2. Ciclo Rankine isopentano resultado

La potencia calorífica entregada en el condensador es de 4,96 MW, pero como los clientes solamente necesitan 4,18 MW, solo se utilizará el 85%.

De la misma forma que en el caso anterior, utilizando el método $\epsilon - NTU$ se calcula un intercambiador de flujo cruzado para el recuperador de humos con una eficiencia de 79% y UA 67,45 kW/K y una potencia de intercambio de 5,57 MW. El condensador, para una potencia deseada por el cliente de 4,18 MW, tiene una eficiencia del 69% y UA 97,45 kW/K y intercambia calor con el

circuito de agua intermedio. Finalmente el intercambiador agua-agua será igual que en el Escenario 1.

Como es de esperar, este escenario tendrá una inversión más alta y un payback mayor, por lo que la dirección no estaría interesada. Para la situación más desfavorable, donde la inversión es de 3 millones de euros, el payback sería de 3 años.

DESIGN OF A HEAT RECOVERY SYSTEM FOR A DISTRICT HEATING

Author: Arana Urigüen, Emma.

Director: Ziarelli, Roberto.

Collaborating Organization: Vidrala.

PROJECT SUMMARY

1. Introduction

The Spanish company Vidrala, who manufactures glass containers, is expanding in Europe. A big investment has been made in the Italian plant to improve the process efficiency. They are building a new plant and are changing the machinery for modern lines. With this, they expect to improve profitability and become more competitive in the Italian market.

In addition, the plant is developing heat recovery projects. They propose using the heat from the smoke and sell the power to a generation plant of district heating, which is close to the plant. This way, an income is obtained from a heat that is being disipated to the ambient.

In practice, only the heat will be sold because of the simplicity of the project. Nevertheless, the possiblity of selling heat and electricity with a Rankine cycle is studied for the future. For both scenarios a technical and economical study is done.

2. Scenario 1: heat production

In the Scenaro 1 the smoke goes through a heat exchanger that heats an intermediate water cycle. This water exchanges heat directly to the district heating mains. This process can be seen in Figura 3.

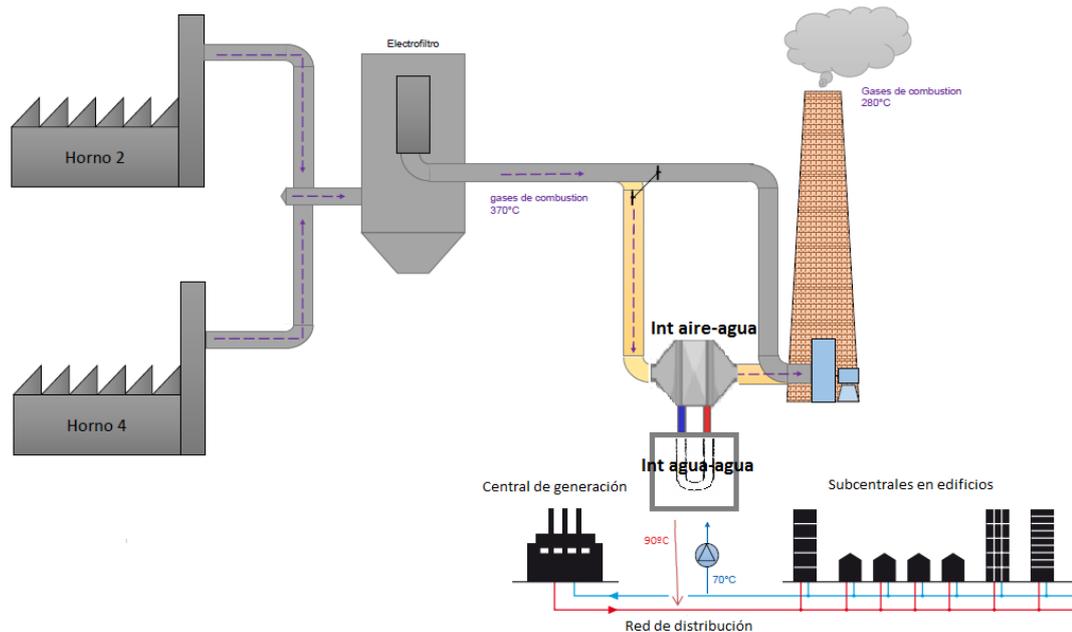


Figura 3. Process Scenario 1

The study has been done for an exit temperature of the smoke of 370°C and the flue is limited to 160°C, above the acid dew point. With a flow of 70.000 Nm³/h a power of 5,57 MW is obtained. The water circuit of the client has its conditions also: 50 kg/s flow with a hot temperature of 85°C and cold temperature of 65°C. This means that the client only needs 4,18 MW, which is 75% of the available. The smoke flow is controlled with a bypass.

The exchangers have been calculated with the $\epsilon - NTU$ method. The first air-water exchanger will be a crossed flow exchanger with an efficiency of 71% and 25,70 kW/K. The water-water exchanger will be a plate exchanger with an efficiency of 67% and 442,83 kW/k bigger than the last one.

On the other hand, the investment must be small, and the payback must be short. This is because the big investment plan is priority and other projects can damage it. Different cases have been studied according to the selling price, investment price... In the most unfavorable situation the payback would be 1,14 years and the investment would be a million euros. These results are reasonable for the directors and will approve the project.

3. Scenario 2: heat and electricity production

Vidrala is not currently interested in electricity generation projects because they add complexity to the process and can damage the investment plan. However, an study is made if there is a possibility in the future.

A simple Rankine cycle is used using isopentane as working fluid. This is a common fluid for this process. The smoke heats the isopentane, which then activates a turbine generating electricity. The

isopentane condensates and this heat is used for the urban district. Finally, a bomb sends back the fluid to the smoke exchanger.

A supercritical cycle is going to be used, where the fluid exceeds the critical temperature and goes over the T-s diagram, as shown in Figura 4. The fluid gets a very high temperature, so the efficiency of the exchanger will be higher. The inconvenient is that high pressures will be used and the investment in the instalation will be higher.

A maximum pressure of 38 bar is determined, and the saturation temperature of the condenser at 100°C (7,22 bar). The client asks for 700 kW of electric power. With EES Calculator program all the characteristics of every point are obtained.

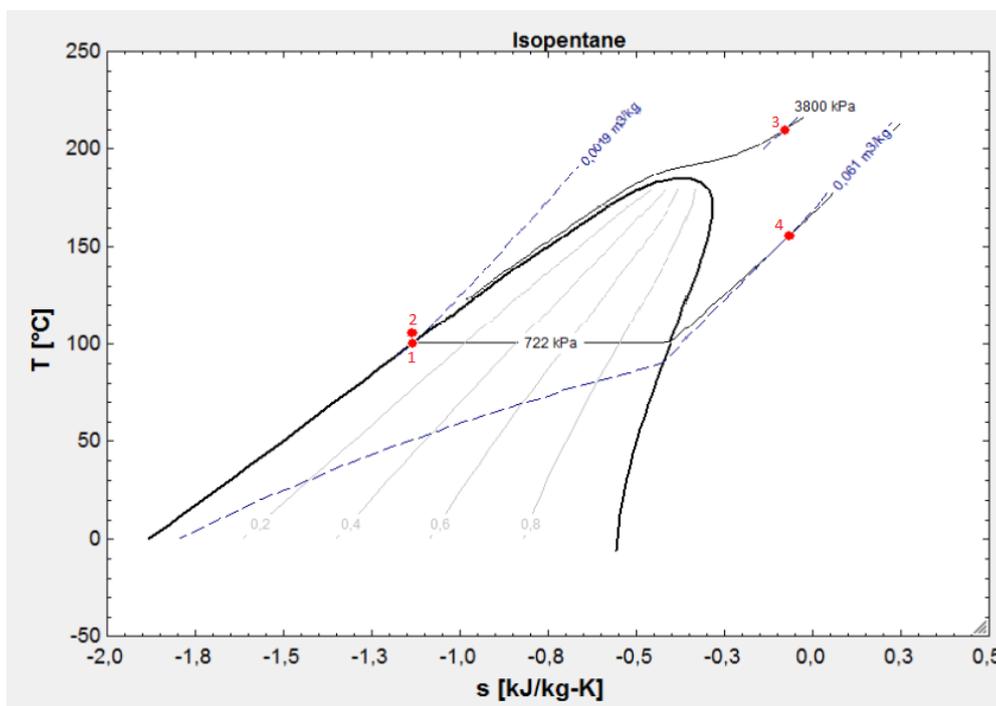


Figura 4. Rankine cycle solved

The heat power given to the condenser is 4,96 MW, but clients only want 4,18 MW, which is the 85%.

The same way as in the previous case, using $\epsilon - NTU$ method, the heat exchanger of the smoke is calculated with an efficiency of 79% and UA 67,45 kW/K with a power exchanged of 5,57 MW. The condenser, por a power exchanged of 4,18 MW, has an efficiency of 69% and UA 97,45 kW/K. It exchanges heat with the intermediate water mains. Finally, the last exchanger will be the same as in the Scenario 1.

As expected, this scenario will have a high investment and a higher payback, so the directors will not be interested. For the most unfavorable situation, where the investment is of 3 million euros, the payback will be more than 3 years.

Indice

1.	Introducción.....	5
1.1.	Motivación.....	7
1.2.	Presentación del mercado y de la empresa	7
1.3.	Proyecto de inversión	8
1.4.	Calefaccion urbana	9
1.5.	Objetivos.....	10
2.	Proceso de producción.....	11
2.1.	Zona de partida	13
2.2.	Zona caliente	13
2.3.	Zona fría	15
3.	Proyectos de aprovechamiento de calor	17
3.1.	Gases de salida de las arcas de recocido.....	19
3.2.	Gases de salida del horno	20
4.	Escenario 1: Producción de energía térmica.....	23
4.1.	Descripción del ciclo y datos.....	25
4.1.1.	Humos de salida.....	25
4.1.2.	Necesidades del cliente.....	27
4.2.	Modelo matemático	29
4.2.1.	Diagrama	29
4.2.2.	Recopilación de datos	29
4.2.3.	Resolución	31
4.2.4.	Resultados.....	35
4.3.	Modelo económico	37
4.4.	Posibles complicaciones	39
5.	Escenario 2: Producción de energía eléctrica y térmica	41
5.1.	Descripción del ciclo y datos.....	43
5.2.	Modelo matemático	45
5.2.1.	Ecuaciones	45
5.2.2.	Resultados.....	47
5.3.	Cálculo de los intercambiadores.....	49
5.3.1.	Recuperador.....	49

5.3.2. Condensador	50
5.3.3. Resultados.....	52
5.4. Modelo económico	55
6. Recopilación de datos y Conclusiones	57
6.1. Escenario 1	59
6.2. Escenario 2	60
7. Bibliografía.....	63

Figuras

Figura 1. Lay out de los hornos antiguos. Fuente: Vidrala.....	8
Figura 2. Planning del proyecto del proyecto de inversión	9
Figura 3. Mapa Vidrala - Central de generación. Fuente: AETEC.....	9
Figura 4. Esquema calefacción urbana. Fuente: Federación Española de municipios y provincias.....	10
Figura 5. Zona caliente horno antiguo.....	14
Figura 6. Zona caliente horno nuevo	14
Figura 7. Zona fría horno antiguo.....	15
Figura 8. Zona fría horno nuevo.....	16
Figura 9. Intercambio de calor en el arca de recocido. Fuente: Renovis.....	19
Figura 10. Circuito del agua. Fuente: Renovis	20
Figura 11. Esquema gases de combustión. Fuente: Vidrala	21
Figura 12. Esquema completo Escenario 1. Fuente: Vidrala.....	25
Figura 13. Diagrama del ciclo	29
Figura 14. Intercambiador de flujo cruzado. Fuente: UNET.....	31
Figura 15. Intercambiador de placas. Fuente Aratt.....	33
Figura 16. Ciclo Rankine. Fuente: UDP Universidad de Ingeniería Industrial	43
Figura 17. Ciclo Rankine supercrítico. Fuente: McGraw Hill.....	44
Figura 18. Ciclo Rankine isopentano resultado.....	48
Figura 19. Ciclo escenario 1	59
Figura 20. Ciclo Rankine escenario 2.....	60
Figura 21. Diagrama T-s escenario 2.....	61

Tablas

Tabla 1: Composición gases de salida.....	26
Tabla 2. Punto ácido, Ecuación de Zarenzhad.....	27
Tabla 3. Recopilación datos.....	30
Tabla 4. Datos cálculo intercambiador 2.....	33
Tabla 5. Puntos de trabajo.....	35
Tabla 6. Resultados intercambiadores.....	35
Tabla 7. Escenarios económicos.....	37
Tabla 8. Resultados económicos sin inversión.....	38
Tabla 9. Resultados económicos con inversión.....	38
Tabla 10. Datos de partida del isopentano.....	47
Tabla 11. Datos de partida instrumentos.....	47
Tabla 12. Resultado datos isopentano.....	47
Tabla 13. Resultados instrumentos.....	47
Tabla 14. Datos de partida recuperador.....	49
Tabla 15. Datos de partida condensador.....	50
Tabla 16. Resultados instrumentos Escenario 2.....	52
Tabla 17. Datos puntos Escenario 2.....	53
Tabla 18. Escenarios económicos Escenario 2.....	55
Tabla 19. Combinación peor payback.....	56
Tabla 20. Combinación mejor payback.....	56
Tabla 21. Resultado puntos escenario 1.....	59
Tabla 22. Resultados intercambiadores escenario 1.....	60
Tabla 23. Resultados puntos Rankine escenario 2.....	60
Tabla 24. Resultados intercambiadores escenario 2.....	61

1. Introducción

1.1. Motivación

Este documento recoge el proyecto de un sistema de recuperación de calor en la producción de botellas de vidrio de la empresa Vidrala, en Italia. El objetivo es vender la energía recuperada a una central de generación cercana que proporciona agua caliente a una red de calefacción urbana. Las pérdidas de calor ya se aprovechan actualmente durante el proceso de fabricación de las botellas, pero todavía pueden aprovecharse en más partes del proceso. El proyecto se ha realizado en la planta de Corsico, durante los primeros meses del año 2018. A largo plazo se pretende implantar el sistema en el resto de las plantas del Grupo: en España, Bélgica y Reino Unido.

El proceso de fabricación del vidrio se caracteriza por tener elevados consumos de energía. El 80% del consumo energético es absorbido por el horno de fusión. En este sector, definido de alta intensidad energética, el coste de la energía es una parte importante del coste total de producción, incidiendo directamente en su competitividad.

Por otro lado, además de los elevados consumos energéticos, también hay destacadas dispersiones de calor. La recuperación de este calor y su reutilización representan una importante oportunidad de eficiencia, que supone una mejor imagen de la empresa más allá de los beneficios económicos.

1.2. Presentación del mercado y de la empresa

El mercado de los envases de vidrio para comida y bebida en Italia es grande y diverso. Se trata de un gran país consumidor y exportador de vino, aceite y comida, que cada vez genera más volumen a precios más bajos respecto al resto de países. El producto que más se vende son las botellas de vino, con un 47% de las toneladas de vidrio vendidas.

Italia es el segundo país europeo con el mercado más fuerte en la industria de envases de vidrio, con una cuota de mercado del 18%, por detrás de Alemania, con un 19%. Los análisis indican una media de 3,5 millones de toneladas de vidrio anuales y se espera un crecimiento estable en los próximos años.

En el Oeste de Europa, los principales competidores de Vidrala son Veralia, OI, y Ardagh. Vidrala cuenta con una cuota del mercado europeo del 12% y está presente en España, Reino Unido, Italia y Bélgica. En España es líder, contando con una cuota de mercado de casi el 50%, mientras que en Italia, tras su reciente expansión, solo cuenta con un 4% de la cuota de mercado.

La fábrica de vidrio en Italia fue comprada a Veralia, la competencia, en 2004. Allí se encontraron con una tecnología obsoleta y con un edificio poco adecuado. Desde su adquisición, la planta ha generado pocos beneficios, en gran parte debido a los altísimos consumos de electricidad por la ineficiencia de las máquinas antiguas. En 2014 se vio la necesidad de realizar una gran inversión para modernizar y adecuar la planta.

1.3. Proyecto de inversión

El proyecto de inversión se realiza en el periodo 2016-2018 y ha supuesto 100 millones de euros a la empresa. El proyecto incluye inversiones tanto en mejoras tecnológicas de producción como en la reconstrucción de la planta en una fábrica adecuada. El objetivo es mejorar la posición competitiva de la compañía, instalando hornos y líneas modernas. Se busca reducir el consumo de energía, mejorando la eficiencia energética y reduciendo la contaminación, y adaptarse mejor a las necesidades del cliente aumentando la zona de almacén.

La fábrica cuenta con una capacidad de 4 hornos, pero solo había dos instalados: el 2 y el 4. En la Figura 1 se muestra el Layout de los hornos antiguos (H2 y H4) y los huecos vacíos (H1 y H3).



Figura 1. Lay out de los hornos antiguos. Fuente: Vidrala

Se trata de un proyecto ambicioso que sustituirá los dos hornos antiguos por otros dos modernos. El horno 2 fue demolido a finales del 2017 y se instaló uno nuevo a su lado, en el hueco del horno 1. Actualmente se está demoliendo la zona vacía del horno 2 y se está constuyendo un edificio adecuado para instalar el siguiente horno nuevo. Mientras tanto, están en funcionamiento el horno 1 nuevo y el horno 4 antiguo. La demolición del horno 4 está programada para finales del 2018, y su actividad será sustituida por el horno nuevo en la zona 2. El planning del proyecto se muestra en la Figura 2, donde se ve cuándo se paran los hornos antiguos, cuándo se trabaja en las zonas vacías y cuándo se instalan los hornos nuevos.

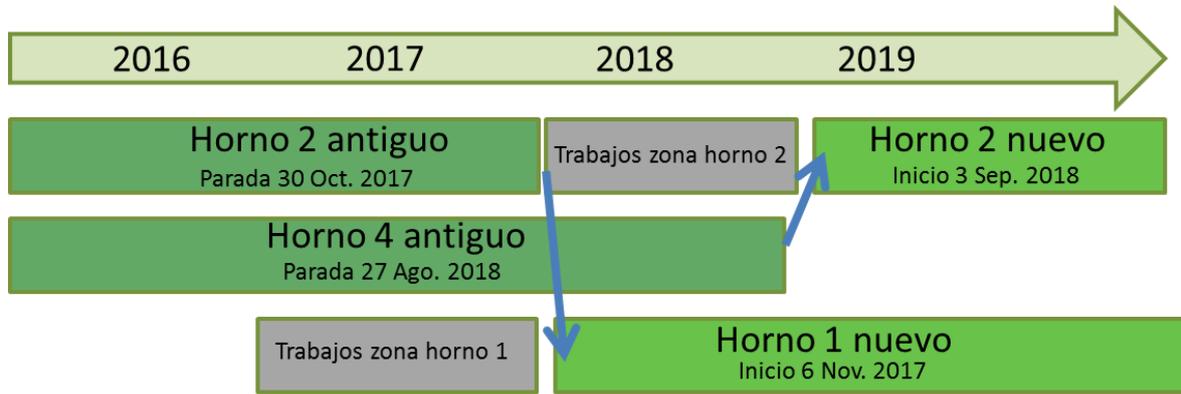


Figura 2. Planning del proyecto del proyecto de inversión

Con esta obra se busca tener los dos hornos más cercanos y las zonas del horno 3 y 4 utilizarlas como almacén. Se trata de un proyecto peculiar ya que al mismo tiempo se está realizando una obra en el edificio y se está cambiando de maquinaria.

La fábrica se encuentra en un periodo de renovación, cuyo principal objetivo es la mejora de la eficiencia energética. Sin embargo, la eficiencia no solo se mejora modernizando la planta, sino que también contribuye al mismo objetivo el aprovechamiento de calor en el proceso.

1.4. Calefacción urbana

Corsico es una zona de Milan con mucha industria. A escasos metros de la planta hay una central de generación que calienta una red de calefacción urbana. La central está interesada en disminuir sus consumos de combustible y comprar calor a Vidrala. En la Figura 3 se muestra el mapa en el que se ve la cercanía entre Vidrala y la central de generación “ATEC Centrale”. Los edificios de colores son aquellos a los que llega la calefacción de la central.



Figura 3. Mapa Vidrala - Central de generación. Fuente: AETEC

El sistema centralizado de calefacción consiste en que, desde una central de generación de calor, se calienta agua que se distribuye por un circuito cerrado y bien aislado hacia subcentrales. Las subcentrales se encuentran cerca en los edificios, y mediante un intercambiador, se prepara el agua a las condiciones de temperatura y presión necesarias para ser distribuidas al consumidor. El esquema del funcionamiento de la red se muestra en la Figura 4. Aunque el alcance de este proyecto no es diseñar la red de calefacción urbana, es importante entender cómo se distribuye el calor, ya que el sistema de recuperación de calor que va a diseñarse va a estar directamente conectada a la red.

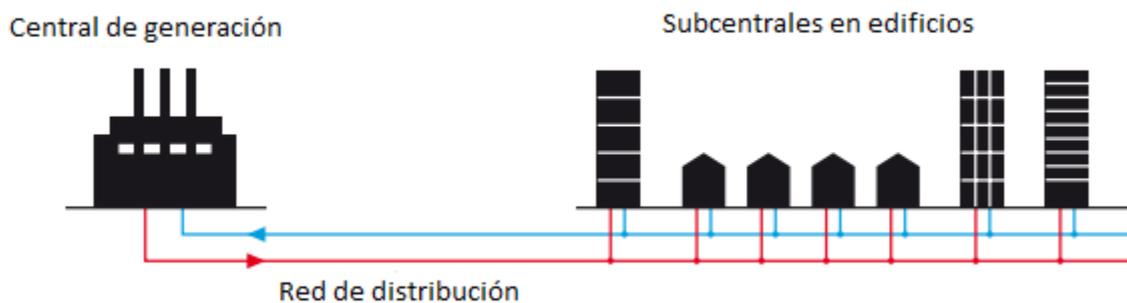


Figura 4. Esquema calefacción urbana. Fuente: Federación Española de municipios y provincias

1.5. Objetivos

Este proyecto tiene dos objetivos principales, y de ellos derivan objetivos secundarios:

1. Aprovechar el calor de los humos que salen de la chimenea para generar beneficios económicos.
 - Negociar con la central el precio de venta para que el proyecto sea rentable.
 - El sistema no debe afectar al proceso de fabricación:
 - o El intercambio de calor debe asegurar que los gases salen de la chimenea a una temperatura suficiente para que no condensen los y caigan a la superficie.
 - o Se estudia la posibilidad de realizar el intercambio antes o después del electrofiltro, teniendo en cuenta que éste debe trabajar en unas condiciones determinadas.
2. Contribuir en la disminución del consumo de energía.
 - La central reduciría el consumo de energía primaria.
 - Las calefacciones urbanas son más eficientes que las calderas individuales.
 - Disminuir la contaminación debido a la reducción del consumo de gas natural para general calor.

2. Proceso de producción

Para poder entender de qué partes del proceso puede recuperarse el calor, se va a explicar el proceso de fabricación de las botellas de vidrio. Se mostrarán imágenes del horno antiguo y el nuevo, para ver el cambio de tecnología.

2.1. Zona de partida

Es una parte esencial del proceso ya que debe realizar distintas recetas para cada tipo de vidrio.

- Alimentación a los silos
Las materias primas (arena, sosa, cal...) se alimentan a los silos mediante camiones. Las condiciones de los silos como el nivel y la presión se controlan mediante sensores. Los silos cuentan con unidades que atrapan el polvo para que no se contamine la mezcla.
- Transporte y medida de las materias primas
El tiempo y la secuencia de la dosificación de las materias está automatizado y es un punto importante porque las cantidades deben mezclarse con exactitud.
- Mezcladores
Se mezclan todas las materias con un motor y no se introducen en el horno hasta que la mezcla no adquiera la consistencia necesaria. La chatarra de vidrio generada durante la fabricación se introduce en la mezcla.

2.2. Zona caliente

- Horno
Los hornos de tanque se utilizan para fabricación a gran escala. El horno consta de una bañera formada por un material muy refractario que resiste temperaturas muy altas. Para obtener un proceso eficiente, altas temperaturas y bajos consumos de energía, se utiliza un sistema regenerativo. El aire para la combustión se precalienta haciéndolo pasar por bloques calientes. El aire se mezcla con el combustible y se quema sobre la superficie del vidrio. El aire caliente de salida se expulsa haciéndolo pasar por otro bloque, que finalmente se calentará. Cada veinte minutos, una válvula cambia el flujo del aire y el aire entrará por el bloque por el que antes salía, y así aprovechar el calentamiento. Los hornos operan a 1500°C.
- Proceso de formación
La mezcla alcanza los 1200°C, la temperatura plástica del vidrio, y se corta formando una gota sólida que cae al molde por gravedad. El aire comprimido se introduce en el molde para dar la forma hueca a la botella.
- Tratamiento térmico

El recocido es un tratamiento térmico que mejora la resistencia del vidrio. Se trata de una fase que ocupa gran espacio ya que hay que hacer pasar las botellas por una curva de temperaturas determinada.

En la Figura 5 y Figura 6 se muestran imágenes del horno antiguo y nuevo. Se puede ver la diferencia en limpieza y tecnología.



Figura 5. Zona caliente horno antiguo

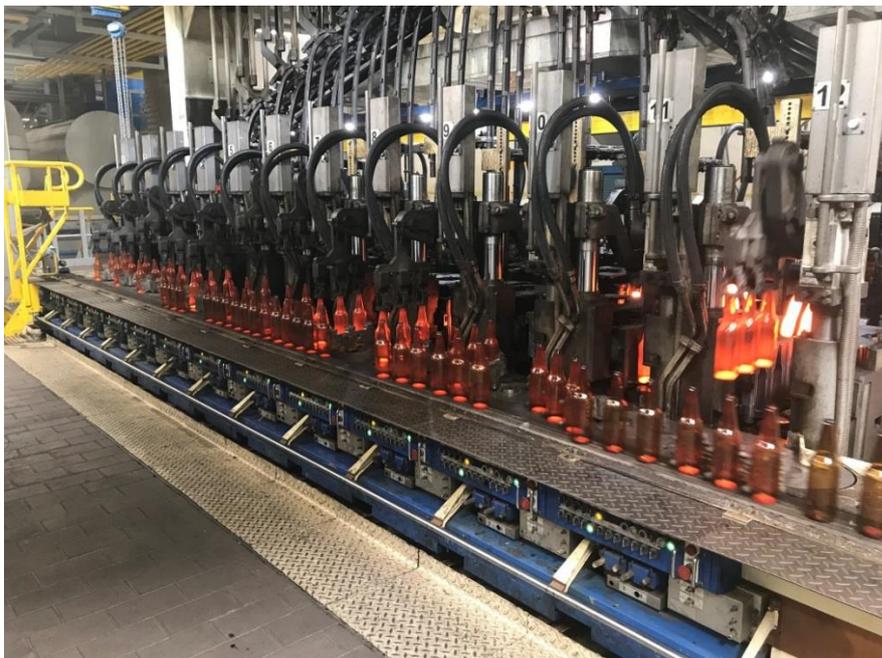


Figura 6. Zona caliente horno nuevo

2.3. Zona fría

En la zona fría se rocían las botellas con un spray de polietileno para que no se rompan por contacto entre ellas y aumentar la lubricación. Se inspeccionan todas las botellas tanto por personal como por máquinas. Finalmente se empaquetan y almacenan.

Durante este proceso, el consumo total de energía se distribuye de la siguiente manera: 80% para el horno, 6% para el canal de alimentación, 4% para el aire comprimido, 4% para la fase de recocido y 6% para el resto. Al rededor del 30% de la energía introducida en el horno se dispersa en forma de calor en los humos de salida por la chimenea.

Actualmente, se aprovecha el calor del recocido para calentar la planta en invierno. En este proyecto se estudia la posibilidad de vender el calor de salida de los gases a una central de generación de calefacción urbana.

En la Figura 7 y Figura 8 se muestra la zona zona fría del horno viejo y nuevo. Con la nueva maquinaria se pretende que las instalaciones se asemejen a las de la industria alimentacia, donde todo está limpio.



Figura 7. Zona fría horno antiguo



Figura 8. Zona fría horno nuevo

3. Proyectos de aprovechamiento de calor

Con la instalación del nuevo horno 2, se introdujo un sistema de recuperación de calor en la zona de las arcas de recocido para utilizar dicho calor en la calefacción, y así ahorrar el coste de combustible. Por otro lado, aprovechará también el calor de los humos de salida para vender potencia a una central de calefacción urbana.

3.1. Gases de salida de las arcas de recocido

El estudio se realizó en el nuevo horno 2 y se instalará de la misma forma en el futuro horno 1, ya que su implantación ha sido exitosa. La metodología es sencilla, se aprovecha el calor del aire que sale de las arcas y, mediante un intercambiador de calor, se calienta un circuito cerrado de agua, como se muestra en la Figura 9. Se muestra el esquema para el arca de una línea, pero hay que tener en cuenta que hay dos líneas por cada horno, por lo que se tendría otro sistema igual en la línea contigua. Los valores que aparecen son valores puntuales en un momento determinado, y pueden ir variando en función del tipo de botella o de la capacidad.

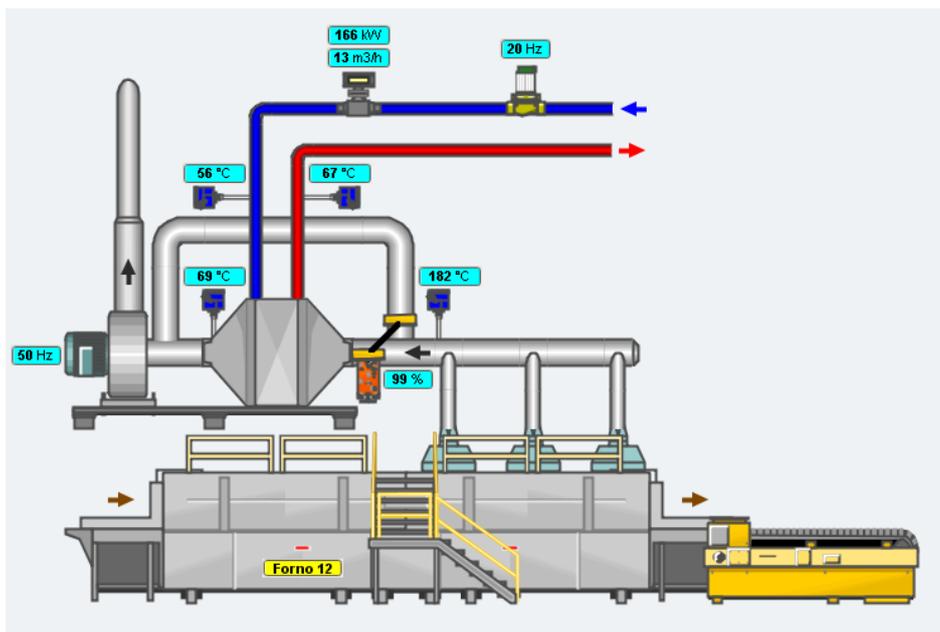


Figura 9. Intercambio de calor en el arca de recocido. Fuente: Renovis

El aire sale entre 180-200°C, y cede calor a un circuito de agua mediante un intercambiador aire-agua. Ambas arcas calientan el mismo circuito de agua. El agua se calienta a 70-80°C y calienta el aire de climatización que sale por los ventiladores a 35°C. El agua vuelve enfriada a 60°C aproximadamente. El circuito se muestra en la Figura 10. La diferencia de potencia aportada por cada arca se debe a que las líneas no son exactamente iguales, debido al tipo de botella que se esté produciendo.

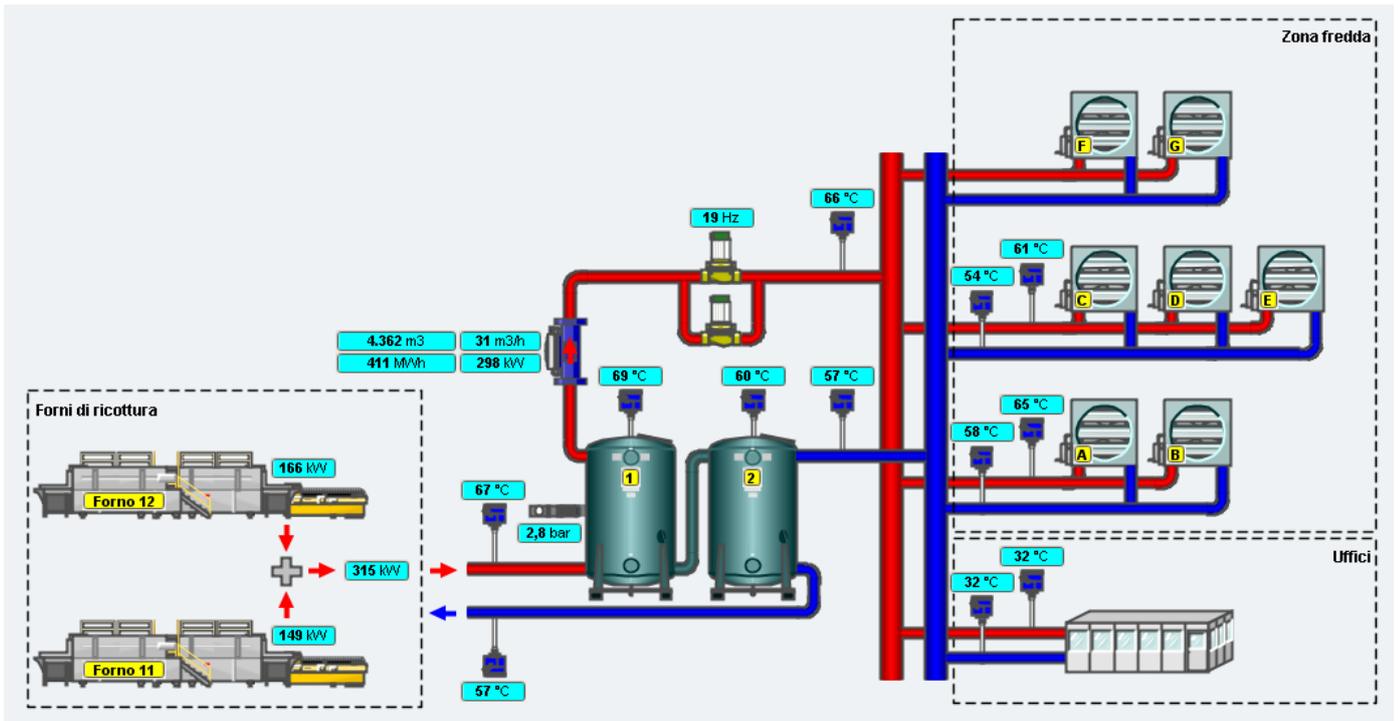


Figura 10. Circuito del agua. Fuente: Renovis

Con esto se consigue una calentar las líneas a coste cero, ahorrándose por cada horno 22.000€ al año y una potencia de 300KW. Cuando el siguiente horno esté instalado, el ahorro será el doble.

3.2. Gases de salida del horno

Con el mismo objetivo de aprovechar el calor, se realizará el proyecto para el calentamiento de la red de calefacción urbana a partir del calor de salida de los gases del horno. Los gases se expulsan por una chimenea tras pasar por un electrofiltro que los limpia, como se muestra en la Figura 11. Estos gases salen por la chimena aproximadamente a 370°, desaprovechando el calor. En este proyecto se propone aprovechar este calor para calentar un circuito de agua conectado a la red de distribución de la calefacción urbana.

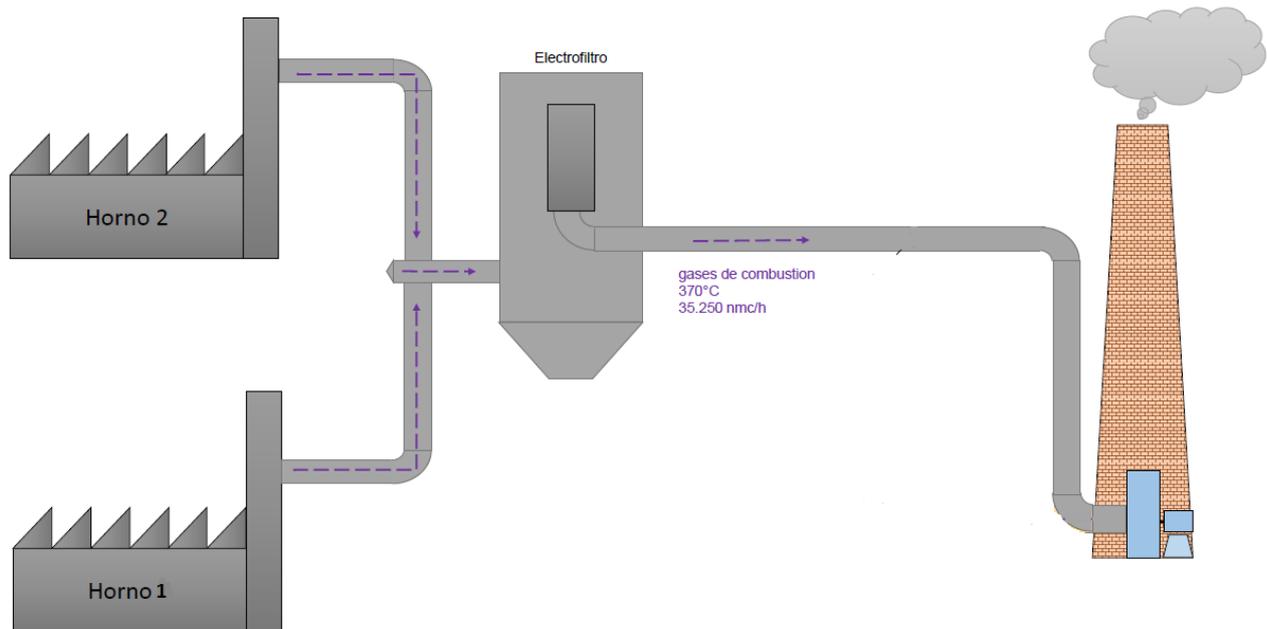


Figura 11. Esquema gases de combustión. Fuente: Vidrala

Con este calor se puede producir energía eléctrica o térmica. La producción de energía eléctrica se descarta en la puesta en práctica ya que introduce un grado de dificultad adicional que puede afectar al proceso. Tras la gran inversión de mejora del proceso, el objetivo único es que éste funcione sin añadir riesgos. Sin embargo, de forma teórica, se planteará el escenario en el que también se produzca energía eléctrica:

Escenario 1: Producción de energía térmica

Escenario 2: Producción de energía térmica y eléctrica

4. Escenario 1: Producción de energía térmica

4.1. Descripción del ciclo y datos

En la Figura 12 se muestra un esquema gráfico más detallado del proceso de recuperación de calor. Los gases que salen del electrofiltro atraviesan un intercambiador aire-agua, donde se calienta un circuito intermedio de agua. Este circuito sirve para unir la planta con la red de calefacción, que pasa a escasos metros de la chimenea. Finalmente, el aporte de calor a la red de calefacción se hace mediante un intercambiador agua-agua. Se debe prestar especial atención en la temperatura de salida de los gases, para evitar condensaciones. Esta temperatura limitará la potencia que puede aportarse.

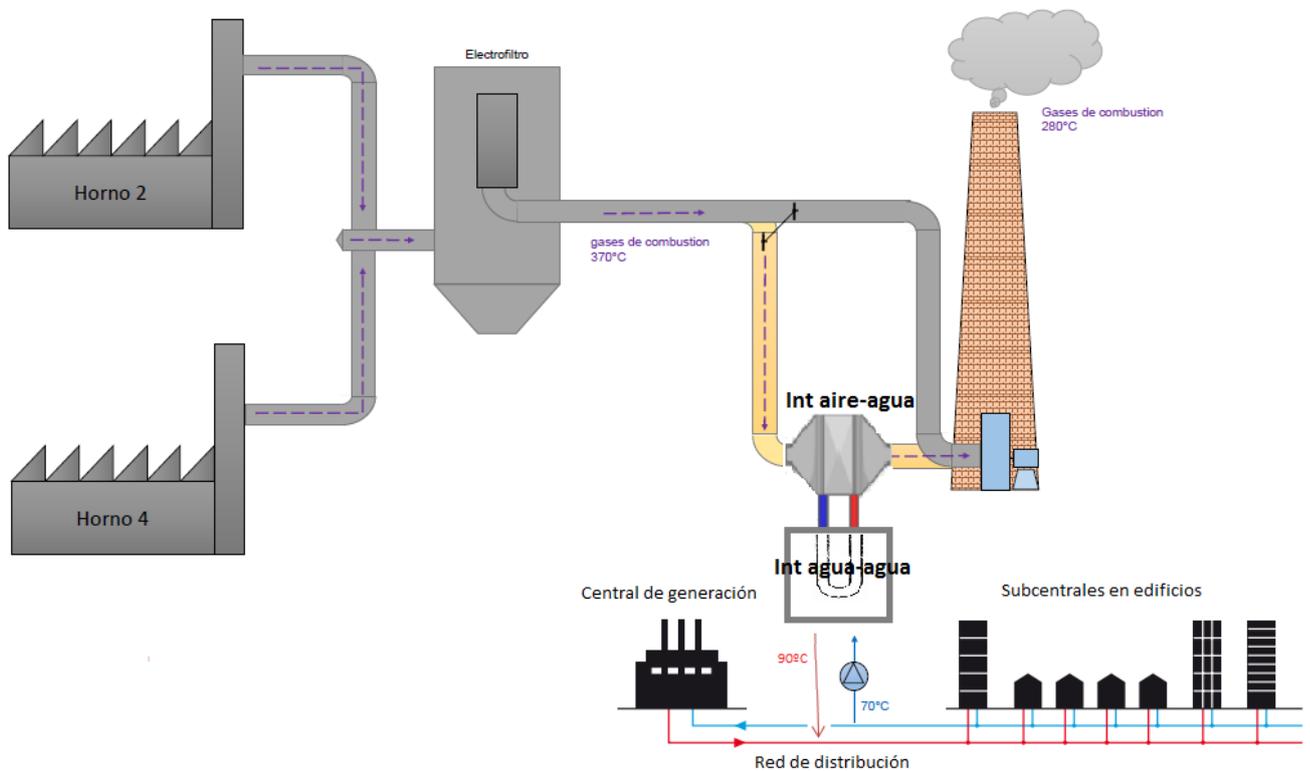


Figura 12. Esquema completo Escenario 1. Fuente: Vidrala

4.1.1. Humos de salida

Los humos salen del horno a 370°C, con un caudal de 70.000 Nm^3/h (35.000 Nm^3/h por cada horno). La densidad de estos gases es de 1,254 kg/Nm^3 y su capacidad calorífica es de 0,26 $kcal/^{\circ}Ckg$, o lo que es lo mismo, 30,57 $kJ/^{\circ}Ckmol$

La composición de los gases a la salida por la chimenea se controla de manera rigurosa, Si se superasen los límites de contaminación habría que hacer frente a multas muy elevadas y en algunos casos podría suponer el cierre de la fábrica. Se debe entregar un informe de composición cada 15 días. La composición y valor límite de los contaminantes más importantes se muestra en la Tabla 1.

	Composición en volumen	Valores límite
H2O	14%	
O2	8%	
SO3	25 ppm	182 ppm
SO2	223 ppm	250 ppm
HCl	134 ppm	200 ppm
HF	32 ppm	56 ppm
NO2	437 ppm	560 ppm
CO	35 ppm	50 ppm
Partículas	321 ppm	500 ppm

Tabla 1: Composición gases de salida

El electrofiltro elimina una gran parte de los contaminantes, pero no todos. Se debe tener especial cuidado con el azufre, que podría derivar en una lluvia ácida si no se controla la temperatura de salida de los humos.

Para que los gases no condensen se calculará el punto de rocío del agua y el punto de rocío ácido.

- Punto de rocío del agua: es la temperatura a la que empieza a formarse la primera gota de agua líquida. Si se forman gotas de agua, ésta arrastrará consigo contaminantes, por lo que debe mantenerse una temperatura superior. para un 14% en volumen de agua y una presión total de 1,013 bar (presión atmosférica), se calcula la temperatura de saturación a la presión parcial del agua:

$$T_{rocio} = T_{sat}(P = 0,14 * 1,013 = 0,14bar) = 53^{\circ}C$$

- Punto de rocío ácido: es la temperatura a la que condensa el ácido de azufre. Para su cálculo se hace uso de la Tabla 2, que muestra, según la ecuación de Zarenezhad, el punto ácido en función de del porcentaje en volumen del agua y de las partes por millón del SO_3 . La curva que correspondería sería la verde, 15% de agua, y con 25 ppm de SO_3 (datos sacados de la Tabla 1) se obtiene una temperatura ácida de 145°C.

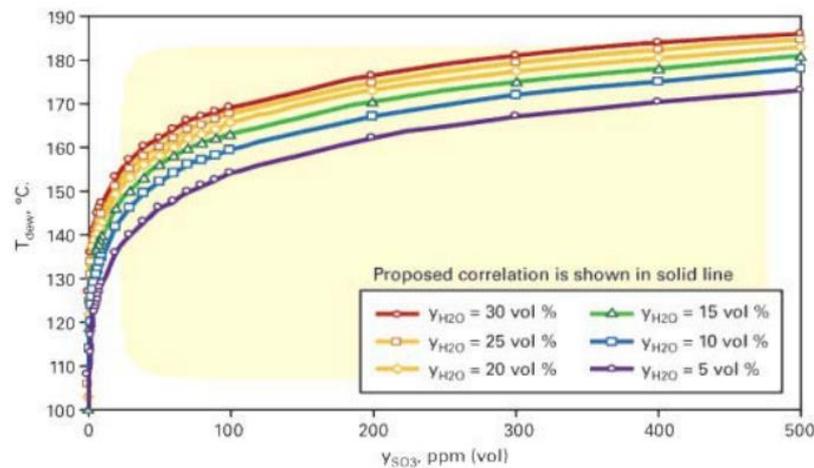


Tabla 2. Punto ácido, Ecuación de Zarezhad

Finalmente, se fija una temperatura de salida de los gases por la chimenea de 160°C , que es mayor que la temperatura de rocío (53°C) y el punto ácido (145°C).

$$T_{salida}(160^{\circ}\text{C}) > T_{ácida}(145^{\circ}\text{C}) > T_{rocío}(53^{\circ}\text{C})$$

4.1.2. Necesidades del cliente

El circuito de agua de calefacción al que se aporta calor es propiedad de la central, las condiciones dadas no pueden modificarse.

La central facilita los datos de su circuito:

- Corriente de agua fría: 65°C .
- Corriente de agua caliente: 85°C .
- Caudal de agua: 50 kg/s .

4.2. Modelo matemático

4.2.1. Diagrama

Para la resolución del circuito se darán nombres a los puntos de trabajo. El diagrama del ciclo se muestra en la Figura 13.

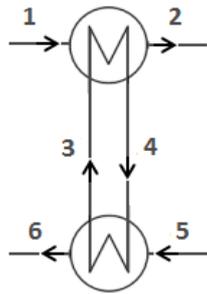


Figura 13. Diagrama del ciclo

Humos de la chimenea:

[h1]: humos de entrada calientes.

[h2]: humos de salida fríos.

Circuito intermedio de agua:

[a3]: agua fría de entrada.

[a4]: agua caliente de salida.

Circuito de calefacción:

[c5]: agua fría de entrada.

[c6]agua caliente de salida.

4.2.2. Recopilación de datos

Antes de comenzar con los cálculos, en la Tabla 3 se recopilan los datos necesarios de los humos y las necesidades del cliente explicadas anteriormente.

	Temperatura	Capacidad calorífica	Caudal
Punto 1: humos calientes	370 °C	30,57 KJ/KmolK	70.000 Nm ³ /h
Punto 2: humos fríos	160°C		
Punto 5: agua calefacción fría	65°C	75,25 KJ/KmolK	50 kg/s
Punto 6: agua calefacción caliente	85°C		

Tabla 3. Recopilación datos

Por un lado, se tiene la potencia demandada por el cliente, y por otro lado se tiene la potencia que los humos son capaces de transmitir. Utilizando la siguiente expresión se pueden calcular las potencias:

$$Pot_{humos} = Q_h * C_{ph} * \Delta T_h$$

$$Pot_{cliente} = Q_c * C_{pc} * \Delta T_c$$

Siendo,

Q_h : Caudal de los humos = 70.000 Nm³/h.

C_{ph} : Capacidad calorífica de los humos = 30,57 kJ/°Ckmol.

ΔT_h : Variación entrada y salida de los humos en el intercambiador = $T_{h1} - T_{h2} = 370 - 160$ °C.

Q_c : Caudal de agua de calefacción 50 kg/s.

C_{pc} : Capacidad calorífica del agua líquida = 75,25 kJ/°Ckmol.

ΔT_c : Variación entrada y salida del agua de calefacción = $T_{c6} - T_{c5} = 85 - 65$ °C.

Sustituyendo se obtiene:

$$Pot_{humos} = 5,57 \text{ MW}$$

$$Pot_{cliente} = 4,18 \text{ MW}$$

Como indican los cálculos, los humos son capaces de entregar más potencia que la necesaria. La potencia de los humos se controlará con el caudal, utilizando un bypass. El caudal necesario para obtener esta potencia será:

$$Q_h = \frac{Pot_{cliente}}{C_{ph} * \Delta T_c} = 52.513 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Por tanto, para obtener la potencia del cliente solamente se necesitan 52.513 Nm³/h, recirculando por el bypass el resto 17.487 Nm³/h.

El cálculo de los intercambiadores se hará con la potencia necesaria del cliente, 4,18 MW.

4.2.3. Resolución

4.2.3.1. Intercambiador aire-agua

Se va a utilizar un intercambiador de calor de flujo cruzado, con los fluidos sin mezclar. Los fluidos se cruzan perpendicularmente y no van mezclados, como se muestra en la Figura 14. Su uso es típico cuando el fluido exterior es un gas.

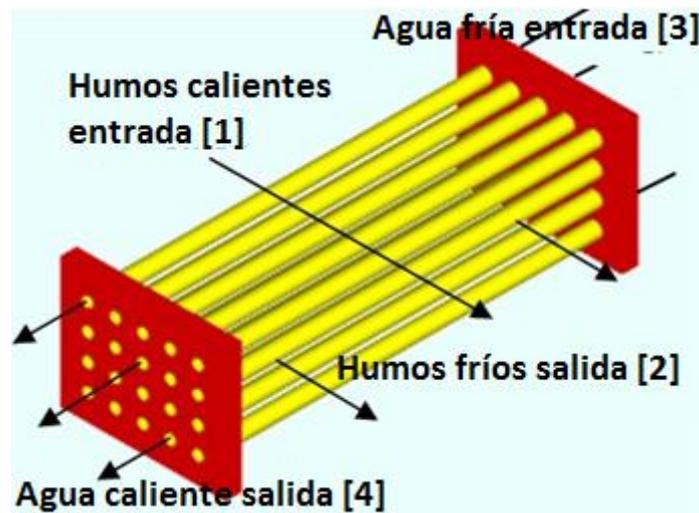


Figura 14. Intercambiador de flujo cruzado. Fuente: UNET

La potencia aportada por un caudal de humos de $52.513 \text{ Nm}^3/\text{h}$ es $4,18 \text{ MW}$, como se ha calculado anteriormente.

La potencia aportada por los humos debe ser igual a la potencia absorbida por el circuito de agua:

$$Pot = Q_h * C_{ph} * \Delta T_h = Q_a * C_{pa} * \Delta T_a = 4,18 \text{ MW}$$

Siendo,

Q_a : Caudal de agua.

C_{pa} : Capacidad calorífica del agua líquida = $75,25 \text{ kJ}/^\circ\text{Ckmol}$.

ΔT_a : Variación entrada y salida de los humos en el intercambiador = $T_{a4} - T_{a3}$.

Se va a utilizar el método $\varepsilon - NTU$ para dimensionar el intercambiador, donde se trata de calcular los números adimensionales ε y NTU . La temperatura del circuito de agua no está impuesta por

ninguna condición, por lo que se tomará una temperatura caliente de salida T_{a4} arbitraria de 90°C (líquido), y un caudal de 60 kg/s .

Para obtener la temperatura de entrada del agua T_{a3} se sustituye en la ecuación anterior:

$$Pot = 4,18 \text{ MW} = Q_a * C_{pa} * \Delta T_a = 60 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 75,25 \frac{\text{kJ}}{\text{°Ckmol}} * (90^{\circ}\text{C} - T_{a3})$$

Se obtiene una temperatura de entra del agua T_{a3} de $73,33^{\circ}\text{C}$.

- ε : es la efectividad del intercambiador, el cociente entre la potencia transmitida y la potencia máxima que se puede transmitir.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{a3}} = \frac{370 - 160}{370 - 73,33} = 0,708$$

- C_{r1} : es el coeficiente de capacidad del intercambiador 1.

$$C_{r1} = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Siendo,

$$C_{gas} = Q_g * C_{pg} = 30,57 \frac{\text{kJ}}{\text{°Ckmol}} * 52.513 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} * 1 \frac{\text{h}}{3600\text{s}} * \frac{1\text{kmol}}{22,4 \text{ Nm}^3} = 19,91 \text{ kW/K} .$$

$$C_{agua} = Q_a * C_{pa} = 75,75 \frac{\text{kJ}}{\text{°Ckmol}} * 60 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \frac{\text{kmol}}{18\text{kg}} = 250,83 \text{ kW/K} .$$

Sustituyendo,

$$C_{r1} = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{C_{gas}}{C_{agua}} = \frac{19,91}{250,83} = 0,08$$

- NUT: es el Número de Unidades de Transferencia térmica y mide la capacidad de transferencia de calor. Existe una relación entre el número NTU y ε en función del tipo de intercambiador que se use. Esta relación se puede obtener mediante ábacos o mediante ecuaciones. Para el intercambiador de calor de flujo cruzado, con los fluidos sin mezclar la relación es la siguiente:

$$\varepsilon = 1 - e^{[\left(\frac{1}{C_{r1}}\right) * (NTU^{0,22}) * [e^{-C_{r1}(NTU^{0,78})} - 1]]}$$

Iterando, se obtiene un NTU de 1,291.

- NUT se define como:

$$NUT = \frac{KS}{C_{min}}$$

Siendo,

K: Coeficiente global de transmisión del intercambiador en kWm^2/K .

S: la superficie de intercambio en m^2 .

Sustituyendo para obtener KS,

$$KS = NUT * C_{min} = 1,291 * 19,91 \frac{kW}{K} = 25,7 \frac{kW}{K}$$

Cuanto mayor sea este número, más grande será el intercambiador.

4.2.3.2. Intercambiador agua-agua

A continuación, el circuito de agua intermedio transmitirá calor al circuito de calefacción. Se va a utilizar un intercambiador de placas, típicamente utilizado para intercambios entre dos líquidos. El funcionamiento se muestra en la Figura 15.

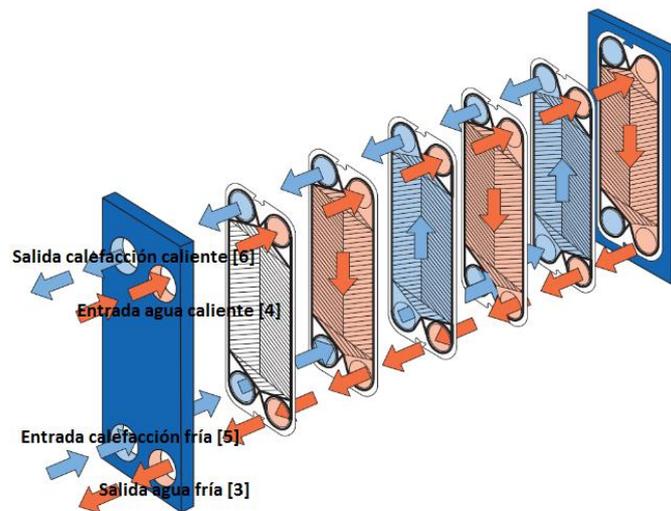


Figura 15. Intercambiador de placas. Fuente Aratt

La Tabla 4 muestra los datos necesarios de ambos flujos de agua para poder calcular el intercambiador 2. Se tendrá en cuenta el mismo método $\epsilon - NTU$.

	Temperatura °C	Capacidad calorífica KJ/KmolK	Caudal kg/s
Punto 5: agua calefacción fría	65	75,25	50
Punto 6: agua calefacción caliente	85		
Punto 3: circuito frío	73,33	75,25	60
Punto 4: circuito caliente	90		

Tabla 4. Datos cálculo intercambiador 2

- ε : efectividad del intercambiador

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{T_{a4} - T_{a3}}{T_{a4} - T_{c3}} = \frac{90 - 73,33}{90 - 65} = 0,666$$

- C_{r2} : coeficiente de capacidad del intercambiador 2.

$$C_{r1} = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Siendo,

$$C_{calefacción} = Q_c * C_{pc} = 75,75 \frac{kJ}{\circ C kmol} * 50 \frac{kg}{s} * \frac{kmol}{18kg} = 209,03 kW/K .$$

$$C_{agua} = Q_a * C_{pa} = 75,75 \frac{kJ}{\circ C kmol} * 60 \frac{kg}{s} * \frac{kmol}{18kg} = 250,83 kW/K .$$

Sustituyendo,

$$C_{r2} = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{C_{gas}}{C_{agua}} = \frac{209,03}{250,83} = 0,833$$

- NUT: Número de Unidades de Transferencia térmica. Los intercambiadores de placas se modelan igual que los intercambiadores cruzados.

$$\varepsilon = 1 - e^{[(\frac{1}{C_{r1}}) * (NTU^{0,22}) * [e^{-C_{r1}(NTU^{0,78})} - 1]]}$$

Iterando, se obtiene un NTU de 2,1185.

- NUT:

$$NUT = \frac{KS}{C_{min}}$$

Siendo,

K: Coeficiente global de transmisión del intercambiador en kWm^2/K .

S: la superficie de intercambio en m^2 .

Sustituyendo para obtener KS,

$$KS = NUT * C_{min} = 2,1185 * 209,03 \frac{kW}{K} = 442,82 \frac{kW}{K}$$

El intercambiador 1 tiene una KS $25,7 \frac{kW}{K}$, mientras que el intercambiador 2 tiene una KS $442,82 \frac{kW}{K}$. Se trata de un intercambiador mucho mayor.

4.2.4. Resultados

A continuación, se recopilan los resultados obtenidos:

En la Tabla 5 se muestran los puntos de trabajo de los fluidos durante el circuito.

	Temperatura °C	Capacidad calorífica KJ/KmolK	Caudal Nm ³ /h, kg/s
Punto 1: humos calientes	370	30,57	70.000 Usado 52.513,36
Punto 2: humos fríos	160		
Punto 5: agua calefacción fría	65	75,25	50
Punto 6: agua calefacción caliente	85		
Punto 3: circuito frio	73,33	75,25	60
Punto 4: circuito caliente	90		

Tabla 5. Puntos de trabajo

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos en el cálculo de los intercambiadores con el método $\varepsilon - NTU$.

	Pot (kW)	ε	Cp calefacción (KW/K)	Cp agua (KW/K)	Cp humos (KW/K)	Cr	NTU	UA (KW/k)
Intercambiador 1 Aire-agua	4180,56	0,71		250,83	19,91	0,08	1,291	25,70
Intercambiador 2 Agua-agua	4180,56	0,67	209,03	250,83		0,8	2,119	442,83

Tabla 6. Resultados intercambiadores

4.3. Modelo económico

Debido a la situación de la planta, en la que se han invertido 100 millones de euros para modernizarla, no interesa que este proyecto exija grandes inversiones ni periodos de retorno altos. Se trata de no añadir más riesgo a la inversión principal. Por eso, para que el proyecto sea aprobado por la administración, se debe presentar una inversión baja, de rápido retorno, que no añada complejidad al proceso.

Tras numerosas reuniones con el cliente, se han planteado distintos escenarios, con distintas potencias contratadas, distintas inversiones y distintos precios de venta. Se estudiará la viabilidad económica para la situación más favorable y más desfavorable.

- Potencia vendida: los cálculos anteriores se han realizado para una potencia de 4,18 MW. Esta es la condición de trabajo normal, sin embargo, puede que en periodos de pico se demande más calor y la potencia media anual sea de 4,8 MW. Por el contrario, en verano puede que la central no necesite potencia y la media anual vendida sea de 2 MW.
- Inversión: se va a contratar a la misma empresa que ha realizado el proyecto de recuperación de las arcas de recocido. Tras explicarles el proyecto han estimado la inversión necesaria entre 800.000 € y 1.000.000€.
- Porcentaje sobre la inversión: el cliente está dispuesto a pagar parte de la inversión si se refleja en una reducción de la tarifa. Se han planteado en invertir hasta un 40% de la inversión si la tarifa es de 40 €/MWh, si por el contrario no asumieran ninguna parte de la inversión la tarifa sería de 50 €/MWh.
- El valor actual neto del proyecto viene dado por la expresión:

$$VAN = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Flujo de Caja}_i}{(1+t)^i} - \text{Inversión}$$

Siendo,

t: tasa de descuento 10%.

i: se van a considerar 20 años.

En la Tabla 7 se recogen los distintos casos.

8760 h/año	Mínimo	Máximo
Potencia vendida (MW)	2	4,8
Inversión (€)	800.000	1.000.000
Porcentaje sobre la inversión (%)	0	40
Precio de la potencia (€/MWh)	50	40

Tabla 7. Escenarios económicos

- Sin porcentaje sobre la inversión, con precio de venta 50 €/MWh (Tabla 8):
 - o Situación más desfavorable: 2 MW vendidos y una inversión de 1.000.000€.
 - Cash flow anual: 876.000 €/año.
 - Inversión inicial: 1.000.000€.
 - Payback: 1,14 años.
 - VAN: 6.457.881 €.
 - o Situación más favorable: 4,8 MW vendidos y una inversión de 800.000€.
 - Cash flow anual: 2.102.400 €/año.
 - Inversión inicial: 800.000€.
 - Payback: 0,38 años.
 - VAN: 17.098.916 €.

	Situación 1	Situación 2
Cash flow (€/año)	876.000 €	2.102.400 €
Inversión (€)	1.000.000 €	800.000 €
Payback (años)	1,14	0,38
VAN	6.457.881€	17.098.916€

Tabla 8. Resultados económicos sin inversión

- Con una ayuda del 40% sobre la inversión, con precio de venta 40 €/MWh (Tabla 9):
 - o Situación más desfavorable: 2 MW vendidos y una inversión de 1.000.000€.
 - Cash flow anual: 700.800 €/año.
 - Inversión inicial: 600.000€.
 - Payback: 0,86 años.
 - VAN: 5.366.305 €.
 - o Situación más favorable: 4 MW vendidos y una inversión de 800.000€.
 - Cash flow anual: 876.000 €/año.
 - Inversión inicial: 480.000€.
 - Payback: 0,29 años.
 - VAN: 13.839.133 €.

	Situación 3	Situación 4
Cash flow (€/año)	700.800	1.681.920
Inversión (€)	600000	480.000
Payback (años)	0,86	0,29
VAN	5.366.305€	13.839.133€

Tabla 9. Resultados económicos con inversión

Con los resultados, se puede ver que el payback es más rápido cuando la central asume parte de la inversión, aunque el flujo de caja anual sea menor. De todos modos, en el peor de los casos el retorno

sería de 1,14 años (sin ayuda en la inversión), un tiempo bajo que se adecúa a las exigencias de la administración.

Por otra parte, el VAN más alto se obtiene con el escenario donde el flujo de caja es mayor, independientemente de la inversión. Aunque este valor no va a ser analizado por la administración a la hora de aceptar el proyecto, es interesante conocer el valor neto del proyecto.

4.4. Posibles complicaciones

Con la experiencia obtenida en la recuperación de calor de las arcas de recocido pueden conocerse de antemano posibles complicaciones que se tratarán de evitar:

- Los gases de salida siguen siendo sucios, aunque hayan pasado por el electrofiltro. Esta suciedad puede generar complicaciones en el intercambiador de calor, por lo que se deberían realizar numerosos procesos de mantenimiento y se pararía el sistema. Como no se puede evitar esta suciedad se resuelve el problema del mantenimiento: colocando dos intercambiadores en paralelo se consigue que uno esté trabajando mientras el otro esté limpiándose.
- Por motivos legales y de contaminación, es importante asegurar que los gases de salida se encuentren por encima de su punto de rocío ácido, anteriormente calculado a 145°C. La temperatura mínima de salida se controla mediante sensores que controlan el caudal automáticamente. Si la temperatura se desploma, se redirigirá más caudal por el conducto de by-pass.
- Se debe contemplar la posibilidad de que por algún motivo (incidencias, mantenimiento de máquinas, parada de la línea...) Vidrala no fuera capaz de entregar potencia durante un período de tiempo. Debe reflejarse en el contrato una cláusula donde ambas partes acuerden una solución, como por ejemplo una indemnización.

5. Escenario 2: Producción de energía eléctrica y térmica

5.1. Descripción del ciclo y datos

Aunque no es el alcance real de este proyecto, se plantea utilizar los humos de salida para generación de electricidad y de calor. Para ello se va a utilizar un ciclo Rankine, como el que se muestra en la Figura 16. En el intercambiador 1, los humos calientan el fluido de trabajo [3], este hace girar la turbina para generar trabajo eléctrico. El fluido de salida de la turbina [4] se condensa en el intercambiador 2 y calienta la red de calefacción. Se bombea el fluido la salida del intercambiador [1] y vuelve al intercambiador 1 para ser calentado de nuevo [1].

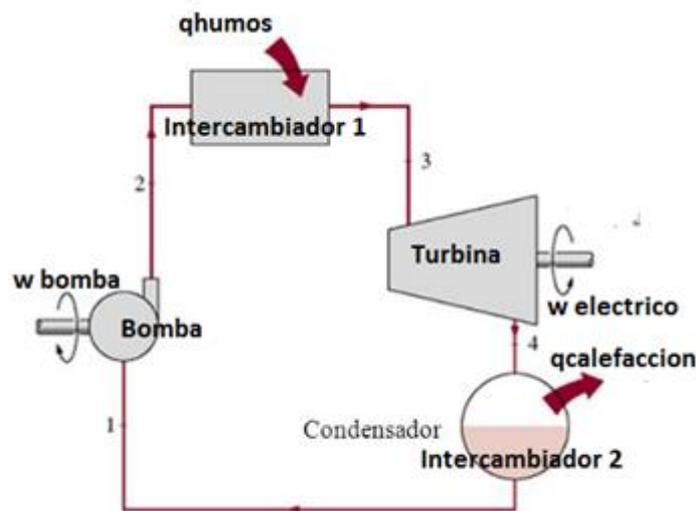


Figura 16. Ciclo Rankine. Fuente: UDP Universidad de Ingeniería Industrial

Se va a utilizar un ciclo supercrítico, por donde el fluido supera la temperatura crítica y no pasa por la campana en el diagrama T-s, como se muestra en la Figura 17. Con este proceso se consigue una temperatura del fluido muy alta, por encima de su temperatura crítica, de este modo la eficiencia de este intercambiador será mayor, ya que las temperaturas se acercan más a la de los humos. El inconveniente se encuentra en que se tendrá que trabajar a presiones mayores y la inversión de la instalación será mayor.

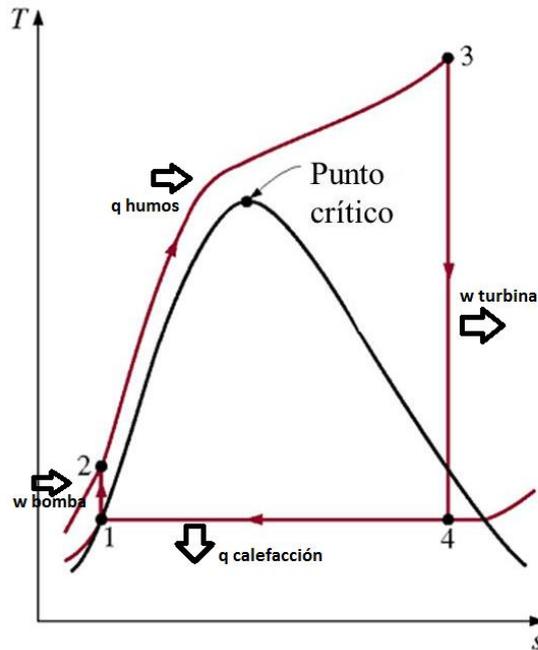


Figura 17. Ciclo Rankine supercrítico. Fuente: McGraw Hill

Se deben tener en cuenta condiciones de partida para este proceso, y se fijarán algunas propiedades:

- Por condiciones de trabajo, la presión en el condensador (intercambiador 2) debe ser superior a 1 bar, por lo que se establece la temperatura de salida del condensador (punto [1]) a 100°C, y como es líquido saturado su presión de saturación es 7,22 bar.
- La presión máxima del proceso no puede ser mayor de 40 bar por lo que se fijan los puntos [2] y [3] a 38 bar, que son los puntos de mayor presión.
- El cliente exige 700 kW eléctricos, ya que la demanda de energía eléctrica les ha crecido y no tienen capacidad para generarla.

El fluido que se va a utilizar es el isopentano, muy utilizado en este tipo de procesos para que no haya problemas de descomposición a temperaturas altas. Las propiedades de este fluido en distintas condiciones pueden obtenerse con el programa EES Property Calculator.

5.2. Modelo matemático

5.2.1. Ecuaciones

- Recuperador

Se debe cumplir que la potencia transmitida por los humos sea igual que la potencia absorbida por el isopentano a su paso por el intercambiador. Se conoce de apartados anteriores que esta potencia es 5,57 MW.

$$Pot_{humos} = Q_h * C_{ph} * \Delta T_h = Q_i * (h_3 - h_2)$$

Siendo,

Q_i : caudal de isopentano.

h_3 : entalpía del isopentano a la salida del intercambiador.

h_2 : entalpía del isopentano a la entrada del intercambiador

- Turbina

El rendimiento esentrópico de la turbina viene dado por la expresión:

$$\eta_t = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{s4}}$$

Siendo,

h_3 : entalpía del isopentano a la entrada de la turbina.

h_4 : entalpía del isopentano a la salida de la turbina.

h_{s4} : entalpía del isopentano a la salida de la turbina con rendimiento isentrópico 100%.

s_6 : entropía del isopentano a la entrada de la turbina.

Se utilizará una turbina con un rendimiento isentrópico del 85%.

Se fija un trabajo de la turbina de 700 kWe.

El trabajo que aporta la turbina es:

$$W_{turbina} = Q_i * (h_3 - h_4)$$

- Condensador

El isopentano debe entrar en el condensador en estado gaseoso y salir en forma líquida. La potencia aportada por el isopentano al caudal de calefacción será:

$$Pot_{calefacción} = Q_i * (h_4 - h_1)$$

Siendo,

h_4 : entalpía del isopentano a la entrada del condensador.

h_1 : entalpía del isopentano a salida del condensador.

- Bomba

La bomba solamente funciona para bombear líquidos, por lo que debe asegurarse que el isopentano sale en estado líquido del condensador. La eficiencia de la bomba viene dada por la expresión:

$$\eta_b = \frac{v_1 * (P_2 - P_1)}{h_2 - h_1}$$

Siendo,

v_1 : volumen específico del isopentano a la entrada de la bomba.

P_2 : presión del isopentano a la salida de la bomba.

P_1 : presión del isopentano a la entrada de la bomba.

h_2 : entalpía del isopentano a la salida de la bomba.

h_1 : entalpía del isopentano a la entrada de la bomba.

Se utilizará una bomba con un rendimiento del 75%.

En este proceso se debe aportar un trabajo a la bomba que viene dado por la expresión:

$$W_{bomba} = Q_i * (h_2 - h_1)$$

En la Tabla 10 se recogen los datos de las propiedades de los puntos del proceso que ya se conocen. Del punto 1 se conoce temperatura y presión, por lo que pueden obtenerse el resto de las propiedades. Se conocen también las presiones de todos los puntos. Los datos que aparecen con una raya son aquellos que no son necesarios para la resolución de las ecuaciones, y los huecos en interrogación son las propiedades que se obtendrán de las ecuaciones.

Puntos	T (°C)	P (bar)	s (KJ/KgK)	h (KJ/Kg)	volumen específico (m3/Kg)
1	100	7,22	-	-163,2	0,0019
2	?	38	-	?	-
3	?	38	?	?	-
4	?	7,22	-	?	-

Tabla 10. Datos de partida del isopentano

Por otro lado, en la Tabla 11 se recogen las potencias conocidas del intercambiador 1 y de la turbina, así como el rendimiento de la bomba y la turbina también conocidos.

	Potencia (KW)	Rendimiento
Intercambiador 1	5570,28	-
Turbina	700	0,85
Condensador	?	-
Bomba	?	0,75

Tabla 11. Datos de partida instrumentos

5.2.2. Resultados

Sustituyendo los datos de la Tabla 10 y la Tabla 11 en las ecuaciones, se pueden obtener las incógnitas. Los resultados se muestran en la Tabla 12 y Tabla 13.

Puntos	T (°C)	P (bar)	s (KJ/KgK)	h (KJ/Kg)	volumen específico (m3/Kg)
1	100	7,22	-	-163,2	0,0019
2	102,7	38	-	-155,402	-
3	214,6	38	-0,269	308,788	-
4	160,03	7,22	-	250,4547	-

Tabla 12. Resultado datos isopentano

	Potencia (KW)	Rendimiento
Intercambiador 1	5570,28472	-
Turbina	700	0,85
Condensador	4963,85592	-
Bomba		0,75

Caudal isopentano 12 kg/s

Tabla 13. Resultados instrumentos

Comparándolo con el caso anterior, donde solamente se vendía energía térmica, se tienen 4,94 MW térmicos para entregar al cliente. Los humos son capaces de entregar 5,57 MW, de los cuales el cliente solamente quiere 4,18 MW (calculado en el Escenario 1), desaprovechando el resto. Por tanto, en este escenario, se obtienen 4,94 MW térmicos, que pueden abastecer la demanda térmica.

El diagrama T-s se muestra en la Figura 18, con los puntos del proceso sobre el diagrama.

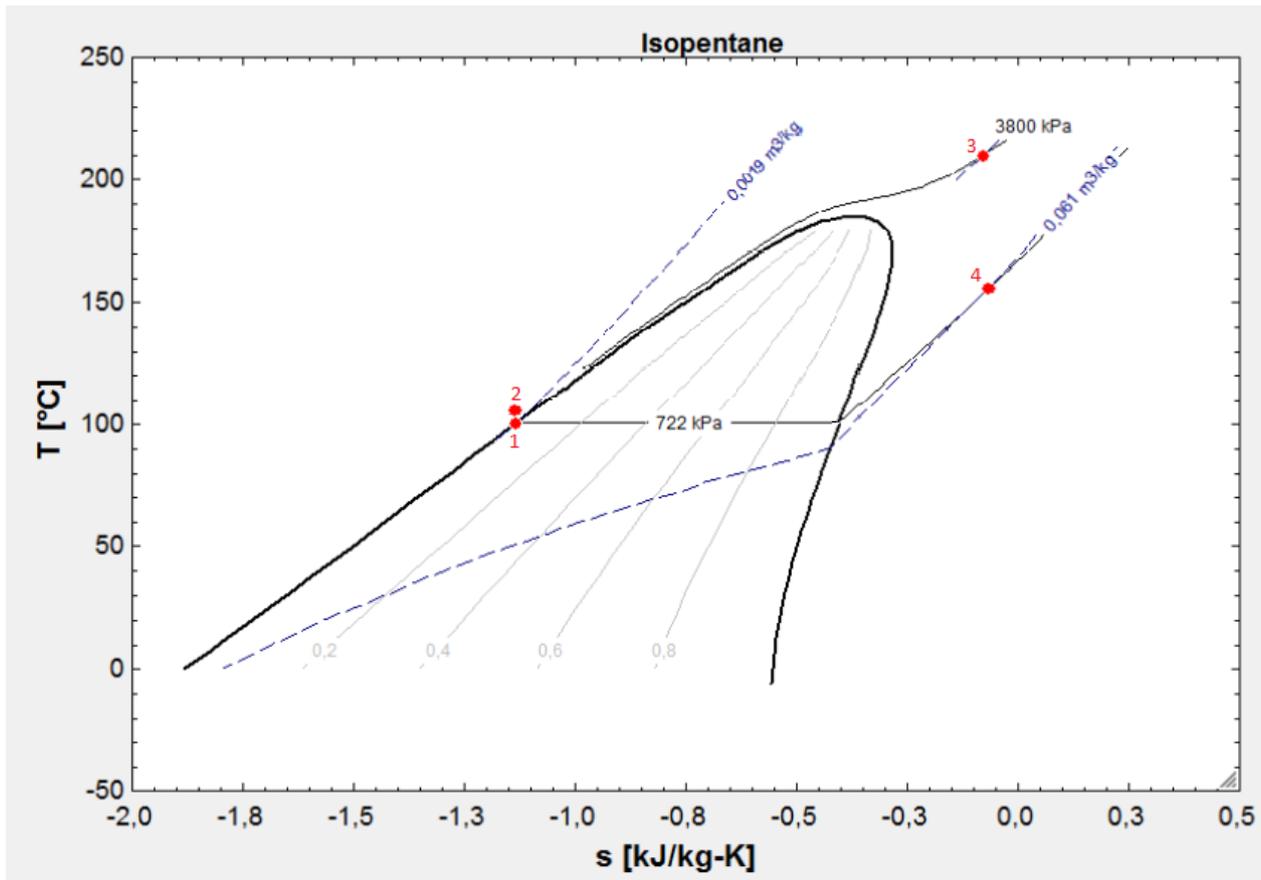


Figura 18. Ciclo Rankine isopentano resultado

5.3. Cálculo de los intercambiadores

5.3.1. Recuperador

En el recuperador, los humos intercambian calor con el isopentano del circuito (entre los puntos 2 y 3). Como ya se ha hecho en el escenario anterior se va a utilizar el método $\varepsilon - NTU$.

La Tabla 14 muestra los datos necesarios de ambos flujos: humos y el isopentano para poder calcular el intercambiador, y la potencia intercambiada es de 5,57 MW

	Temperatura °C	Capacidad calorífica KJ/KmolK	Caudal Nm ³ /h, kg/s	h (KJ/Kg)
Punto a: Humos calientes	370	30,57	70.000	
Punto b: Humos fríos	160			
Punto 2: Isopentano frío	102,7	30,57	12	-155,40
Punto 3: Isopentano caliente	214,6			308,78

Tabla 14. Datos de partida recuperador

- ε : efectividad del recuperador.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{T_a - T_b}{T_a - T_2} = \frac{370 - 160}{370 - 102,7} = 0,79$$

Siendo,

T_a : temperatura de humos calientes 370°C.

T_b : temperatura de humos fríos 160°C.

T_2 : temperatura del isopentano frío 102,7°C.

- C_r : coeficiente de capacidad del recuperador.

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Siendo,

$$C_{isopentano} = \frac{Pot_r}{\Delta T_{3-2}} = \frac{5570 \text{ kW}}{214,6 - 102,7 \text{ °C}} = 49,78 \text{ kW/K} .$$

$$C_{humos} = \frac{Pot_r}{\Delta T_{a-b}} = \frac{5570 \text{ kW}}{370-160 \text{ °C}} = 26,63 \text{ kW/K} .$$

Sustituyendo,

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{C_{humos}}{C_{isopentano}} = \frac{26,63}{49,78} = 0,53$$

- NUT: Número de Unidades de Transferencia térmica. Se va a utilizar un intercambiador de flujo cruzado, como en el Escenario 1. La relación entre la efectividad y NUT viene dada por la expresión:

$$\varepsilon = 1 - e^{[(\frac{1}{C_r}) * (NTU^{0,22}) * [e^{-C_r * (NTU^{0,78})} - 1]]}$$

Iterando, se obtiene un NTU de 2,54304.

- NUT:

$$NUT = \frac{KS}{C_{min}}$$

Sustituyendo para obtener KS,

$$KS = NUT * C_{min} = 2,54304 * 26,53 \frac{\text{kW}}{\text{K}} = 67,45 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$$

El recuperador tiene una KS $67,45 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$, mientras que en el Escenario 1, este mismo intercambiador tiene una KS $25,7 \frac{\text{kW}}{\text{K}}$. En el escenario 1 se tenía un intercambiador menor.

5.3.2. Condensador

De la misma forma que en el escenario 1, se utilizará un intercambiador de placas para un intercambio isopentano-agua. Este intercambiador estará conectado a una red intermedia de agua, que posteriormente intercambiará el calor con la red de calefacción. Como en el escenario 1, se fija el circuito de agua a 90°C la temperatura de salida y con un caudal de 60 kg/s. Los datos de partida se muestran en la Tabla 15.

	Temperatura °C	Capacidad calorífica KJ/KmolK	Caudal kg/s	h (KJ/Kg)
Punto c: Agua fría		75,25	60	
Punto d: Agua caliente	90			
Punto 4: Isopentano caliente	160,03			250,45
Punto 1: Isopentano frío	100			-163,2

Tabla 15. Datos de partida condensador

La potencia que demanda el cliente, como ya se ha calculado, es de 4,18 MW. El proceso es capaz de entregar 4,96 MW por lo que parte del calor transmitido por el isopentano no se necesitará. Para que se entregue dicha potencia, el caudal necesario de isopentano que se va a necesitar será:

$$Pot_{condensador} = Q'_i * (h_4 - h_1)$$

Siendo,

$$Pot_{condensador}: 4,18 \text{ MW.}$$

Q'_i : el caudal necesario de isopentano, que sustituyendo se obtiene 10,1 kg/s de isopentano.

Se debe cumplir que la potencia entregada por el isopentano debe ser igual a la absorbida por el agua, por lo que para calcular la temperatura fría del agua se debe cumplir que:

$$Pot_{condensador} = Q'_i * (h_4 - h_1) = Q_a * C_{pa}(T_d - T_c)$$

Sustituyendo, se obtiene una temperatura fría del agua de 73,33°C.

- ε : efectividad del recuperador.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{T_4 - T_1}{T_4 - T_c} = \frac{160,03 - 100}{160,03 - 73,33} = 0,692$$

- C_r : coeficiente de capacidad del recuperador.

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Siendo,

$$C_{isopentano} = \frac{Pot}{\Delta T_{4-1}} = \frac{4180 \text{ kW}}{160,03 - 100 \text{ °C}} = 69,64 \text{ kW/K .}$$

$$C_{agua} = \frac{Pot}{\Delta T_{d-c}} = \frac{4180 \text{ kW}}{90 - 73,33 \text{ °C}} = 250,83 \text{ kW/K .}$$

Sustituyendo,

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{C_{isopentano}}{C_{agua}} = \frac{69,64}{250,83} = 0,278$$

- NUT: Número de Unidades de Transferencia térmica. Se va a utilizar un intercambiador de placas cruzado, como en el Escenario 1. La relación entre la efectividad y NUT viene dada por la expresión:

$$\varepsilon = 1 - e^{[(\frac{1}{C_r}) * (NTU^{0,22}) * [e^{-C_r * (NTU^{0,78})} - 1]]}$$

Iterando, se obtiene un NTU de 1,4054.

- NUT:

$$NUT = \frac{KS}{C_{min}}$$

$$KS = NUT * C_{min} = 2,54304 * 26,53 \frac{kW}{K} = 97,87 \frac{kW}{K}$$

El recuperador tiene una KS $97,87 \frac{kW}{K}$.

5.3.3. Resultados

Finalmente se debe calcular el intercambiador agua-agua a la calefacción central. Sin embargo, los datos son exactamente iguales que en el escenario 1: potencia, temperaturas, caudales... Por lo que no se repite el cálculo.

Finalmente, en la Tabla 17 se resumen los resultados de los puntos de trabajo del circuito, y en la Tabla 16 se recopilan los resultados obtenidos en los intercambiadores.

	Pot (kW)	ε	Cp agua (KW/K)	Cp calefacción (KW/K)	Cp isopentano (KW/K)	Cp humos (KW/K)	Cr	NTU	UA (KW/k)
Recuperador	5570,28	0,79			49,78	26,53	0,53	2,54304	67,45
Condensador	4180,56	0,69	250,83		69,64		0,277	1,4054	97,87
Intercambiador agua-agua	4180,56	0,67	250,83	209,03			0,83	2,12	442,83

Tabla 16. Resultados instrumentos Escenario 2

	Temperatura °C	Capacidad calorífica KJ/KmolK	Caudal Nm ³ /h, kg/s	h (KJ/Kg)
Punto a: Humos calientes	370	30,57	70.000	
Punto b: Humos fríos	160			
Punto 2: Isopentano frío	102,7		12	-155,40
Punto 3: Isopentano caliente	214,6			308,78
Punto c: Agua fría	73,33	75,25	60	
Punto d: Agua caliente	90			
Punto 4: Isopentano caliente	160,03		10,10	250,45
Punto 1: Isopentano frío	100			-163,2

Tabla 17. Datos puntos Escenario 2

5.4. Modelo económico

Antes de estudiar los resultados, hay que tener en cuenta que la inversión es muy alta, por lo que el payback aumentará. Por este motivo, la administración no está interesada en hacer este tipo de inversiones.

Se han planteado dos escenarios, con distintas inversiones y distintos precios de venta. Estos dos escenarios se combinarán con los anteriores.

- Potencia vendida: siempre será 700 kWe.
- Inversión: debido al alto coste de la turbina y el generador, la inversión será de 3.000.000 €.
- Porcentaje sobre la inversión: como en el escenario anterior, el cliente está dispuesto a pagar hasta un 40% de la inversión si la tarifa es de 0,05 €/kWh, si por el contrario no asumieran ninguna parte de la inversión la tarifa sería de 0,07 €/MWh.

Los distintos casos se muestran en la Tabla 18.

8760 h/año	Mínimo	Máximo
Potencia vendida (kWe)	700	700
Inversión (€)	3.000.000	3.000.000
Porcentaje sobre la inversión (%)	0	40
Precio de la potencia (€/kWh)	0,07	0,05

Tabla 18. Escenarios económicos Escenario 2

- Sin porcentaje sobre la inversión, con precio de venta 0,07 €/MWh (Tabla 8):
 - Cash flow anual: 429.240 €/año.
 - Inversión: de 3.000.000€.
 - Payback: 7 años.
 - VAN: 654.362 €.

- Con un 40% sobre la inversión, con precio de venta 0,05 €/MWh (Tabla 8):
 - Cash flow anual: 306.600 €/año.
 - Inversión: 3.000.000€.
 - Payback: 5,87 años.
 - VAN: 810.258 €.

Si se estudiara la venta de energía eléctrica de forma independiente, se obtendrían períodos de retorno mucho mayores, entre 6 y 7 años, y el VAN sería mucho menor. De antemano, se puede decir que si

se combina con la explotación térmica del escenario 1, va a influir negativamente al payback y no va a suponer un gran cambio en el VAN.

- El caso donde se tenía un payback mayor (1,14 años) era cuando no había porcentaje sobre la inversión, con precio de venta 50 €/MWh (Tabla 8). Si se combina con la venta de energía eléctrica con peor payback se obtiene (Tabla 19):

	Térmico	Eléctrico	Combinación
Cash flow (€/año)	876.000 €	429.240 €	1.305.240 €
Inversión (€)	1.000.000 €	3.000.000 €	4.000.000€
Payback (años)	1,14	6,99	3,06
VAN	6.457.881€	654.362€	7.112.243€

Tabla 19. Combinación peor payback

Al introducir la venta de energía eléctrica el payback empeora de 1,14 a 3 años y el VAN mejora levemente. Esto quiere decir que en el peor de los casos el payback será de 3 años y no se aceptaría.

- El caso donde se tendría un payback menor (0,28 años) era con una ayuda del 40% sobre la inversión, con precio de venta 40 €/MWh (Tabla 9). Si se combina con la venta de energía con mejor payback se obtiene (Tabla 20):

	Térmico	Eléctrico	Combinación
Cash flow (€/año)	1.681.920 €	306.600 €	1.988.520 €
Inversión (€)	480.000 €	1.800.000 €	2.280.000 €
Payback (años)	0,29	5,87	1,15
VAN	13.839.133€	810.258€	14.649.391€

Tabla 20. Combinación mejor payback

En el mejor de los casos se obtendría un payback de 1,14 años, donde la administración podría aceptar el proyecto. Sin embargo, la inversión es muy alta, de 2,28 millones de euros, y probablemente no estén dispuestos a asumir esa cantidad.

6. Recopilación de datos y Conclusiones

6.1. Escenario 1

Los humos que salen por la chimenea (puntos 1 y 2) calientan un circuito de agua intermedio (puntos 3 y 4) que finalmente calientan la red de calefacción (puntos 5 y 6). El circuito se muestra en la Figura 19.

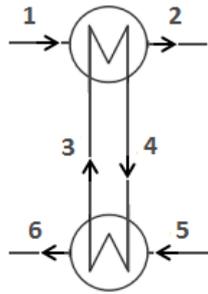


Figura 19. Ciclo escenario 1

Después de aplicar las ecuaciones y condiciones de los apartados anteriores, las características de temperatura y caudal de cada punto se muestran en la Tabla 21.

	Temperatura °C	Capacidad calorífica KJ/KmolK	Caudal Nm ³ /h, kg/s
Punto 1: humos calientes	370	30,57	70.000
Punto 2: humos fríos	160		52513,36
Punto 5: agua calefacción fría	65	75,25	50
Punto 6: agua calefacción caliente	85		
Punto 3: circuito frío	73,33	75,25	60
Punto 4: circuito caliente	90		

Tabla 21. Resultado puntos escenario 1

Como bien se ha dicho, los humos son capaces de entregar 5,57 MW, mientras que el cliente solamente contrata 4,18 MW. Esto se controla haciendo pasar los humos por un bypass. Sin embargo, en momentos de pico de demanda Vidrala será capaz de proporcionar una potencia extra de 1,39 MW. Además, esta potencia extra puede ser útil en un futuro cuando la central crezca.

Las características de los dos intercambiadores utilizados son los que se muestran en la Tabla 22. La eficiencia del primer intercambiador es mayor debido a que el salto de temperatura ente los humos y el circuito intermedio es menor que el salto de temperatura entre el circuito intermedio y la red de calefacción. Además, el intercambiador agua-agua será de mayor tamaño porque su NTU es mayor y el agua de calefacción tiene mayor C_p 209,03 kW/K, obteniéndose mayor UA.

La eficiencia del primer intercambiador podría mejorarse si se aumentara la temperatura de trabajo del circuito intermedio de agua. Sin embargo, si se superan los 90°C podría haber riesgo de que el agua entrara en ebullición.

	Pot (kW)	ϵ	Cp calefacción (KW/K)	Cp agua (KW/K)	Cp humos (KW/K)	NTU	UA (KW/k)
Intercambiador 1	4180,56	0,71		250,83	19,91	1,2911	25,70
Intercambiador 2	4180,56	0,67	209,03	250,83		2,1185	442,83

Tabla 22. Resultados intercambiadores escenario 1

Finalmente, para que el proyecto sea aceptado, el payback y la inversión deben ser bajos. Después de combinar los posibles precios de venta e inversión, se obtiene para el peor de los casos 1,14 años de payback y una inversión de un millón de euros. A priori, puede decirse que el proyecto seguirá adelante porque se trata de valores razonables para la dirección.

6.2. Escenario 2

Se vende energía térmica y eléctrica a partir de un ciclo Rankine simple y supercrítico con fluido de trabajo isopentano que se muestra en la Figura 19. En la Tabla 24 se muestran las condiciones de los puntos del ciclo y en la Figura 21 se muestra el diagrama T-s de dichos puntos.

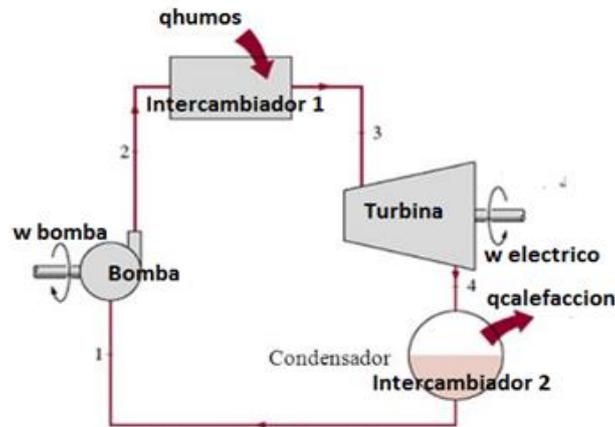


Figura 20. Ciclo Rankine escenario 2

Puntos	T (°C)	P (bar)	s (KJ/KgK)	h (KJ/Kg)	volumen especifico (m3/Kg)
1	100	7,22	-	-163,2	0,0019
2	102,7	38	-	-155,402	-
3	214,6	38	-0,269	308,788	-
4	160,03	7,22	-	250,4547	-

Tabla 23. Resultados puntos Rankine escenario 2

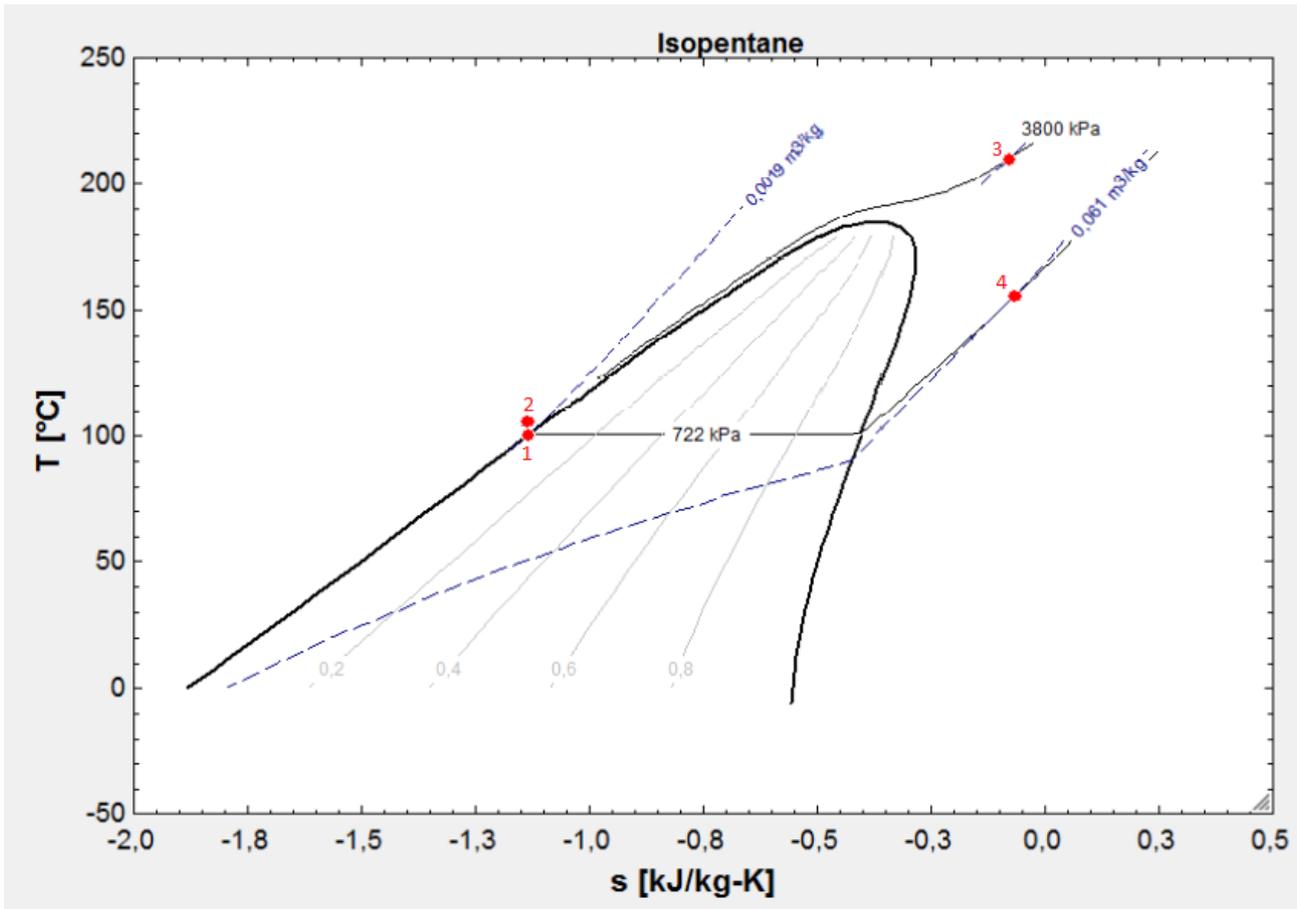


Figura 21. Diagrama T-s escenario 2

La potencia eléctrica que se entrega es 700 kW y la potencia térmica en el condensador es 4,96 MW, mayor que la demandada. Siguiendo la metodología del escenario anterior para los intercambiadores, se obtiene un recuperador de humos con una eficiencia del 79%. Su eficiencia es alta porque se ha podido utilizar un fluido de trabajo a temperaturas altas, por lo que el salto térmico es menor. En este caso, el recuperador será de mayor tamaño que el recuperador del escenario 1 porque se utiliza todo el caudal de humos.

	Pot (kW)	ϵ	Cp agua (KW/K)	Cp isopentano (KW/K)	Cp humos (KW/K)	NTU	UA (KW/k)
Recuperador	5570,28	0,79		49,78	26,53	2,54	67,45
Condensador	4180,56	0,69	250,83	69,64		1,41	97,87
Intercambiador	4180,56	0,67	250,83			2,12	442,83

Tabla 24. Resultados intercambiadores escenario 2

7. Bibliografía

- [1] Federación Española de Municipios y Provincias: “*Climatización urbana en las ciudades españolas*”. <http://www.redciudadesclima.es>.
- [2] Giuseppe Scalvi (2014): “*Teleriscaldamento a Brescia*”. <http://teleriscaldamento.brescia.it>.
- [3] ADHAC (2011): “*La respuesta sostenible a la creciente demanda europea de refrigeración*”.
- [4] Universidad Pública del País Vasco (2014): “*Intercambiadores de calor*”.
- [5] Brazilian Journal of Chemical Engineering Vol. 24, No 04, pp. 509 (2007).
- [6] Renewable Energy (2014). www.wlsevier.com/locate/renene.
- [7] Renovis (2016): “*Vetreteria Vidrala - Audit termico*”.
- [8] Vidrala Italia (2018): “*Gas test report*”.
- [9] Apuntes Ingeniería Energética MII - ICAI (2016): “*Tema 2. Combustión*”.
- [10] S.A. Klein (2016): “*EES Engineering Equation Solver*”.