

Autorizada la entrega del proyecto del alumno:

Diego Aranda Pérez

LOS DIRECTORES DEL PROYECTO

José Ignacio Linares Hurtado

Beatriz Yolanda Moratilla Soria

Fdo.:

Fecha:

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

José Ignacio Linares Hurtado

Fdo.:

Fecha:

# APROVECHAMIENTO DE CALORES RESIDUALES EN UNA CEMENTERA MEDIANTE CICLOS DE RANKINE ORGÁNICOS

**Autor: Aranda Pérez, Diego**

Directores: Linares Hurtado, José Ignacio  
Moratilla Soria, Beatriz Yolanda

Entidad Colaboradora: Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

## RESUMEN DEL PROYECTO

### 1. Introducción

En la industria cementera existe un elevado potencial para la generación eléctrica a partir de los calores residuales del proceso. Ese calor residual se puede convertir en energía eléctrica que cubra parcialmente la demanda a través de un ciclo de Rankine orgánico (ORC), constituyendo así una planta de cogeneración en ciclo de cola.

Los ciclos de Rankine orgánicos (ORC) son una tecnología conocida desde hace años para aplicaciones en las que se precisa transformar en energía eléctrica calor de media y baja temperatura (por debajo de 300°C). El uso como ciclos de cola para procesos industriales resulta especialmente atractivo.

Desde un punto de vista tecnológico los ciclos ORC presentan características específicas y diferenciadas respecto al ciclo de Rankine convencional que conducen a equipos mucho más compactos que los empleados en el ciclo con agua, permitiendo suprimir algunos elementos, como el desgasificador.

En este trabajo se analiza la viabilidad técnica de un ciclo ORC para una cementera de vía seca y horno de satélites. Para ello se explora tanto el fluido más adecuado como la configuración de ciclo que maximiza la energía eléctrica producida. El estudio de viabilidad técnica se completa con el análisis de la planta fuera del punto de diseño estudiando sus prestaciones según el excedente de calor del proceso de producción de cemento, así como las variaciones del foco frío a lo largo de un año tipo en Toledo.

El trabajo culmina analizando la viabilidad económica del proyecto.

## 2. Metodología

### 2.1. Ubicación de la planta

El estudio se ha desarrollado para una hipotética planta de tamaño medio situada en Toledo, dado que en dicha provincia proliferan las fábricas de cemento. A partir de la ubicación se determina un año climatológico tipo mediante el paquete METEONORM que permite obtener, entre otras variables, la temperatura seca ambiente hora por hora. La frecuencia de la misma a lo largo del año tipo, considerando las 24 horas del día pero excluyendo el mes de agosto, aparece representada en la Fig. 1, de donde se toma como temperatura de diseño 9°C.

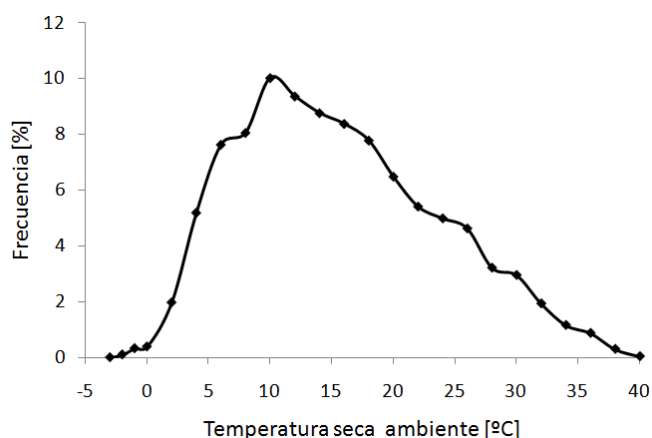


Figura 1: Frecuencia de la temperatura seca ambiente en un año tipo en Toledo.

### 2.2. Balance energético del proceso

El consumo medio de electricidad en la fabricación del clinker viene establecido en 50,6 kWh/ton. De ellos aproximadamente el 25% (12,5 kWh/ton) se produce durante la molienda de crudo, el 35% (17,5 kWh/ton) en la molienda del cemento y el 40% restante (20 kWh/ton) en actividades diversas. Puede estimarse que en un día tipo se dedican 12 horas a la molienda de crudo, 8 horas a la de cemento y durante las 4 horas restantes no hay consumo eléctrico para los molinos.

En cuanto a los calores excedentarios del proceso se establecen en 1.260 kJ/kg de clinker (medidos respecto a 20°C). Esa potencia térmica está disponible a 360°C y en la realidad puede ser enfriada hasta 130°C para evitar problemas de condensaciones ácidas. Dicho calor excedentario se obtiene de los gases del horno de clinker una vez han salido de los

ciclones. Cuando los molinos de crudo están operando el 20% de dichos gases se conduce a ellos para operaciones de sacado.

La operación de la fábrica se establece 24 horas al día durante todos los meses del año salvo agosto. La Tabla 1 recoge las cifras absolutas de los excedentes térmicos del proceso (entre 360°C y 130°C) y las demandas eléctricas para una producción de clinker de 550.000 ton/año. Como se aprecia, se ha supuesto que el mayor consumo eléctrico, correspondiente a la molienda de cemento, se realiza por la noche para aprovechar la tarifa nocturna mientras que la demanda valle (ningún molino en funcionamiento) se realiza en horario punta del mercado eléctrico. Finalmente, el consumo medio, correspondiente a la molienda de crudo, se realiza en horario mixto, entre las 12.00 y las 24.00 horas.

Tabla 1: Distribución horaria supuesta de la demanda eléctrica y el excedente térmico.

Horario	0.00 a 8.00	8.00 a 12.00	12.00 a 24.00
Demanda eléctrica [kW]	4.940	1.235	3.088
Excedente térmico [kW]	16.245	16.245	12.996

### 2.3. Viabilidad económica

Los ciclos de cola aparecen recogidos en el RD 661/2007 del Régimen Especial como cogeneraciones dentro del grupo a.2 que contempla “*Instalaciones que incluyan una central que utilice energías residuales procedentes de cualquier instalación, máquina o proceso industrial cuya finalidad no sea la producción de energía eléctrica y/o mecánica.*” Las tarifas son reducidas debido a que en este caso no existen gastos de combustible. Por esta razón la actualización de la tarifa eléctrica se efectúa anualmente con arreglo al IPC. Esto hace que resulte más atractiva la operación en modo de autoconsumo eléctrico que la evacuación a red, siempre que las demandas eléctricas del proceso lo permitan. En el caso analizado mayoritariamente se va a trabajar en régimen de autoconsumo, aunque como se verá más adelante durante el periodo de demanda mínima (8.00 a 12.00) la energía producida por el ORC excede a la demandada por la planta, siendo preciso entonces evacuar a red. Por tanto, se seguirá un esquema mixto, autoconsumiendo toda la energía eléctrica posible y evacuando a red la excedentaria.

La tarifa eléctrica de la energía evacuada a red para el año 2011 es de 50,168 €/MWh (Orden ITC/3355/2010). El precio de compra de la electricidad por la planta no está regulado, estableciendo los grandes consumidores acuerdos con las compañías suministradoras. En el segundo semestre de 2008 el precio industrial medio fue de 107 €/MWh por lo que de forma conservadora se asume un precio de compra de 60 €/MWh.

#### **2.4. ORC en punto nominal**

Dado que la temperatura de la fuente térmica es relativamente alta se opta por emplear un ciclo regenerativo para aprovechar la elevada temperatura a la salida de la turbina. Como además el gradiente de la fuente térmica (360°C a 130°C) es elevado se opta por un ciclo supercrítico escogiéndose la presión en la impulsión de la bomba por motivos prácticos en la selección de los intercambiadores de 38,5 bar. Como fluido se busca un hidrocarburo natural para evitar problemas de descomposición a alta temperatura, pudiendo así prescindir del aceite térmico como fluido intermedio en el recuperador. Se selecciona el isopentano por ser un fluido seco (pendiente positiva de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s) y condensar a presión superior a la atmosférica a las temperaturas de condensación esperables.

Los intercambiadores se han modelado a partir del método  $\epsilon$ -NTU como de flujos cruzados con un acercamiento mínimo de 10 K lo que conduce a unos tamaños relativos (NTUs) de 0,88 en el condensador, 12 en el recuperador y 31 en el regenerador. Se han incluido pérdidas de carga de 20 kPa en las tuberías de alta presión y 3 kPa en las de baja; 16 kPa en el lado de alta presión de los intercambiadores y 7 kPa en el lado de baja.

La turbina y la bomba se han modelado a partir del rendimiento isentrópico, tomando 85% para la turbina y 75% para la bomba. Los gases de combustión se han modelado como gases perfectos con 1,1 kJ/kg-K y un flujo másico máximo de 65 kg/s, correspondiente a los períodos en los que no operan los molinos de crudo. En operación de éstos el flujo de gases se reduce a 52 kg/s.

Con objeto de no demandar agua para el ciclo se ha empleado un aerocondensador con un salto térmico en el lado del aire de 14°C. El modelo ha sido implantado en EES de donde se han extraído también las propiedades del isopentano.

#### **2.5. ORC fuera del punto nominal**

El ciclo ha de funcionar fuera del punto de diseño tanto por variaciones del foco caliente como del foco frío. En el foco caliente el caudal de gases varía entre el de diseño (100%)

en ausencia de operación del molino de crudo y uno un 20% menor cuando dicho molino opera. En cuanto al foco frío, la variación de la temperatura ambiente hora por hora hace que la temperatura de condensación se vea modificada.

### **3. Resultados**

#### **3.1. Punto nominal**

El punto nominal se ha diseñado para el 100% de gases (65 kg/s) y una temperatura de entrada del aire al condensador de 9°C, obteniéndose una potencia eléctrica neta de 4MW con una eficiencia del ciclo de 26,67%. El caudal de aire requerido es de 783 kg/s.

#### **3.2. Operación anual**

La energía eléctrica producida por el ORC durante un año de trabajo asciende a 28.163 MWh, de los que 24.328 MWh se han autoconsumido y 3.835 MWh se han evacuado a red.

#### **3.3. Viabilidad económica**

Con las hipótesis económicas fijadas se obtiene una tasa interna de rentabilidad (TIR) superior al 29%, un período de retorno inferior a 7 años (35% de la vida del proyecto) y un valor actual neto de (VAN) de 7,4 M€

La estimación de la inversión está sujeta a cierta incertidumbre. Para valorar la sensibilidad de la viabilidad económica se ha calculado la inversión que podría soportar el proyecto para tener un retorno en el 75% de la vida del mismo, resultando de 2.150 €/kW (el doble de la estimada).

En cuanto a la estructura de ingresos se aprecia que los debidos a la energía reemplazada (autoconsumo) suponen más del 88% del total.

# USE OF RESIDUAL HEAT IN THE CEMENT INDUSTRY BY ORGANIC RANKINE CYCLES

**Author: Aranda Pérez, Diego**

Directors: Linares Hurtado, José Ignacio  
Moratilla Soria, Beatriz Yolanda

Collaborating Organization: Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías  
Energéticas

## **PROJECT SUMMARY**

### **1. Introduction**

In the cement industry there is a large potential for electricity generation from residual heat of the process. This waste heat can be converted into electrical energy that partially cover the demand through an organic Rankine cycle (ORC), providing a cycle cogeneration plant in queue.

The organic Rankine cycle (ORC) is a technology known for years for applications is needed to transform heat into electric power medium and low temperature (below 300° C). The cycles used as glue for industrial processes is particularly attractive. From a technological standpoint ORC cycles specific and different characteristics compared to conventional Rankine cycle leading to much more compact equipment that employees in the water cycle, allowing to delete some items, such as the degasser.

This paper analyzes the technical feasibility of an ORC cycle for cement kiln dry and satellites. For this purpose, explores both the fluid best suited as the cycle configuration that maximizes power output. The feasibility study is completed with the analysis of the plant out of studying their design point performance as the excess heat of cement production process, as well as variations of the cold during a typical year in Toledo. The paper concludes by analyzing the economic viability of the project.

## 2. Methodology

### 2.1. Plant Location

The study has been developed for a hypothetical medium-sized plant in Toledo, in the province since cement plants proliferate. From the location of one year is determined by weather type METEONORM package that allows for, among other variables, the ambient dry bulb temperature hour by hour. The frequency of the same throughout the typical year, taking 24 hours a day, but excluding the month of August, is depicted in Figure 1, where it is taken as design temperature 9 ° C.

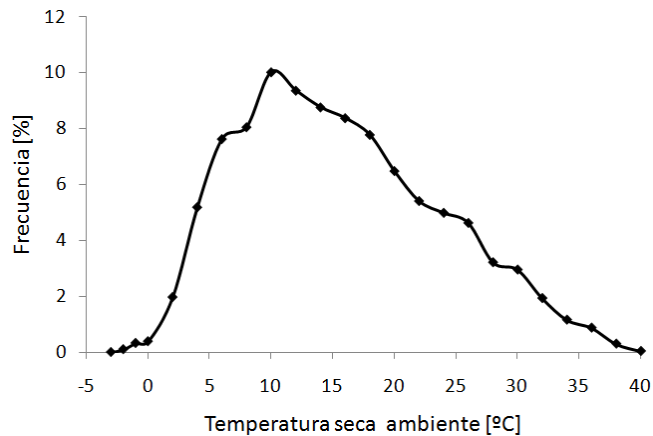


Figure 1: Frequency of dry ambient temperature in a typical year in Toledo.

### 2.2. Process energy balance

The average electricity consumption in the production of clinker is set at 50.6 kWh / ton. Of these approximately 25% (12.5 kWh / ton) is produced during the milling of oil, 35% (17.5 kWh / ton) in the grinding of cement and 40% (20 kWh / ton) in various activities. Can be estimated that a typical day 12 hours devoted to grinding oil, 8 hours of cement and for the remaining 4 hours no electricity consumption for the mills.

As for the surplus heat of the process down by 1,260 kJ / kg of clinker (measured from 20 ° C). This thermal power is available to 360 ° C and in reality can be cooled to 130 ° C to prevent condensation problems acidic. This excess heat is obtained from clinker kiln gases after they have left of cyclones. When the oil mills are operating on 20% of

these gases is driven out of them for operations. The operation of the factory set 24 hours a day for every month of the year except August. Table 1 shows the absolute numbers of excess heat in the process (between 360 ° C and 130 ° C) and the electrical requirements for clinker production of 550,000 ton / year. As shown, it is assumed that the largest electricity consumption for cement grinding is done at night to take advantage of the nightly rate as demand valley (no mill in operation) is performed in peak time electricity market. Finally, the average consumption for raw grinding is done in mixed schedule, between 12.00 and 24.00.

Table 1: Distribution of time alleged in electricity demand and the excess heat.

Horario	0.00 a 8.00	8.00 a 12.00	12.00 a 24.00
Demanda eléctrica [kW]	4.940	1.235	3.088
Excedente térmico [kW]	16.245	16.245	12.996

### 2.3. Economic viability

Tail cycles they are listed in Royal Decree 661/2007 of specialized subjects such as cogeneration in a.2 group that includes "facilities that include an energy plant using waste from any facility, machine or industrial process whose purpose is not production electricity and / or mechanics." Rates are low because in this case there are no fuel costs. For this reason the upgrade of the electricity tariff is made annually according to CPI. This makes it more attractive mode operation power consumption that the evacuation network, provided that the electrical requirements of the permit process. In the present case goes to work mostly in solitary self, but as we shall see later in the period of minimum demand (8.00 to 12.00) the energy produced by the ORC exceeds the demand of the plant, being then necessary to evacuate network. Therefore, it is still a mixed scheme, all power consumption possible and evacuating the excess network. The electricity tariff evacuated energy network for the year 2011 is €50.168 / MWh (Order ITC/3355/2010). The purchase price of electricity for the plant is not regulated, large consumers establishing agreements with utility companies. In the second half of 2008 the average industrial price was 107 € / MWh so conservatively assumes a purchase price of 60€/MWh.

## **2.4. ORC at nominal point**

Since the heat source temperature is relatively high you choose to use a regenerative cycle to take advantage of the high temperature at the exit of the turbine. As well the gradient of the heat source (360 ° C to 130 ° C) is high you opt for a supercritical cycle whichever is the pressure at the outlet of the pump for practical reasons in the selection of the heat exchangers of 38.5 bar. As fluid is looking for a natural hydrocarbon decomposition to avoid problems of high temperature, thus being able to dispense with thermal oil as a fluid medium in stove. Isopentane is selected to be a dry flowable (positive slope of the saturated vapor line on the Ts diagram) and condense to above atmospheric pressure at condensation temperatures expected.

Exchangers have been modeled on the  $\epsilon$ -NTU method for cross-flow as a minimum of 10 K approach leading to a relative sizes (NTUs) of 0.88 in the condenser 12 in the stove and 31 in the regenerator . We have included pressure drop of 20 kPa in the high-pressure pipes and 3 kPa for the low, 16 kPa in the high-pressure side heat exchangers and 7 kPa on the low side.

The turbine and the pump has been modeled after isentropic performance, taking 85% to 75% for turbine and pump. The combustion gases are modeled as perfect gases with 1.1 kJ / kg-K and a mass flow of up to 65 kg / s, corresponding to the periods in which no oil mills operating. In operation of these gas flow is reduced to 52 kg / s. In order not to sue water cycle has been used an air cooled condenser with a temperature drop in the air side of 14 ° C. The model has been implemented in ESS which have also drawn the properties of isopentane.

## **2.5. ORC outside the nominal point**

The cycle must work outside the point of design changes both the hot and the cold source. In the hot gas flow ranges from design (100%) in the absence of raw mill operation and a 20% lower when the mill operates. As to the cold, the temperature variation by hour ago that the condensing temperature is falsified.

### **3. Results**

#### **3.1. Nominal point**

The nominal point is designed for 100% gas (65 kg / s) and air inlet temperature to condenser 9 ° C, yielding a net electrical power 4MW with an efficiency of 26.67% cycle. The air flow required is 783 kg / s.

#### **3.2. Annual operating**

The electricity produced by the ORC for a year of work amounts to 28,163 MWh, of which 24,328 MWh consumption and 3,835 have been evacuated MWh network.

#### **3.3. Economic viability**

With the economic assumptions set you get an internal rate of return (IRR) exceeding 29%, a payback period of less than 7 years (35% of the life of the project) and a net present value (NPV) of 7.4M€

The estimated investment is subject to some uncertainty. To evaluate the sensitivity of the economic viability was calculated investment that could support the project for a return in 75% of its lifetime, resulting in €2,150 / kW (double the estimate).

As for the income structure shows that the energy displaced due to (self) is over 88% of the total.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

**APROVECHAMIENTO DE CALORES  
RESIDUALES EN UNA CEMENTERA  
MEDIANTE CICLOS DE RANKINE  
ORGÁNICOS**

Autor: DIEGO ARANDA PÉREZ

Directores : JOSÉ IGNACIO LINARES HURTADO  
BEATRÍZ YOLANDA MORATILLA SORIA

MADRID, Junio 2011

# Índice

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>5</b>
1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO .....	6
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	7
<b>2. PROCESO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO</b> .....	<b>8</b>
2.1 OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS .....	10
2.2 PREPARACIÓN DE LA HARINA.....	11
2.2.1 Homogeneización y molienda de harina.....	11
2.2.2 Precalentador de ciclones .....	11
2.3 FABRICACIÓN DE CLÍNKER.....	12
2.3.1 Horno rotatorio.....	12
2.3.2 Enfriador .....	13
2.4 ELABORACIÓN DEL PRODUCTO FINAL .....	15
2.4.1 Molienda de cemento .....	15
2.4.1 Expedición.....	16
<b>3. CICLO DE RANKINE ORGÁNICO (ORC)</b> .....	<b>17</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS ORC.....	18
3.2 CONFIGURACIONES POSIBLES: SUBCRÍTICO Y SUPERCRÍTICO .....	20
3.3 FLUIDOS APTOS PARA EL CICLO .....	23
<b>4. MARCO REGULATORIO</b> .....	<b>25</b>
<b>5. BALANCE DE PLANTA</b> .....	<b>28</b>
5.1 FOCO DE CALOR .....	29
5.1 ELECCIÓN DEL FLUIDO DE TRABAJO.....	29
5.2 CONFIGURACIÓN SELECCIONADA .....	31
5.3 ESQUEMA DEL CICLO .....	32
<b>6. MODELO MATEMÁTICO</b> .....	<b>36</b>
6.1 ECUACIONES DEL MODELO .....	37
6.1.1 Punto de diseño .....	37
6.1.2 Operación.....	48
6.2 PÉRDIDAS DE CARGA .....	51

<b>7.</b>	<b>MODELO ECONÓMICO.....</b>	<b>53</b>
7.1	DATOS NECESARIOS .....	54
7.1.1	<i>Inversión</i> .....	54
7.1.2	<i>Tarifas</i> .....	55
7.1.3	<i>Otros datos</i> .....	56
7.2	ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DEL PROYECTO .....	57
<b>8.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
8.1	PUNTO NOMINAL O PUNTO DE DISEÑO .....	61
8.2	OPERACIÓN FUERA DEL PUNTO DE DISEÑO.....	67
8.3	VIABILIDAD ECONÓMICA .....	75
8.3.1	<i>Escenario 1</i> .....	78
8.3.2	<i>Escenario 2</i> .....	79
8.3.3	<i>Escenario 3</i> .....	80
8.3.4	<i>Escenario 4</i> .....	81
8.3.5	<i>Escenario 5</i> .....	82
8.3.6	<i>Escenario 6</i> .....	83
8.3.7	<i>Resultados estudio sensibilidad</i> .....	84
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>86</b>
9.1	CONCLUSIONES A PARTIR DE LOS OBJETIVOS.....	87
9.1.1	<i>Identificar los excedentes de calor y su potencial para convertirse en energía eléctrica en una cementera</i> .....	87
9.1.2	<i>Análisis de las diferentes alternativas de ciclos ORC aplicables al proceso.</i> .....	88
9.1.3	<i>Modelado del ORC mediante EES en el punto nominal</i> .....	89
9.1.4	<i>Modelado del ORC punto de operación; a carga parcial y estudio del foco frío mediante estudio climatológico.</i> .....	90
9.1.5	<i>Analizar la viabilidad económica con un estudio de sensibilidad.</i> .....	91
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>92</b>
<b>11.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>94</b>

# Índice de figuras

ILUSTRACIÓN 2.1: DIAGRAMA FABRICACIÓN DEL CEMENTO .....	10
ILUSTRACIÓN 2.2: PRECALENTADOR DE CICLONES .....	12
ILUSTRACIÓN 2.3: HORNO ROTATORIO .....	13
ILUSTRACIÓN 2.4: ENFRIADOR DE SATÉLITES DE LA PLANTA EN ESTUDIO.....	14
ILUSTRACIÓN 2.5: ENFRIADOR TIPO PARRILLA .....	15
ILUSTRACIÓN 2.6: MOLIENDA DEL CLÍNKER Y DEMÁS COMPONENTES .....	16
ILUSTRACIÓN 3.1: DIAGRAMA CICLO ORC SIMPLIFICADO .....	19
ILUSTRACIÓN 3.2: COMPARACIÓN CICLO SUBCRÍTICO Y SUPERCRÍTICO.....	21
ILUSTRACIÓN 3.3: DIAGRAMAS T-Q PARA CICLOS SUBCRÍTICO Y SUPERCRÍTICO .....	22
ILUSTRACIÓN 5.1: FÓRMULA DESARROLLADA DEL ISOPENTANO .....	31
ILUSTRACIÓN 5.2: ESQUEMA DE LA PLANTA .....	33
ILUSTRACIÓN 6.1: TEMPERATURA AMBIENTE TOLEDO .....	50
ILUSTRACIÓN 8.1: DIAGRAMA T-S DEL CICLO ORC .....	61
ILUSTRACIÓN 8.2: ESQUEMA DE PLANTA DEL CICLO ORC .....	62
ILUSTRACIÓN 8.3: DIAGRAMA T-Q DE LA CALDERA DE RECUPERACIÓN. ....	64
ILUSTRACIÓN 8.4: DIAGRAMA T-Q DEL REGENERADOR.....	65
ILUSTRACIÓN 8.5: DIAGRAMA T-Q DEL CONDESADOR .....	66
ILUSTRACIÓN 8.6: CONSUMO ELÉCTRICO Y EXCEDENTE TÉRMICO DE LA CEMENTERA .....	70
ILUSTRACIÓN 8.7: DÍA 15 DE ENERO .....	71
ILUSTRACIÓN 8.8: DÍA 15 DE ABRIL .....	72
ILUSTRACIÓN 8.9: DÍA 15 DE JULIO .....	73
ILUSTRACIÓN 8.10: DÍA 15 DE OCTUBRE .....	74
ILUSTRACIÓN 8.11: POTENCIA DESARROLLADA POR EL ORC .....	77

# *Índice de tablas*

TABLA 6.1: PRESIÓN ENTRADA BOMBA FRENTE A TEMPERATURA AMBIENTE.....	51
TABLA 8.2: RESUMEN INTERCAMBIADORES .....	66
TABLA 8.3: DATOS GENERALES DE OPERACIÓN DE LA CEMENTERA .....	68
TABLA 8.4: POTENCIA Y HORARIOS DE LAS DISTINTAS ESTACIONES DIARIAS.....	69
TABLA 8.5: ESCENARIOS PARA ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD.....	75
TABLA 8.6: ENERGÍA PRODUCIDA.....	76
TABLA 8.7: VIABILIDAD ECONÓMICA DEL ESCENARIO 1 .....	78
TABLA 8.8: VIABILIDAD ECONÓMICA DEL ESCENARIO 2 .....	79
TABLA 8.9: VIABILIDAD ECONÓMICA DEL ESCENARIO 3 .....	80
TABLA 8.10: VIABILIDAD ECONÓMICA DEL ESCENARIO 4 .....	81
TABLA 8.11: VIABILIDAD ECONÓMICA DEL ESCENARIO 5 .....	82
TABLA 8.12: VIABILIDAD ECONÓMICA DEL ESCENARIO 6 .....	83
TABLA 8.13: RESULTADOS ANÁLISIS ECONÓMICO DE SENSIBILIDAD .....	84

# ***1. Introducción***



### 1.1 Motivación del proyecto

Si se analiza la prospectiva energética con el horizonte en el 2030, se observa una escasez de los combustibles fósiles y el impacto de su consumo en el medio ambiente. Esto lleva a pensar en unas políticas con una fuerte apuesta por el ahorro, la eficiencia energética y por las energías renovables. Si además, se tiene en cuenta la dependencia energética española del 80% del exterior resulta incuestionable la necesidad que surge de aprovechar la energía.

En este contexto surge la cogeneración que aprovecha el calor de un proceso industrial para producir energía eléctrica sin coste añadido de combustible.

Las aportaciones de la cogeneración a la economía no se limitan al propio sistema, sino que facilitan la competitividad de las industrias al permitir su trabajo con un mínimo coste energético.

Concretamente en este proyecto se estudia cómo mejorar la eficiencia energética de una industria cementera a través de un ciclo de cola.

### 1.2 Objetivos del proyecto

El presente proyecto tiene como objetivos los siguientes puntos:

- ✓ Identificar los excedentes de calor y su potencial para convertirse en energía eléctrica en una cementera.
- ✓ Análisis de las diferentes alternativas de ciclos ORC aplicables al proceso.
- ✓ Modelado del ORC el punto nominal; modelado y estudio perdidas de carga.
- ✓ Modelado del ORC punto de operación; a carga parcial y estudio del foco frío mediante estudio climatológico.
- ✓ Analizar la viabilidad económica con un estudio de sensibilidad.

## ***2. Proceso de fabricación del cemento***



## 2. Proceso de fabricación del cemento

---

El cemento es un material de construcción básico que se obtiene del procesado de distintos materiales. Actúa como conglomerante hidráulico, lo que permite que fragüe y se endurezca cuando se amasa con agua y áridos.

La base del cemento es el clínker, un producto granulado de entre 3 y 4 cm obtenido por la calcinación de caliza y arcilla. En esta calcinación se produce la combinación de cal con sílice para formar silicato tricálcico, componente principal del clínker. En la práctica esto se consigue a partir de una mezcla de las materias primas, una molienda previa a la calcinación, la propia calcinación en la que mediante reacciones químicas de cocción se obtiene el silicato y por último, una molienda post-cocción. Finalmente, el cemento se obtiene añadiendo al clínker una serie de componentes para la obtención de diferentes tipos, con unas propiedades determinadas según el uso al que se vayan a destinar.

Todo el estudio del presente proyecto va a estar referido a una cementera tipo con tecnología de vía seca con horno de satélites ubicada en Toledo.

En el proceso de fabricación se distinguen cuatro etapas principales:

1. Obtención y preparación de las materias primas.
2. Preparación de la harina
3. Fabricación de clínker
4. Elaboración producto final

En la *Figura 2.1* se muestra un esquema genérico de un proceso de vía seca dónde se pueden ver las distintas etapas que lo componen. Cada una de ellas se desarrollará en los apartados siguientes.

## 2. Proceso de fabricación del cemento

---

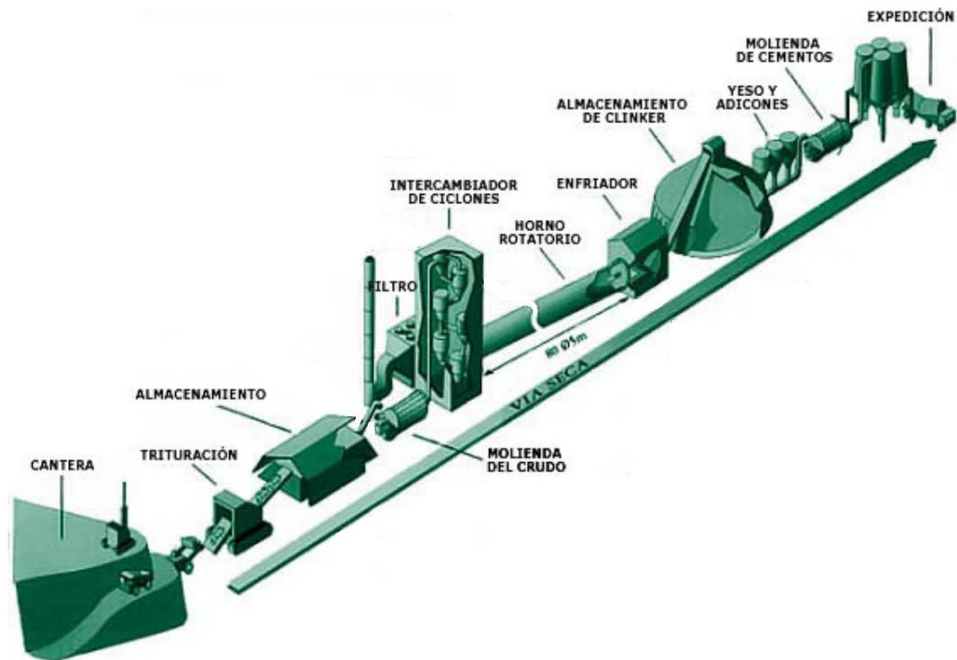


Figura 2.1: Diagrama fabricación del cemento (Fuente: La Agrupación de Fabricantes de Cemento Artificial de Andalucía [1])

### 2.1 Obtención y preparación de las materias primas

El proceso comienza con la extracción de las materia primas que se encuentran en yacimientos, normalmente canteras a cielo abierto. Las canteras se explotan mediante voladuras controladas, en el caso de materiales duros como calizas y pizarras, mientras que en el caso de materiales blandos (arcillas y margas) se utilizan excavadoras para su extracción.

Una vez extraído y clasificado el material, se procede a su trituración hasta obtener una granulometría adecuada para el producto de molienda y se traslada a la fábrica mediante cintas transportadoras o camiones para su almacenamiento en el parque de prehomogenización.

### 2.2 Preparación de la harina

#### 2.2.1 Homogeneización y molienda de harina

En el parque de prehomogeneización, el material triturado se almacena en capas uniformes para ser posteriormente seleccionadas de forma controlada. La prehomogeneización permite preparar la dosificación adecuada de los distintos componentes reduciendo su variabilidad.

Consecutivamente, estos materiales se muelen en molinos verticales o de bolas para reducir su tamaño y favorecer así su posterior cocción en el horno. A partir de ahí, la materia prima resultante, llamada harina, se almacena en un silo para incrementar la uniformidad de la mezcla. El material obtenido debe ser homogeneizado para garantizar la calidad del clínker y la correcta operación del horno.

#### 2.2.2 Precalentador de ciclones

En función de cómo se procesa la materia antes de su entrada en el horno del clínker, se distinguen dos tipos de procesos de fabricación: vía seca o vía húmeda. En el proyecto el proceso es vía seca.

La alimentación al horno se realiza a través del precalentador de ciclones, que calienta la materia prima para facilitar su cocción. La harina se introduce por la parte superior de la torre y va descendiendo por ella. Mientras tanto, los gases provenientes del horno, que están a altas temperaturas, ascienden a contracorriente, precalentando así la harina que alcanza los 1000°C antes de introducirse en el horno.

Se consiguen tres objetivos con el precalentador de ciclones: reducir la longitud del horno, aprovechar al máximo la capacidad calorífica de los gases y, por último, mejorar el rendimiento, ya que en el intercambiador la harina tiene un contacto mejor con los gases.

## 2. Proceso de fabricación del cemento

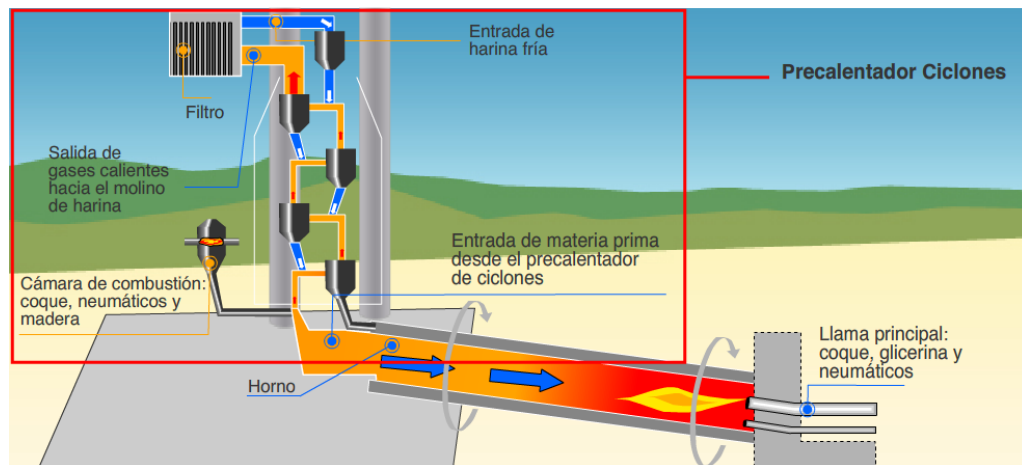


Figura 2.2: Precalentador de ciclones (Fuente: Instituto Español Del Cemento y Sus Aplicaciones [2])

### 2.3 Fabricación de clínker

#### 2.3.1 Horno rotatorio

El horno es cilíndrico y acusa una ligera inclinación hacia el extremo donde se sitúa el quemador. El diámetro interno es de unos 4 metros.

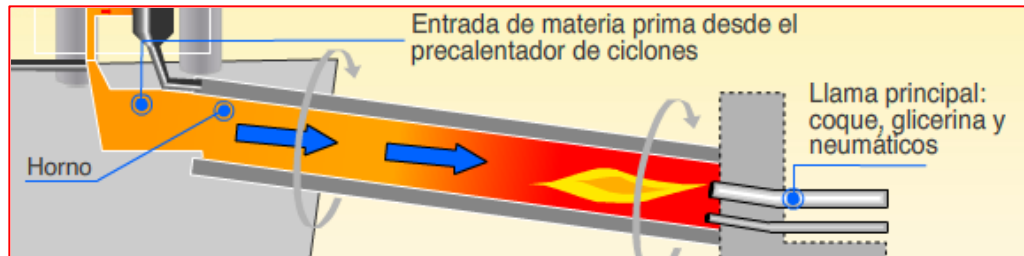
Por efecto de la inclinación y rotación del horno, el crudo se mueve lentamente y en contracorriente hacia el extremo donde están situados el mechero y la boca de descarga y, en su desplazamiento, va adquiriendo cada vez mayor temperatura a la vez que se van produciendo una serie de transformaciones físicas y reacciones químicas que dan lugar al clínker.

Por el extremo contrario a la entrada de la harina, se encuentra el quemador, necesario para alcanzar las temperaturas de cocción de las materias primas. El horno cuenta con una llama que arde a unos 2000°C, dependiendo del combustible utilizado. Se alimenta con combustibles

## 2. Proceso de fabricación del cemento

---

tradicionales, como carbón o el coque del petróleo o alternativos como neumáticos, harinas cárnicas...



*Figura 2.3: Horno rotatorio (Fuente: Instituto Español Del Cemento y Sus Aplicaciones [2])*

### 2.3.2 Enfriador

El horno descarga el clínker de forma continua hacia el enfriador que puede ser de satélites o de parrilla. En el proyecto es un enfriador de satélites. A la salida del horno, el clínker se introduce en los enfriadores de satélites. Se inyecta aire frío del exterior para reducir su temperatura de los 1400°C a 100°C. El aire calentado en este dispositivo se introduce nuevamente en el horno para favorecer la combustión, mejorando así la eficiencia energética del proceso. En la *Figura 2.4* se puede apreciar las dimensiones del horno y del enfriador de satélites que le rodean.



*Figura 2.4: Enfriador de satélites de la planta en estudio (Fuente: Elaboración Propia)*

La función del enfriador es congelar la estructura cristalina formada en el horno a alta temperatura. Si el enfriamiento fuera lento, el silicato tricálcico se transformaría en silicato bicálcico, el silicato bicálcico pasaría a su forma estable g-C<sub>2</sub>S que es hidráulicamente inactiva y el óxido de magnesio cristalizaría en periclusa que es potencialmente expansiva.

Para comprender el proceso se muestra en la *Figura 2.5* un enfriador de tipo parrilla; el principio de funcionamiento es el mismo, se introduce aire frío que a través del intercambio de calor consigue bajar la temperatura del clínker.

## 2. Proceso de fabricación del cemento

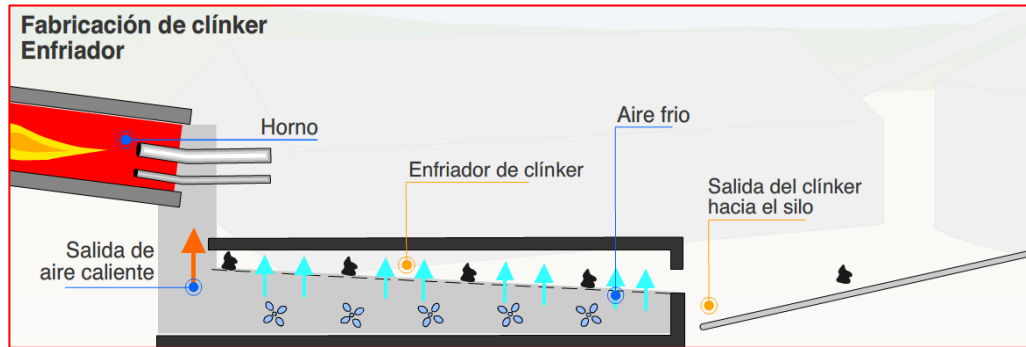


Figura 2.5: Enfriador tipo parrilla (Fuente: Instituto Español Del Cemento y Sus Aplicaciones [2])

## 2.4 Elaboración del producto final

### 2.4.1 Molienda de cemento

Una vez obtenido, el clínker se mezcla con yeso y adiciones, en proporciones adecuadas, dentro de un molino de cemento. En su interior los materiales se muelen, se mezclan y homogeneizan.

Los molinos son de bolas. Consisten en un gran tubo que rota sobre sí mismo y que contiene bolas de acero en su interior. Gracias a la rotación del molino, las bolas colisiona entre sí, triturando el clínker y las adiciones hasta lograr un polvo fino y homogéneo: el cemento.

Las distintas calidades del cemento se obtienen con la adición de materiales como escorias de alto horno, humo de sílice, puzolanas naturales, cenizas volantes y caliza, que le permite alcanzar determinadas características para su uso que se establecen en la reglamentación vigente.

## 2. Proceso de fabricación del cemento

---



*Figura 2.6: Molienda del cemento y demás componentes (Fuente: Instituto Español Del Cemento y Sus Aplicaciones [2])*

### 2.4.1 Expedición

Finalmente el cemento es almacenado en silos de los que parte hacia su uso. El cemento puede ser ensacado en plantas automáticas y agrupado en pallets para su transporte, o bien, transportado a granel en camiones, vagones de tren o en barcos si se destina a la exportación.

### ***3. Ciclo de Rankine Orgánico (ORC)***



### 3. Ciclo de Rankine Orgánico

---

El ciclo de Rankine con vapor de agua es el ciclo de potencia más empleado en las centrales térmicas. No obstante, si lo que se busca es aprovechar calores de media y baja temperatura, el agua no es el fluido más adecuado. Para ello es más conveniente irse a un ciclo de Rankine orgánico, el cuál emplea un fluido orgánico en lugar de agua. Estos fluidos tienen una serie de propiedades que los hacen atractivos a la hora de aplicarlos.

Los ciclos de Rankine orgánicos (ORC) son una tecnología conocida desde hace años para aplicaciones en las que se precisa transformar en energía eléctrica calor de media y baja temperatura (por debajo de 300°C), o bien cuando se desea una unidad de generación eléctrica por debajo de 1MWe. Así, los campos de aplicación típicos son plantas que requieran reducido tamaño, como las centrales de biomasa, plantas geotérmicas, desalación y recuperación de calores residuales como en plantas de biogás, motores alternativos, microturbinas de gas y pilas de combustible. El uso como ciclos de cola para procesos industriales también resulta especialmente atractivo. De hecho, existen algunas soluciones comerciales para cementeras. Es el caso de las aplicaciones de ABB [6].

#### 3.1 Características de los ORC

Desde un punto de vista tecnológico los ciclos ORC presentan características específicas y diferenciadas respecto al ciclo de Rankine convencional, resaltando la posibilidad de condensar por encima de la presión atmosférica con medios típicos de enfriamiento, presión crítica reducida, calor latente de vaporización pequeño y pendiente positiva de la curva de vapor saturado en el diagrama T-s.

### 3. Ciclo de Rankine Orgánico

---

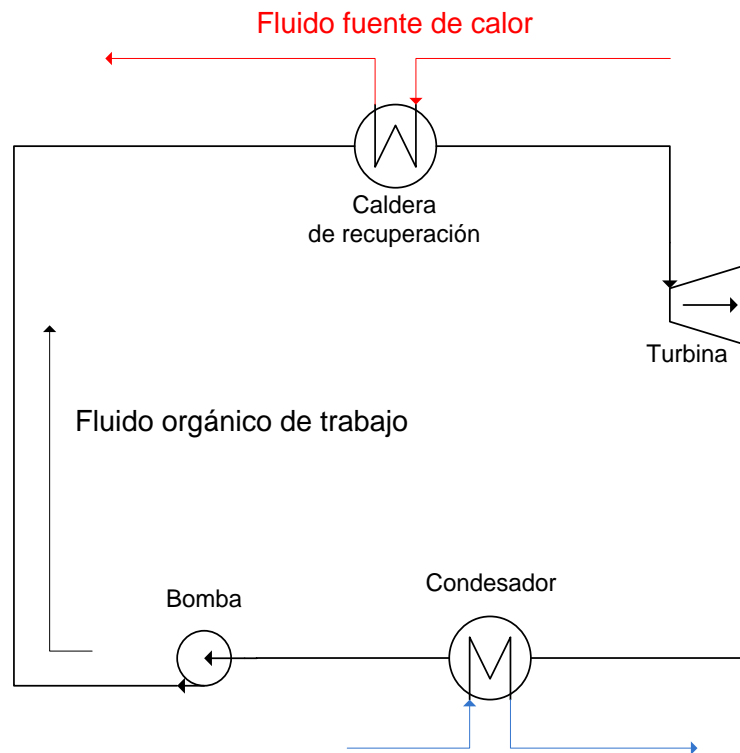


Figura 3.1: Diagrama ciclo ORC simplificado. (Fuente: Elaboración Propia)

Las características por las que el ORC es interesante frente al ciclo de Rankine tradicional son las siguientes:

- Pendiente de la línea de vapor saturado en el diagrama T-s positiva: asegura que no habrá nunca mezcla bifásica a la salida de la turbina sino que todo será vapor sobrecalentado. Esto permite iniciar la expansión en la turbina desde vapor saturado, evitando así la inclusión de un sobrecalentador en la caldera de recuperación.

- Entalpía de vaporización pequeña: La entalpía de vaporización de este tipo de fluidos es muy pequeña, ocurriendo casi todo el proceso de aceptación de calor en la zona de estado líquido. Esto permite que en dicho proceso la temperatura del ciclo se aproxime de forma casi permanente a la de la corriente caliente, con el consiguiente aumento de rendimiento y la reducción de irreversibilidades externas.

### 3. Ciclo de Rankine Orgánico

---

- De entre los posibles fluidos orgánicos, existe una amplia gama cuya presión de condensación a temperatura ambiente es superior a la atmosférica, con lo que ya no se requiere el uso de un desgasificador. Esto reduce la complejidad y el coste del ciclo. La elección del fluido de trabajo más adecuado para la instalación dependerá de varias variables, jugando con ellas para maximizar el rendimiento energético.

- Es habitual que la fuente térmica proceda de calores residuales, por lo que para optimizar su aprovechamiento es aconsejable no realizar regeneraciones a fin de enfriar la corriente caliente todo lo posible. Pese a esto, dado que la turbina devuelve vapor sobrecalentado existe una versión regenerada. En esta versión no se realizan extracciones de la turbina, que por su tamaño suele ser de un solo escalonamiento, sino que se instala un intercambiador de calor que cede calor de la salida de la turbina (que presenta un elevado sobrecalentamiento al ser positiva la pendiente de la línea de vapor saturado) al líquido que sale de la bomba, de modo que se incrementa la temperatura de adición de calor y se reduce la de cesión.

### 3.2 Configuraciones posibles: subcrítico y supercrítico.

Al igual que para los ciclos de Rankine, los ORC pueden ser de dos tipos: subcrítico y supercrítico. La *Figura 3.1* muestra la diferencia entre los dos, la cual radica en el paso del proceso de calentamiento en la caldera por encima o por debajo del punto crítico del fluido.

### 3. Ciclo de Rankine Orgánico

---

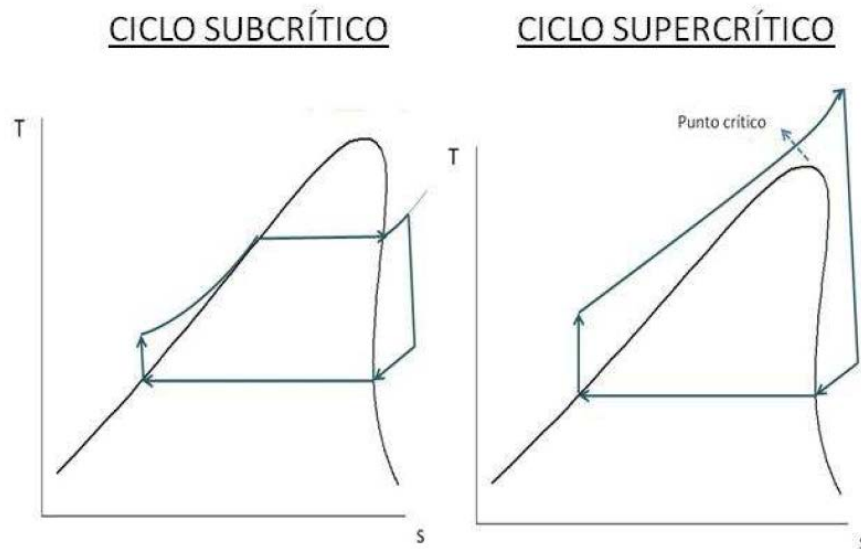


Figura 3.2: Comparación ciclo subcrítico y supercrítico (Fuente: [3])

En el ciclo subcrítico el calentamiento tiene lugar por debajo del punto crítico, es decir que este proceso de cambio líquido-vapor pasará por dentro de la campana bifásica en el diagrama T-s.

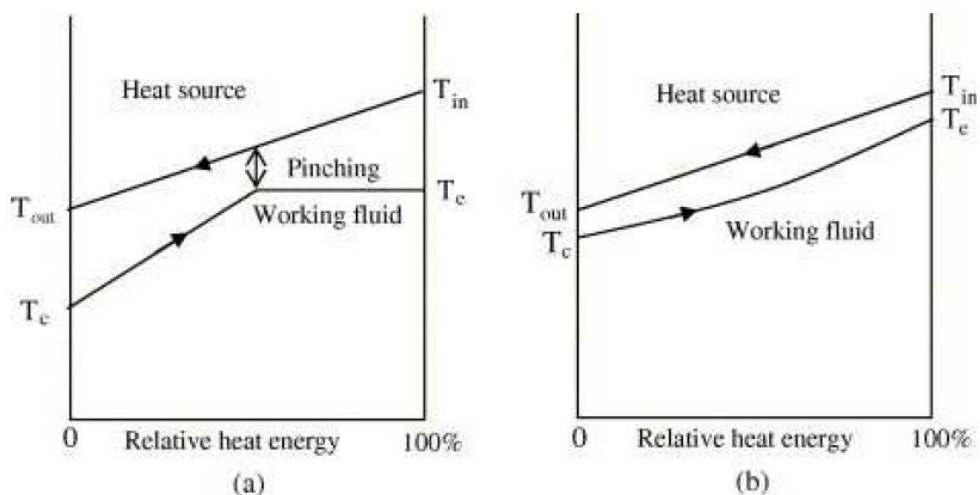
En los ciclos ORC el funcionamiento de la caldera de recuperación viene regulado por el punto de estrangulación o “pinch point”. A diferencia de lo que ocurre con las calderas de recuperación de los ciclos combinados en los ORC no existe el acercamiento del economizador ni el del sobrecalentador. Por otra parte, dada la reducida entalpía de vaporización del fluido orgánico este tipo de calderas prescinde de calderín separador de vapor, siendo un simple intercambiador de calor.

El ciclo supercrítico es una evolución del ciclo clásico al aumentar la presión de la caldera por encima de la crítica del fluido. En este caso, el proceso de calentamiento pasa por encima de la campana bifásica. Esto conlleva un aumento continuo de la temperatura a lo largo del proceso, dado que en ningún momento coexisten dentro de la caldera las fases líquido y vapor. Con este método se logra un perfil de temperaturas más próximo al del

### 3. Ciclo de Rankine Orgánico

foco caliente que en el ciclo subcrítico, con lo que se producen menos irreversibilidades en la caldera de recuperación. Además, la temperatura media de aceptación de calor aumentará por lo que el rendimiento del ciclo también lo hará. Por otro lado, el trabajar por encima del punto crítico implica trabajar con presiones mayores, presiones que tendrán que ser capaces de soportar los componentes del ciclo, por tanto la inversión de la instalación tendrá que ser mayor.

En la *Figura 3.2* se puede ver la diferente evolución de las temperaturas del fluido de trabajo y de la fuente de calor según sea el ciclo subcrítico o supercrítico.



*Figura 3.3: Diagramas T-Q para ciclos subcrítico y supercrítico.*

(Fuente: [3])

En ambos casos, las irreversibilidades en la caldera están asociadas con la diferencia de temperaturas entre corriente fría y corriente caliente.

En el ciclo subcrítico se observa que esta diferencia es mayor para la zona donde coexisten líquido y vapor, por tanto ahí es donde se da la mayoría de las irreversibilidades. En el ciclo supercrítico, se ve cómo a lo largo

### 3. Ciclo de Rankine Orgánico

---

de todo el calentamiento se producen unas diferencias de temperatura menores y más uniformes con respecto a la fuente térmica, disminuyendo así considerablemente las irreversibilidades en la caldera de recuperación, así como aumentando la temperatura media de aceptación de calor y por tanto el rendimiento.

#### 3.3 Fluidos aptos para el ciclo

Los ciclos ORC emplean fluidos orgánicos, normalmente hidrocarburos naturales o hidrocarburos halogenados. La elección del fluido de trabajo concreto dependerá de las propiedades del mismo, analizables en su campana bifásica, y su funcionamiento en las condiciones de la instalación. Dado el amplio espectro de fluidos posibles, se sigue una serie de criterios según el tipo de ciclo que se espera obtener para dar con el más adecuado.

Un primer criterio, común para todos los casos, es un criterio medioambiental: hay que tener en cuenta la legislación vigente que prohíbe el empleo de ciertos refrigerantes debido a su capacidad de destrucción de la capa de ozono (CFCs y HCFCs). Además, se descartarán todos aquellos que condensen a presión inferior a la presión atmosférica, para así evitar requerir la incorporación al ciclo de un desgasificador, con la consiguiente simplificación y abaratamiento de la instalación.

Para los ciclos subcríticos, el fluido ideal será aquel cuya línea de vapor saturado sea paralela a la línea de expansión de la turbina, asegurando así que se trabajará con la máxima eficiencia y siempre en la zona de vapor seco. Si las dos líneas fuesen convergentes, se correría el riesgo de obtener vapor húmedo dentro de la turbina, teniendo que recurrir a un sobrecalentamiento en la caldera para tratar de evitarlo. Si por el contrario fuesen divergentes, la temperatura del vapor a la salida de la turbina sería

### 3. Ciclo de Rankine Orgánico

---

demasiado elevada, aumentando así el tamaño, y por tanto el coste, del condensador posterior.

En los ciclos supercríticos, interesa tener un fluido con punto crítico a menor presión que la presión máxima establecida para el ciclo (presión en la caldera). La relación entre estas dos presiones debe ser lo suficientemente alta como para conseguir un acercamiento de temperaturas entre ambas corrientes durante la transferencia de calor, pero sin llegar a ser demasiado alta pues podría darse el caso que a la hora de expansionarse en la turbina hubiera mezcla bifásica.

## ***4. Marco regulatorio***



#### 4. Marco Regulatorio

---

En este capítulo se describe el marco regulatorio aplicable al presente proyecto. La tecnología de cogeneración por ORC aparece regulada en la siguiente normativa:

Como estipula el artículo 2 del Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, el sistema de aprovechamiento de calor residual mediante ORC podrá acogerse a este régimen especial por pertenecer las instalaciones del grupo a.2. A continuación se muestra, en cursiva, la fracción del Real Decreto.

##### *Artículo 2. Ámbito de aplicación*

*1. Podrán acogerse al régimen especial establecido en este real decreto las instalaciones de producción de energía eléctrica contempladas en el artículo 27.1 de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre.*

*Dichas instalaciones se clasifican en las siguientes categorías, grupos y subgrupos, en función de las energías primarias utilizadas, de las tecnologías de producción empleadas y de los rendimientos energéticos obtenidos:*

*Categoría a): Productores que utilicen la cogeneración u otras formas de producción de electricidad a partir de energías residuales.*

*Tienen la consideración de productores cogeneradores aquellas personas físicas o jurídicas que desarrollen las actividades destinadas a la generación de energía térmica útil y energía eléctrica y/o mecánica mediante cogeneración, tanto para su propio uso como para la venta total o parcial de las mismas. Entendiéndose como energía eléctrica la producción en barras de central o generación neta, de acuerdo con los artículos 16.7 y 30.2 de la Ley 54/1997, de 27 de noviembre.*

*Se entiende por energía térmica útil la producida en un proceso de cogeneración para satisfacer, sin superarla, una demanda económicamente justificable de calor y/o refrigeración y, por tanto, que sería satisfecha en*

#### 4. Marco Regulatorio

---

*condiciones de mercado mediante otros procesos, de no recurrirse a la cogeneración.*

*Esta categoría a) se clasifica a su vez en dos grupos:*

*(...) 2.º Grupo a.2. Instalaciones que incluyan una central que utilice energías residuales procedentes de cualquier instalación, maquina o proceso industrial cuya finalidad no sea la producción de energía eléctrica y/o mecánica.*

La Orden ITC/3353/2010, de 28 de diciembre, establece la actualización de las primas de las instalaciones del régimen especial a partir de 1 de enero de 2011. Para el grupo a.2 y por ser una instalación con una potencia inferior a 10 MW, la tarifa regulada es 5,0168 c€/kWh.

Según establece el RD 661/2007 en el Anexo VII para las instalaciones del grupo a.2 se efectuará una sola actualización anual de tarifas de acuerdo con la evolución del IPC publicado por el Ministerio de Economía a través del Instituto Nacional de Estadística.

## ***5. Balance de Planta***



Como se ha visto en el proceso de fabricación, en la industria cementera existe un elevado potencial para la generación eléctrica a partir de los calores residuales del proceso. En la fabricación de cemento por vía seca existe una oferta de calor residual procedente de los humos que se expulsan a la atmósfera después de atravesar el intercambiador de ciclones. Ese calor residual se puede convertir en energía eléctrica que cubra parcialmente la demanda eléctrica de la planta a través de un ciclo de Rankine orgánico (ORC), constituyendo así una planta de cogeneración en ciclo de cola.

En este apartado se analiza la viabilidad técnica de un ciclo ORC para una cementera tipo de vía seca y horno de satélites ubicada en Toledo. Para ello se estudia tanto el fluido más adecuado como la configuración de ciclo que maximiza la energía eléctrica producida: ciclo supercrítico o subcrítico con empleo de regeneración o sin ella.

### 5.1 Foco de calor

La fuente de calor para el ciclo orgánico de Rankine va a ser los humos de escape del intercambiador de ciclones. La producción de clínker de la planta considerada es de 550000 toneladas al año. Para esta cantidad de fabricación los humos de escape ascienden a 65 kg/s. El otro dato necesario para su modelado es la temperatura de la salida de humos, siendo de 360°C.

Cuando está actuando el molino de crudo o harina necesita el 20% de estos humos para llevar a cabo la molienda con lo que se dispone del 80% del flujo másico para el uso en el ORC.

### 5.1 Elección del fluido de trabajo

El análisis de los fluidos disponibles así como la elección del fluido de trabajo final han sido posibles gracias a la base de datos del programa

informático EES (Engineering Equation Solver) [15], el cuál dispone de todas las propiedades termodinámicas necesarias de una gran variedad de fluidos posibles. Gracias a ello es posible realizar una primera selección de fluidos acordes con unos primeros requisitos termodinámicos para una configuración supercrítica del ciclo, a saber:

- Presión de condensación superior a 1 bar. Se establece el rango de temperaturas en el cuál se estima que estará el punto de salida del fluido de condensador entorno a los 30-35°C

- Temperatura crítica inferior a 360 °C. No puede ser superior a la temperatura de entrada de los gases de escape en el recuperador.

- La presión máxima del ciclo no debe superar los 40 bar para no elevar los costes de los componentes.

- No ser perjudicial para la capa de ozono, es decir, que no contenga Cloro (no podrá pertenecer al grupo de los CFC ni al de los HCFC)

Estas restricciones reducen los candidatos a fluido de trabajo a los siguientes: Isobutano, isopentano, n-butano, n-pentano, R236fa, R245fa y RC318.

Para la elección del fluido de trabajo entre estos candidatos se realizó un primer modelo orientativo del ciclo. El resultado de estas primeras simulaciones fue el isopentano, fluido con el que se fue trabajando.

El isopentano o metilbutano, es un alcano formado por cuatro átomos de carbono mediante una estructura ramificada, cuya fórmula molecular es  $C_5H_{12}$ . Su fórmula desarrollada viene dada en la *Figura 5.1*.

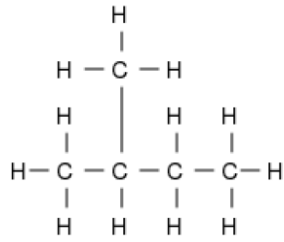


Figura 5.1: Fórmula desarrollada del isopentano. (Fuente: [4])

En condiciones ambiente se presenta como un líquido incoloro con un olor característico. Es un compuesto muy volátil e inflamable, por lo que hay que tener cuidado a la hora de manipularlo a temperatura ambiente. Es muy utilizado en la industria petroquímica como compuesto de síntesis entre otros compuestos para fabricar disolventes y productos farmacéuticos. Sus propiedades se han tomado del paquete EES. En los anexos se muestran los diagramas los T-s y P-h del isopentano.

### 5.2 Configuración seleccionada

La mayor desventaja del ORC es la relativamente baja eficiencia el ciclo (debido a las limitaciones termodinámicas que provoca la baja temperatura del foco caliente) y los grandes tamaños de los intercambiadores de calor. Por tanto, es importante usar métodos para incrementar la eficiencia. Uno de estos métodos es el uso del regenerador.

Los humos de escape de las cementeras, por el proceso de la combustión, contienen gases ácidos, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y algunos metales pesados. Para evitar que condensen en el recuperador y lo corroan sólo se permite el enfriamiento de los mismos hasta la temperatura alrededor de 150°C. Como la salida de los humos se da a una temperatura similar a la temperatura de salida de la turbina se pueden aprovechar de manera que el isopentano que va a ser turbinado recibe calor en dos

escalones diferenciados, el regenerador y posteriormente en el recuperador. La corriente de salida de la turbina se aprovecha aproximando la temperatura del isopentano a la de la caldera. Si no fuera por el recuperador esta energía se evacuaría en el condensador elevando la temperatura de rechazo de calor y con ello reduciendo el rendimiento del ciclo.

Como se vio en el apartado 3.2, el ciclo supercrítico es una evolución del ciclo clásico al aumentar la presión de la caldera, incrementando por tanto el coste de la instalación. El proceso de calentamiento pasa por encima de la campana bifásica. Esto conlleva un aumento de la temperatura media de aceptación de calor frente al caso ciclo subcrítico y por tanto un incremento del rendimiento. Por este aumento de rendimiento se utilizará el caso supercrítico.

En resumen, la configuración final con la que trabajaremos será un ciclo de Rankine orgánico supercrítico y regenerado por el que circulará isopentano.

### 5.3 Esquema del ciclo

Una vez visto que configuración se ha elegido se pasa a explicar el funcionamiento del ciclo en cuestión. El esquema de la planta se da en la *Figura 5.2*.

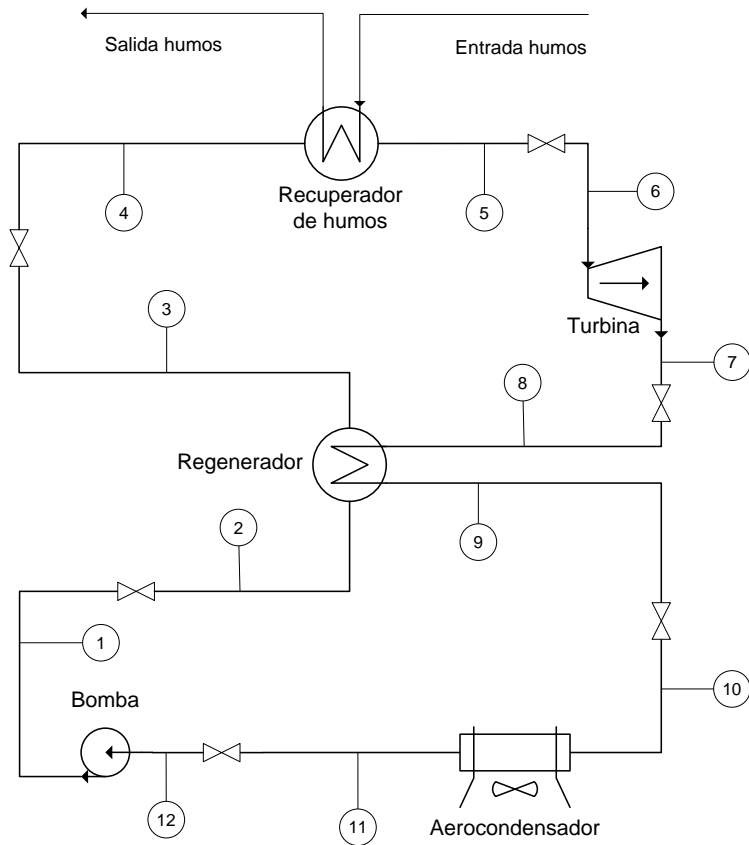


Figura 5.2: Esquema de la planta. (Fuente: Elaboración Propia).

Con la numeración escogida el ciclo comienza en la salida de la bomba dónde este recoge el fluido en condiciones de líquido subenfriado, presentando una temperatura baja y presión alta. La bomba ha comprimido el fluido hasta una presión de 38,5 bar (1,14 veces el valor de la presión crítica del isopentano) enviándolo directamente al regenerador.

En el regenerador se establece el primer intercambio de calores. El fluido orgánico que circula a alta presión incrementa su temperatura a medida que el fluido a la salida de turbina cede su energía.

Después, en la caldera de recuperación o recuperador de humos tiene lugar la segunda transferencia de calor. Esta vez entre los humos de escape de la cementera y el fluido orgánico.

El elemento consecutivo es la turbina, donde el fluido se expande generando un trabajo que dará lugar a la energía eléctrica que producirá el ciclo.

Ahora se encuentra en el regenerador pero por el lado de baja presión. El fluido aún se encuentra con un potencial térmico que se aprovecha en este intercambiador, como se ha visto anteriormente, para incrementar la temperatura del fluido antes de la entrada en el recuperador. De esta manera se aumenta la eficiencia del ciclo.

Por último se encuentra el equipo encargado de condensar el fluido de salida del regenerador, el aerocondensador. Básicamente un aerocondensador es un condensador que emplea aire ambiente como medio refrigerante, en lugar de agua. El aerocondensador dispone de módulos donde se instalan miles de tubos de pequeño diámetro aleteados en su parte externa por los que circula el fluido y un ventilador exterior que impulsa el aire necesario para refrigerar los tubos por los que se distribuye el fluido orgánico.

Se estudió la posibilidad de refrigerar el fluido por torre de refrigeración pero se optó finalmente por el aerocondensador para evitar los consumos de agua de la torre de modo que la planta ORC incorporase las menores servidumbres posibles a la cementera.

De nuevo, este condensado sería recogido por la bomba y enviado al regenerador, cerrándose así el ciclo.

En cada tramo se han tenido en cuenta pérdidas de carga en conductos e intercambiadores.

Tales pérdidas son de gran importancia para el dimensionamiento en puntos concretos de la instalación. Particularmente, se debe prestar

especial atención a las condiciones en las que llega el fluido a la bomba: una excesiva pérdida de carga puede hacer que se entre en la campana bifásica, lo que favorecería la cavitación. Para evitarlo, se debe regular el subenfriamiento del fluido para que compense la pérdida posterior en su camino hacia la bomba, manteniendo un margen de seguridad, al cual habrá que prestar atención, sin que sea demasiado alto ni demasiado ajustado.

## ***6. Modelo matemático***



El modelo del ciclo se ha implementado en EES, un potente paquete informático concebido para ser empleado en análisis termodinámicos. Contiene datos sobre diferentes fluidos y sus correspondientes propiedades, característica que le hace distinto a otros programas de resolución de ecuaciones. Además permite resolver sistemas no lineales, importar diagramas y dibujar gráficas, de manera que el modelado del ciclo se realiza de una forma sencilla a la vez que rigurosa.

### 6.1 Ecuaciones del modelo

A continuación se presentan las ecuaciones necesarias para la resolución del ciclo a partir de una serie de datos de partida y ecuaciones resultantes de la configuración del ciclo. Este apartado consta de dos partes diferenciadas. La primera, denominada PUNTO DE DISEÑO, expone el modelo establecido para evaluar el funcionamiento del ciclo en su punto nominal, y poder así dimensionar los equipos. El segundo apartado se trata el modelo de OPERACIÓN, que simula el funcionamiento del ciclo para operación fuera del punto nominal. Finalmente, el modelo PÉRDIDAS DE CARGA explica los pasos seguidos para calcular las pérdidas de carga entre elementos.

#### 6.1.1 Punto de diseño

El programa EES dispone de todas las propiedades termodinámicas del isopentano, de tal manera que para un punto dado basta conocer dos de ellas para obtener las demás. A continuación se exponen tanto los datos de partida como las ecuaciones de cada elemento por separado para que resulte más sencilla su interpretación.

### Datos:

Para la implementación se han establecido unos datos fijos para ciertos puntos de la instalación. Estos datos fijos son los expuestos a continuación:

- *La presión a la salida de la bomba:*  $p_1=38,5$  bar
- *Rendimiento de la turbina:*  $\eta_T=0,85$
- *Rendimiento de la bomba:*  $\eta_B=0,75$
- *Subenfriamiento a la salida del condensador:*  $sub_{con}=2$  K
- *Temperatura de condensación:*  $T_{cond}=33^\circ\text{C}$
  
- *Flujo másico de gases de escape de la chimenea:*  $m_{dot,g}=65$  kg/s
- *Calor específico de los gases de escape:*  $C_{pg}=1,1$  kJ/kg·K
- *Temperatura de entrada de los gases al recuperador:*  $T_{g,2}=360^\circ\text{C}$
- *Temperatura de salida de los gases del recuperador:*  $T_{g,1}=150^\circ\text{C}$
- *Calor específico del aire:*  $C_{pa}=1,005$  kJ/kg·K
- *Temperatura entrada de aire en el aerocondensador:*  $T_{ea}=9^\circ\text{C}$
- *Temperatura salida aire del aerocondensador:*  $T_{sa}=23^\circ\text{C}$
  
- *Pinch Point (Punto de estrangulación) del regenerador:*  $PP_{reg}=10$  K
- *Pinch Point (Punto de estrangulación) del evaporador:*  $PP_{ev}=10$  K
  
- *Pérdidas de carga del tramo 1-2:*  $\Delta P_1=0,2$  bar
- *Pérdidas de carga del tramo 2-3:*  $\Delta P_2=0,16$  bar
- *Pérdidas de carga del tramo 3-4:*  $\Delta P_3=0,2$  bar
- *Pérdidas de carga del tramo 4-5:*  $\Delta P_4=0,16$  bar
- *Pérdidas de carga del tramo 5-6:*  $\Delta P_5=0,2$  bar
  
- *Pérdidas de carga del tramo 7-8:*  $\Delta P_7=0,03$  bar
- *Pérdidas de carga del tramo 8-9:*  $\Delta P_8=0,07$  bar
- *Pérdidas de carga del tramo 9-10:*  $\Delta P_9=0,03$  bar
- *Pérdidas de carga del tramo 10-11:*  $\Delta P_{10}=0,07$  bar

## 5. Balance de Planta

---

- Pérdidas de carga del tramo 11-12:  $\Delta P_{11}=0,03\text{bar}$

### Ecuaciones:

- Cálculo de presiones:

Partiendo de dos presiones dato se calculan las demás al tener en cuenta las pérdidas de carga. Los puntos [1,6] corresponden a los puntos de alta presión y los puntos [7,12] a los puntos de baja presión.

$$p_{i+1} = p_i - \Delta P \quad \text{para } i = [1,5] \cup [7,11]$$

- Tramos tuberías :



En los tramos dónde sólo hay tuberías, sólo hay pérdida de carga, por lo que se conserva la entalpía. Estas entalpías son las del isopentano a la temperatura y presión del punto correspondiente.

$$h_{i+1} = h_i \quad \text{para } i = [1,3,5,7,9,11]$$

- Recuperador de humos :



En el recuperador los gases de escape ceden su calor al isopentano. Se ha optado por un intercambiador de placas de flujo cruzado en solo paso donde cada uno de los fluidos, es decir, los gases y el isopentano van sin mezclarse.

La potencia térmica intercambiada en el recuperador cumple las siguientes relaciones, dado que se puede calcular para los dos fluidos entre los cuales tiene lugar el proceso:

$$Q_{rec} = \dot{m}_o (h_5 - h_4)$$

$$Q_{rec} = \dot{m}_g C_{pg} (T_{g;2} - T_{g;1})$$

Siendo:

$Q_{rec}$  potencia térmica intercambiada en el recuperador

$\dot{m}_o$  gasto másico de isopentano por el ciclo

$h_5$  y  $h_4$  entalpías del isopentano a la salida y entrada del recuperador

$\dot{m}_g$  gasto másico del los gases del recuperador

$C_{pg}$  calor específico de los gases del recuperador

$T_{g;2}$  y  $T_{g;1}$  temperaturas entrada y salida de gases

La efectividad del recuperador, como la de cualquier intercambiador, es la razón entre la transferencia real de calor y la transferencia de calor máxima posible:

$$\varepsilon_{rec} = \frac{(T_{g;2} - T_{g;1})}{(T_{g;2} - T_4)}$$

Siendo:

$\varepsilon_{rec}$  eficiencia del recuperador

$T_4$  temperatura del isopentano a la entrada del recuperador

Relación de la eficiencia con el  $NUT_{rec}$  y  $C_{R;rec}$  para el cálculo del  $NUT[8]$ :

$$\varepsilon_{rec} = 1 - e \left[ \frac{1}{C_{R;rec}} \cdot NUT_{rec}^{0,22} \cdot \left( e^{(-C_{R;rec} \cdot NUT_{rec}^{0,78})} - 1 \right) \right]$$

Al introducir esta ecuación se añaden nuevas incógnitas que se resolverán a continuación con estas ecuaciones:

$$\begin{aligned}\Delta T_{rec;o} &= t_5 - t_4 \\ \Delta T_{rec;g} &= T_{g;2} - T_{g;1} \\ C_{rec;o} &= \frac{\dot{Q}_{rec}}{\Delta T_{rec;o}} \\ C_{rec;g} &= \frac{\dot{Q}_{rec}}{\Delta T_{rec;g}} \\ C_{R;rec} &= \frac{\min(C_{rec;o}; C_{rec;g})}{\max(C_{rec;o}; C_{rec;g})}\end{aligned}$$

Una vez obtenido el  $NUT_{rec}$  se calcula el  $UA_{rec}$ :

$$NUT_{rec} = \frac{UA_{rec}}{\min(C_{rec;o}; C_{rec;g})}$$

Siendo:

$C_{rec;o}$  capacitancia térmica del fluido orgánico

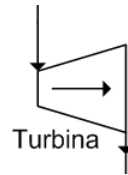
$C_{rec;g}$  capacitancia térmica de los gases de escape

$C_{R;rec}$  relación capacidad de calor del recuperador

$NUT_{rec}$  número de unidades de transferencia del recuperador

$UA_{rec}$  coeficiente global de transferencia de calor del recuperador

- Turbina:



La turbina es el elemento del ciclo que impulsa al generador eléctrico. A medida que el fluido orgánico pasa por ella cede energía a los álabes. Estos álabes están unidos al eje que mueve el generador produciendo energía eléctrica.

Las ecuaciones de los estados termodinámicos a la entrada y a la salida de la turbina son las siguientes, sabiendo que se ha tomado un rendimiento isentrópico del 85%:

$$\eta_t = \frac{h_6 - h_7}{h_6 - h_{s7}}$$

Siendo:

$\eta_t$  rendimiento isentrópico de la turbina

$h_6$  y  $h_7$  entalpías del isopentano a la entrada y salida de turbina

$h_{7s}$  entalpía de salida con rendimiento isentrópico 100%

$s_6$  entropía del isopentano a la entrada de la turbina

- Regenerador:



El regenerador es un intercambiador de calor que aprovecha el calor del isopentano a la salida de la turbina para precalentar el isopentano antes

de que entre en el recuperador de calor. Este elemento aumenta el rendimiento de nuestro ciclo.

Las ecuaciones que derivan del uso del regenerador son las siguientes:

$$h_8 - h_9 = h_3 - h_2$$

$$\varepsilon_{reg} = \frac{(h_8 - h_9)}{C_{89}(T_8 - T_2)}$$

Siendo:

$h_8$  y  $h_9$  entalpías del lado de baja presión del recuperador

$h_3$  y  $h_2$  entalpías del lado de alta presión del recuperador

$\varepsilon_{reg}$  eficiencia del regenerador

$C_{89}$  calor específico del isopentano del lado de alta

$T_8$  y  $T_2$  temperaturas de entrada del isopentano

Al ser el regenerador el mismo tipo de intercambiador que el recuperador de humos la relación de la eficiencia con el  $NUT_{reg}$  y  $C_{R;reg}$  es la misma[8]:

$$\varepsilon_{reg} = 1 - e^{-\left[ \frac{1}{C_{R;reg}} \cdot NUT_{reg}^{0,22} \cdot \left( e^{(-C_{R;reg} \cdot NUT_{reg}^{0,78})} - 1 \right) \right]}$$

Al introducir esta ecuación se añaden nuevas incógnitas que se resolverán a continuación con estas ecuaciones:

$$C_{reg;a} = \dot{m}_o \cdot c_{23}$$

$$C_{reg;b} = \dot{m}_o \cdot c_{89}$$

$$C_{R;reg} = \frac{\min(C_{reg;a}; C_{reg;b})}{\max(C_{reg;a}; C_{reg;b})}$$

Siendo:

$C_{reg;a}$  capacitancia térmica del lado de alta presión

$C_{reg;b}$  capacitancia térmica del lado de baja presión

$C_{R,reg}$  relación capacidad de calor del recuperador

Una vez obtenido el  $NUT_{reg}$ , se calcula el  $UA_{reg}$ :

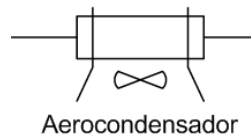
$$NUT_{reg} = \frac{UA_{reg}}{C_{reg;b}}$$

Siendo:

$NUT_{reg}$  número de unidades de transferencia del regenerador

$UA_{reg}$  coeficiente global de transferencia de calor del regenerador

- Aerocondensador:



El aerocondensador es un intercambiador de calor donde el isopentano va a condensar gracias a la transferencia de calor al flujo de aire que circula por él.

Es importante controlar que el isopentano llegue a la bomba con cierto margen respecto a la zona de vapor húmedo dado que la entrada de vapor de la bomba conllevaría su mal funcionamiento y un desgaste precipitado de la

## 6. Modelo matemático

---

misma. Teniendo esto en cuenta, se muestran las ecuaciones que derivan del uso del aerocondensador son las siguientes:

$$T_{11} = T_{cond} - Sub_{cond}$$

$$\varepsilon_{cond} = \frac{(T_{sa} - T_{ea})}{(T_{cond} - T_{ea})}$$

Siendo:

$T_{11}$  temperatura a la salida del condensador

$T_{cond}$  temperatura de condensación

$Sub_{cond}$  subenfriamiento condensador

$\varepsilon_{cond}$  = eficiencia condensador

$T_{sa}$  y  $T_{ea}$  temperaturas salida y entrada de aire

Relación de la eficiencia con el  $NUT_{cond}$ :

$$\varepsilon_{cond} = 1 - e^{[-NUT_{cond}]}$$

Cálculo de UA:

$$C_{cond;a} = \frac{\dot{m}_o(h_{10} - h_{11})}{(T_{sa} - T_{ea})}$$

$$NUT_{cond} = \frac{UA_{cond}}{C_{cond;a}}$$

Siendo:

## 6. Modelo matemático

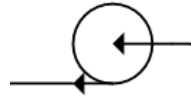
---

$C_{cond;a}$  capacitancia térmica del aire en el condesador

$UA_{cond}$  coeficiente global de transferencia de calor del condesador

$NUT_{cond}$  número de unidades de transferencia del condesador

- Bomba:



. Las bombas son elementos capaces de comprimir el fluido a altas presiones, con la condición de que sea completamente líquido. Requieren que se suministre un trabajo desde una fuente externa a través de un eje giratorio. Las ecuaciones que define el trabajo suministrado así como los estados termodinámicos la entrada y a la salida de la bomba son las siguientes:

$$\eta_B = \frac{v_{12}(P_1 - P_{12})}{h_1 - h_{12}}$$

Siendo:

$\eta_B$  rendimiento isentrópico de la bomba

$v_{12}$  volumen específico del isopentano a la entrada de la bomba

$P_1$  y  $P_{12}$  presión del isopentano a la salida y entrada de la bomba

$h_1$  y  $h_{12}$  entalpía del isopentano a la salida y entrada de la bomba

- Prestaciones del ciclo:

El trabajo del neto del ciclo se obtiene como la diferencia entre el trabajo generado por la turbina y el consumido en la bomba. Esto es el flujo de isopentano multiplicado por la diferencia de las diferencias entre salida y entrada de ambos elementos.

$$\dot{W} = \dot{m}_o [(h_6 - h_7) - (h_1 - h_{12})]$$

Siendo:

*$\dot{m}_o$  flujo del isopentano por el ciclo*

*$h_6$  y  $h_7$  entalpías del isopentano a la entrada y salida de turbina*

*$h_1$  y  $h_{12}$  entalpías del isopentano a la salida y entrada de bomba*

Para el cálculo del rendimiento se calcula la energía que recibe el ciclo por el recuperador. Esto es:

$$\dot{Q} = \dot{m}_o [(h_5 - h_4)]$$

Una vez obtenido el calor aportado el rendimiento del ciclo se calcula como:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}}$$

Siendo:

*$\eta$  rendimiento del ciclo ORC*

*$\dot{W}$  potencia neta desarrollada por el ciclo*

*$\dot{Q}$  potencia calorífica procedente del recuperador*

### 6.1.2 Operación

El ciclo ha de funcionar fuera del punto de diseño tanto por variaciones del foco caliente como del foco frío. En el foco caliente el caudal de gases varía entre el de diseño (100%) en ausencia de operación del molino de crudo y un 20% menor cuando dicho molino opera. En cuanto al foco frío, la variación de la temperatura ambiente hora por hora hace que la temperatura de condensación se vea modificada.

El comportamiento fuera del punto de diseño queda determinado por la evolución de las principales variables en función del gasto másico. Así, las pérdidas de carga en intercambiadores y conductos vienen dadas por:

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_n} = \left( \frac{\dot{m}}{\dot{m}_n} \right)^{1,8}$$

donde el subíndice “n” indica el valor de la variable en el punto nominal.

Como los equipos no varían, entre el diseño y la operación, el coeficiente de transferencia de calor de cada uno de los intercambiadores se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{UA}{UA_n} = \frac{\frac{1}{\dot{m}_{eN}^{0,8}} + \frac{1}{\dot{m}_{sN}^{0,8}}}{\frac{1}{\dot{m}_e^{0,8}} + \frac{1}{\dot{m}_s^{0,8}}}$$

Para la para el cálculo de la variación de presiones en la turbina se utiliza la ecuación de Stodola:

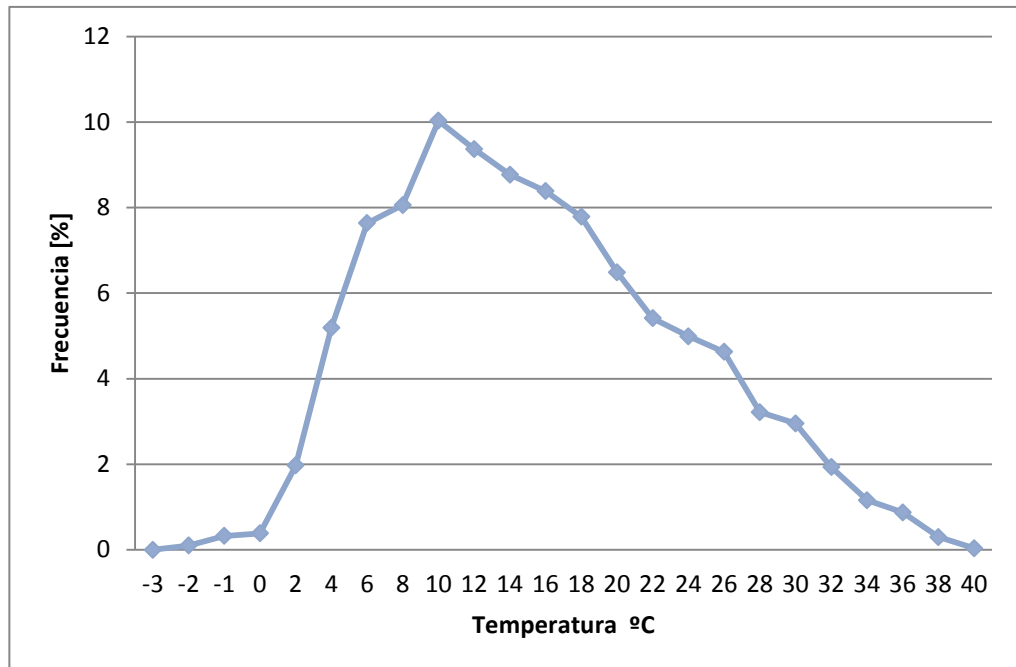
$$\frac{p_{eT}^2 - p_{eTn}^2}{p_{sT}^2 - p_{sTn}^2} = \left( \frac{\dot{m}}{\dot{m}_n} \right)^2$$

En ella el subíndice “n” se refiere al punto nominal, “e” a la entrada del equipo, “s” a la salida del equipo” y “T” a la turbina. El modelo de los intercambiadores de calor se completa con el método  $\epsilon$ -NTU que en este caso el procedimiento es inverso al diseño, es decir, se parte de los coeficientes de transferencia de calor para el cálculo de la eficiencia de cada uno de los intercambiadores.

Además se ha mantenido constante la temperatura de entrada a la turbina (255°C), lo que asume que siempre existe la masa necesaria de fluido orgánico en el ciclo. Ello quedaría garantizado con el adecuado depósito acumulador a la salida del condensador.

El ciclo no dispone de desaireador lo que exige que el condensador siempre opere por encima de la presión ambiente. Esto puede quedar comprometido en invierno y especialmente por la noche, pudiendo existir temperaturas ambiente de hasta próximas a -3°C.

Como aparece en la *Figura 6.1* el rango de temperaturas posibles de Toledo va desde -3°C hasta 40°C Aunque la frecuencia de temperaturas por debajo de 0°C no es habitual, la frecuencia no supera los 2%. El 93% de las temperaturas registradas en un año está entre 4°C y 30°C.



*Figura 6.1: Temperatura ambiente Toledo. (Fuente: Elaboración Propia a partir de [11])*

Para evitar que en tal circunstancia la temperatura de condensación se reduzca excesivamente se actúa sobre la velocidad de los ventiladores del aerocondensador para reducir el caudal de aire, aumentando así el salto térmico del aire y manteniendo con ello la temperatura de condensación adecuada para que la presión supere la presión atmosférica. Se ha controlado que la presión del condensador nunca sea inferior a 1 bar. Hay que controlar el caudal de los ventiladores para los casos en los que la temperatura del ambiente sea inferior a la temperatura de diseño de 9 °C. La *Tabla 6.1* muestra los distintos caudales para ajustar la presión de condensación por encima de 1 bar.

*Tabla 6.1: Presión entrada bomba frente a temperatura ambiente.  
(Fuente: Elaboración Propia)*

Temperatura ambiente (°C)	Flujo másico aerocondensador (%)	Presión entrada bomba (bar)
-3	40	1,134
-2	43	1,111
-1	47	1,081
0	50	1,076
1	55	1,054
2	59	1,052
3	64	1,047
4	69	1,049
5	75	1,05
6	82	1,052
7	88	1,064
8	95	1,076

### 6.2 Pérdidas de carga

El proceso de cálculo de las pérdidas de cargas es iterativo. Se establecen unas pérdidas de carga aproximadas sacadas de estudios anteriores [3]. Con objeto de optimizar dichos valores se calcula, con ayuda de EES, la sensibilidad de las prestaciones del ciclo respecto a las pérdidas de carga. Se hace el estudio de las pérdidas de carga frente a la potencia total generada por el ciclo. Se observa que unas pérdidas de carga influyen mucho en la potencia del ciclo y otras no tanto. Teniendo en cuenta la configuración del ciclo y este análisis de sensibilidad se concluye:

En las pérdidas de presión en los tramos de alta se distinguen dos casos: pérdidas en los tramos entre elementos y en los dos intercambiadores.

Las pérdidas en los tramos de alta presión se ajustan a 0,2 bar y en los intercambiadores a 0,16 bar.

En baja presión cabe la misma distinción, ajustando a 0,07 bar los tramos donde el isopentano discurre por los intercambiadores y 0,03 bar los tramos por los que fluye por tuberías. Como se puede ver en las ramas de alta presión se permite más pérdidas que en las de baja presión.

A la hora de seleccionar los elementos del ciclo es importante tener en cuenta estas pérdidas de carga. Concretamente hay que tenerlas en cuenta en los elementos que influyen directamente en estas pérdidas como son: diámetro de los conductos y su disposición en el ciclo, así como los distintos intercambiadores seleccionados, ya sea el recuperador, el regenerador o el aerocondensador.

## ***7. Modelo económico***



Una vez realizado el modelado de la instalación, se impone la necesidad de realizar un estudio económico para analizar la viabilidad de la misma. Dicho estudio determinará si el presente proyecto es rentable económicamente, y por tanto si interesa llevarlo a cabo o no.

Para la realización de este análisis se ha desarrollado un modelo mediante el programa informático Microsoft Excel.

El presente proyecto busca analizar los beneficios energéticos y económicos que supone acoplar un ciclo ORC de recuperación de energía a unos gases de escape de la cementera.

### 7.1 Datos necesarios

#### 7.1.1 Inversión

La inversión engloba los gastos en compra de equipos, su instalación, el montaje de tuberías, instrumentación, paramenta eléctrica,... así como los costes en obra civil, trabajos de arquitectura y obras de infraestructura. También incluyen la ingeniería, supervisión del proyecto y beneficio para el constructor. No incluye costes en el terreno ya que la superficie donde se va a construir es de la propia cementera, no incurriendo es gastos adicionales.

La inversión de una planta de 500 kW es de 2000€/kW y para una ciclo de 2 MW es de 1000 €/kW. Estos son precios medios básicos para el módulo ORC. Para calcular el coste total de la inversión es necesario tener en cuenta los costes de instalación del módulo ORC. Para aplicaciones de aprovechamiento de calor residual se sitúan en un 50% del precio del módulo [13]. Extrapolando estos datos a partir de una potencial hasta 4 MW, se llega

un valor nominal de 1061 € por kW instalado, para el coste total de la instalación.

Dado que el valor de la inversión puede condicionar de forma significativa la rentabilidad económica se han planteado tres escenarios, el primero con una inversión del 120% de la nominal, el segundo con una inversión del 150% de la nominal y el tercero con una del 200% de la nominal.

-Inversión nominal planta 4 MW:

- 4.244.000 €

-Inversión nominal mayorada al 120, 150 y 200%:

- 5.092.800 €
- 6.366.000 €
- 8.488.000 €

### **7.1.2 Tarifas**

Esta tarifa es necesaria ya que la energía excedente se va a vender a la red. Como se ha enunciado en el apartado 4 Marco Regulatorio para el grupo a.2 por ser una instalación con una potencia inferior a 10 MW la tarifa regulada es de 5,0168 c€/kWh.

Para el cálculo del ahorro que produce el autoabastecimiento se ha de tener en cuenta lo que pagaría sino tuviera instalado el ORC, para esto es necesario la tarifa industrial. El cálculo de la tarifa industrial es complicado ya que el precio del kW va variando dependiendo de muchos factores. El precio mínimo que se va a considerar es el equivalente a la tarifa regulada ya que si el precio fuera menor, se volcaría toda la energía a la red, en vez de trabajar en autoconsumo. Para considerar la sensibilidad a este precio, se

plantean varios escenarios considerando distintos valores del precio de la energía. Los tres escenarios son:

-Tarifa industrial iguala a Régimen especial:

- 5,0168 c€/kWh.

-Tarifa industrial mayorada:

- 65 c€/kWh.
- 75 c€/kWh.

### 7.1.3 Otros datos

#### 7.1.3.1 Operación y mantenimiento

Se establece en 4000€ anuales correspondiente al trabajo de dos operarios en una semana con una tasa de crecimiento anual del 3%

#### 7.1.3.2 Impuestos

La tasa de impuestos sobre beneficios toma habitualmente un valor del 36%

#### 7.1.3.3 Tasa de descuento

Se establece en el 10% anual.

#### 7.1.3.4 Vida útil del proyecto

Se toma una vida útil del proyecto de 20 años.

## 7.2 Análisis de la rentabilidad del proyecto

Para el análisis de la rentabilidad del proyecto se utilizan una serie de índices de rentabilidad, los cuales se explican a continuación.

El VAN es el índice que mide la rentabilidad absoluta de un proyecto dada una tasa de descuento determinada. Se entiende por valor actual neto de una inversión la valoración financiera en el momento actual de los flujos de caja proporcionados por la inversión a lo largo de su vida útil. Un proyecto es rentable siempre que el VAN sea positivo.

$$VAN = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - INV$$

La tasa interna de rentabilidad es una medida de la rentabilidad relativa de un proyecto. La TIR es una herramienta de toma de decisiones de inversión utilizada para comparar la factibilidad de diferentes opciones de inversión. Generalmente, la opción de inversión con la TIR más alta es la preferida. La TIR está definida como la tasa de interés o tasa de descuento con la cual el valor actual neto (VAN) es igual a cero.

$$VAN(TIR) = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} - INV = 0$$

Otro índice que mide el riesgo de una inversión es el período de retorno de la inversión o período de recuperación (PR). Representa el número de años necesarios para que la suma de los flujos de caja actualizados iguale a la inversión realizada. Evidentemente, para que el proyecto sea rentable el PR ha de ser inferior a la vida útil del sistema.

$$VAN(PR) = \sum_{j=1}^{PR} \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} - INV = 0$$

Al igual que el flujo de caja, el “valor” de los costes de producción evoluciona a lo largo del tiempo. En el caso de los costes, las tasas que se emplean para proyectar hacia el futuro y para descontar hacia el presente son diferentes.

Se denomina  $r$  a la tasa de crecimiento efectiva en la proyección hacia el futuro. Se llama efectiva porque incluye tanto la inflación como el incremento o decremento del tipo de coste.

La valoración en el presente se lleva a cabo mediante la tasa de descuento. El coste anual equivalente o coste normalizado (“levelized cost”) representa un coste constante que mantenido durante la vida útil del proyecto, a modo de anualidad, totalizaría el coste acumulado descontado al año cero. Así, un cierto coste en el año  $j$ ,  $C_j$ , se proyectaría en el año 0 mediante la tasa  $r$  y se descontaría al año 0 mediante la tasa  $i$ . La suma de dichos costes actualizados sería:

$$\sum C = \sum_{j=1}^n C_0 \frac{(1+r)^j}{(1+i)^j} = C_0 \sum_{j=1}^n k^j = C_0 \frac{k(1-k^n)}{(1-k)}$$

Ese coste acumulado se puede expresar como un coste anual equivalente (anualidad) a través del factor de recuperación de capital:

$$CAE = C_0 \cdot \frac{k(1-k^n)}{(1-k)} \cdot CRF$$

Donde el factor de recuperación de capital,  $CRF$ , se define como:

$$CRF = C_0 \cdot \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Y representa el cociente entre una cuota anual constante y el valor actual neto que supondrían las aportaciones de dicha cuota durante un número  $n$  de años.

El concepto de CAE (Coste Anual Equivalente) se aplica tanto a los costes de combustible, como a los de operación y mantenimiento,  $C_{O\&M}$ , a las ventas e incluso a la inversión inicial, quedando en este último caso definido por:

$$CAE_{INV} = INV \cdot CRF$$

En el presente proyecto no existen costes de combustible porque estos se le aplican al proceso productivo, por lo que únicamente se consideran los de operación y mantenimiento y el de la inversión.

Usualmente, en proyectos de producción eléctrica se define el coste normalizado de producción eléctrica (CNE) como la suma del de combustible, el de operación y mantenimiento y el de inversión. Simplificando en este caso:

$$CNE = CAE_{INV} + CAE_{O\&M}$$

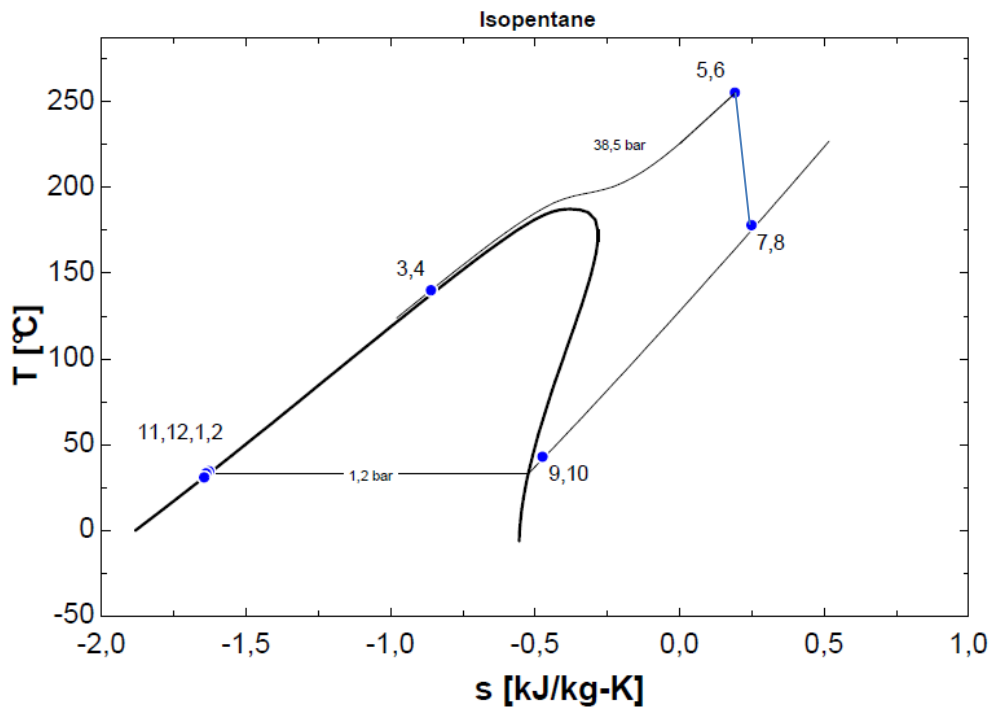
El coste anterior se puede calcular para cualquier periodo de tiempo sin más que emplear la tasa de descuento y la tasa de crecimiento de los costes en dicho periodo (semanal, mensual, trimestral, anual, etc.). Lo más frecuente es calcular el coste anual y así se realizará en este proyecto.

## ***8. Resultados***



## 8.1 Punto nominal o punto de diseño

En la *Figura 8.1* se representa el ciclo de potencia sobre el diagrama T-s del isopentano. En él aparecen señalados cada uno de los puntos del ciclo, para su mejor comprensión se adjunta también el esquema de planta en la *Figura 8.2*.



*Figura 8.1: Diagrama T-S del ciclo ORC. (Fuente: Elaboración Propia)*

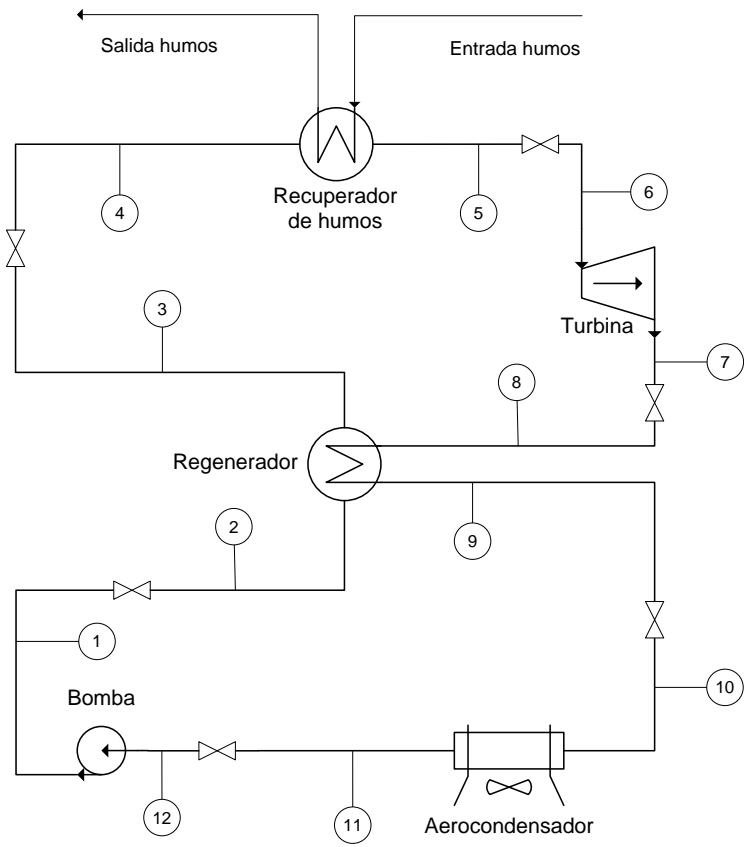


Figura 8.2: Esquema de planta del ciclo ORC. (Fuente: Elaboración Propia).

También se adjuntan las condiciones termodinámicas de cada uno de los puntos en la *Tabla 8.1*.

## 8. Resultados

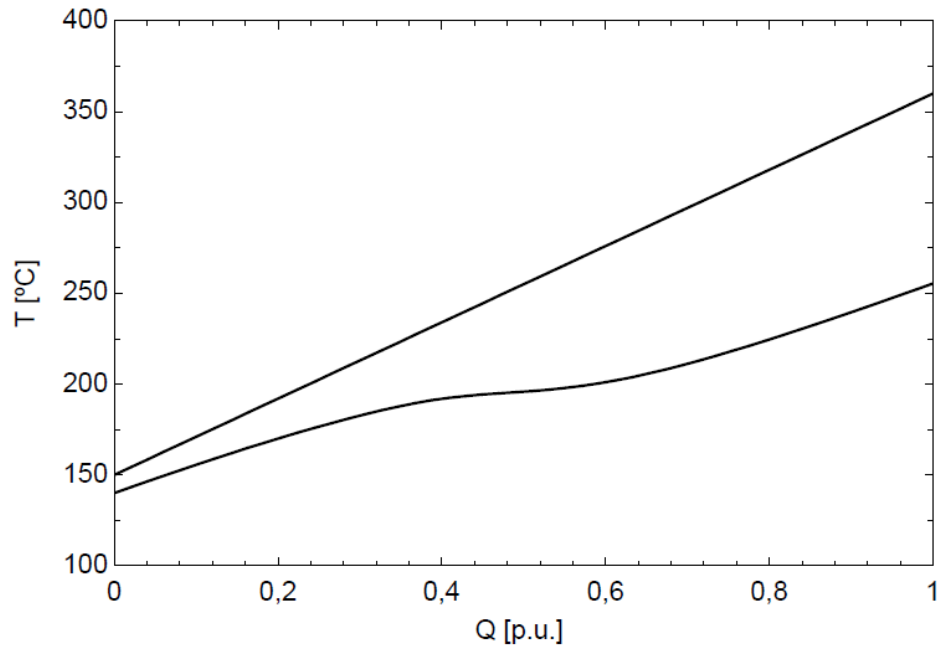
---

Tabla 8.1: Presión, temperatura y entalpía de los puntos de diseño

Punto	P(bar)	T (°C)	h(kJ/kg)
1	38,5	34,55	-328,2
2	38,3	33,25	-328,2
3	38,14	140	-48,34
4	37,94	140	-48,34
5	37,78	255,3	443,4
6	37,58	255,2	443,4
7	1,406	178,1	304,1
8	1,376	178	304,1
9	1,306	43,15	24,27
10	1,276	43,06	24,27
11	1,206	31	-336,4
12	1,176	31	-336,4

Como se puede comprobar, el ciclo varía entre dos presiones principales, la de alta y la de baja. Por ser un ciclo supercrítico la presión de alta es superior a la presión crítica del isopentano, como se puede observar en la *Figura 8.1*. La baja presión siempre es superior a la presión atmosférica ya que en el sistema no se utiliza desaireador por lo que para que el ciclo funcione correctamente no puede entrar aire en el sistema. Con presiones por encima de la atmosférica se asegura que esto no suceda.

Respecto a las temperaturas el mayor incremento se encuentra, como es lógico, en el recuperador de calor ya que se produce en él el mayor intercambio energético, el salto es de 115 °C frente a los 210°C de los humos de escape. La *Figura 8.3* muestra el diagrama T-Q del recuperador. El calor intercambiado es de 15 MW, con una efectividad del 95% y un NUT de 12,2.



*Figura 8.3: Diagrama T-Q del recuperador. El calor intercambiado es de 15 MW. (Fuente: Elaboración Propia).*

En la turbina la presión cae 36 bares y la temperatura 77°C desarrollando una potencia eléctrica de 4 MW teniendo en cuenta un rendimiento de la turbina del 85%.

En el regenerador se intercambian 8,5 MW con una efectividad de 93% y un NUT de 30,6. La línea roja de la *Figura 8.4* corresponde al isopentano después de la turbina que es el que le cede calor al isopentano que entra en el recuperador, representado por la línea azul.

## 8. Resultados

---

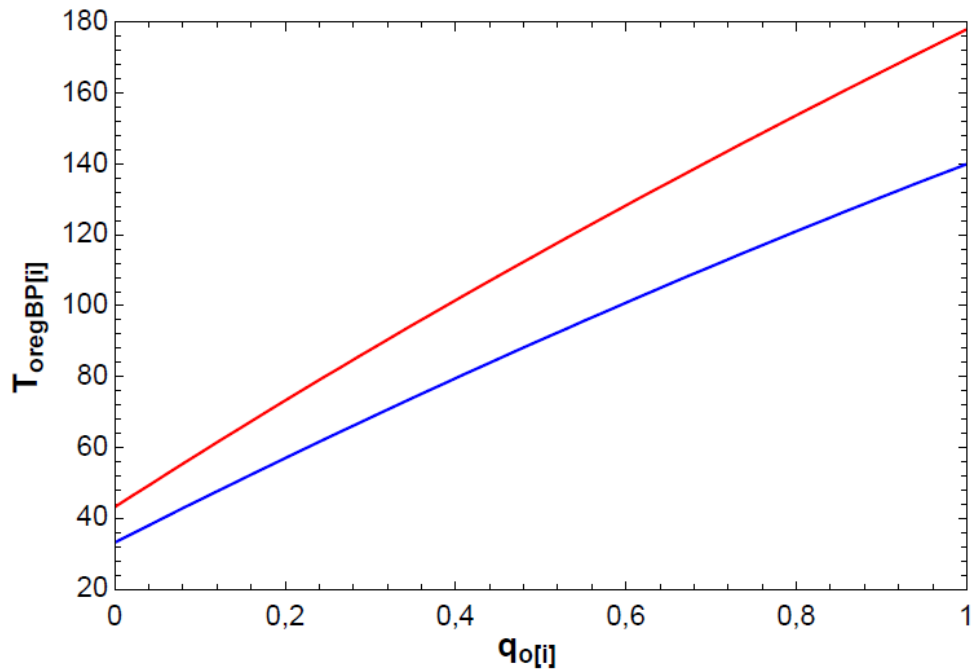


Figura 8.4: Diagrama T-Q del regenerador. (Fuente: Elaboración Propia).

En el condensador se disipan al aire exterior 11 MW. El diagrama T-Q es el que aparece en la *Figura 8.5*, con el pinch point o punto de estrangulación de 10°C. En este diagrama aparece el aire exterior en azul que se va calentando progresivamente, en negro aparece el isopentano, su trayecto horizontal se debe a que está condensando en el aerocondensador de donde sale como líquido subenfriado.

## 8. Resultados

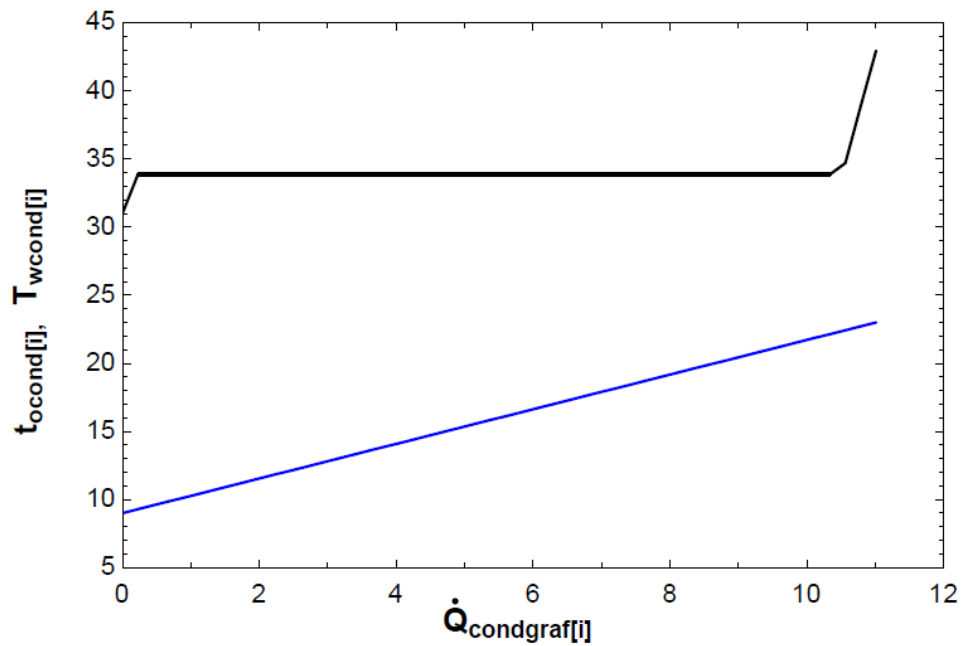


Ilustración 8.5: Diagrama T-Q del condensador

La *Tabla 8.2* muestra un resumen de los tres intercambiadores del ciclo en estudio:

*Tabla 8.2: Resumen intercambiadores*

	Potencia (kW) intercambiada	Eficiencia (%)	NUT	UA	Fluido caliente (kg/s)	Fluido frío (kg/s)
Recuperador	12015	95,46	30,66	872,2	65	30,53
Regenerador	8544	93,16	12,2	1942	30,53	30,53
Aerocondensador	11011	58,33	0,8755	688,5	30,53	782,6

La potencia intercambiada mayor es la del recuperador, seguida de la del aerocondensador. En cuanto a tamaños se deduce a partir del UA que el intercambiador más grande va a ser el regenerador debido a sus

condiciones de trabajo impuestas. Otro dato a destacar es el flujo de aire requerido en el aerocondensador de 782,6 kg/s. Este valor es muy superior a los demás flujos debido a dos factores: el primero es que el calor específico del aire es del orden de cuatro veces menor que el del agua por ejemplo y el segundo factor es que el salto de temperaturas también es pequeño de 14°C frente a los 210°C de los gases de escape. Continuando con los flujos, se observa que el caudal másico de los gases de escape es de 65 kg/s, caudal que aprovechamos para calentar el caudal de 30,53 kg/s de isopentano. A ambos lados del regenerador circula el isopentano con el caudal de 30,53 kg/s. En el aerocondensador el isopentano intercambia su calor con un caudal de aire de 782,6 kg/s. Este valor es tan elevado por que el calor específico del aire ambiente es 29 veces inferior al calor específico del isopentano que circula por los conductos del aerocondensador.

Como resumen, el punto nominal se ha diseñado para el 100% de gases (65 kg/s) y una temperatura de entrada del aire al condensador de 9°C por ser la temperatura más repetido en un año (*Figura 6.1*), obteniéndose una potencia eléctrica neta de 4MW con una eficiencia del ciclo de 26,67%.

### 8.2 Operación fuera del punto de diseño

El ciclo ha de funcionar fuera del punto de diseño tanto por variaciones del foco caliente como del foco frío. En el foco caliente el caudal de gases varía entre el de diseño (100%) en ausencia de operación del molino de crudo y uno un 20% menor cuando dicho molino opera. En cuanto al foco frío, la variación de la temperatura ambiente hora por hora hace que la temperatura de condensación se vea modificada.

## 8. Resultados

---

Por las condiciones del horno rotatorio y su difícil puesta en marcha, la cementera trabaja durante todos los meses a 24 horas diarias exceptuando agosto. Dado que la producción es de 550.000 toneladas de clínker al año se tiene una producción diaria de 1646 toneladas. La *Tabla 8.3* resume los principales parámetros de operación.

*Tabla 8.3: Datos generales de operación de la cementera.  
(Fuente: Elaboración Propia).*

Datos operación	
334	días
24	horas
550000	tn. clinker/año
1646,7	tn. clinker/día

Se tienen varias estaciones diferenciadas por los consumos, en ellas trabajan los molinos de cemento, los molinos de crudo o ningún molino.

El consumo medio de electricidad en la fabricación del clínker [5,6] viene establecido en 50,6 kWh/ton. De ellos aproximadamente el 25% (12,5 kWh/ton) se produce durante la molienda de crudo, el 35% (17,5 kWh/ton) en la molienda del cemento y el 40% restante (20 kWh/ton) en actividades diversas. Puede estimarse que en un día tipo se dedican 12 horas a la molienda de crudo, 8 horas a la de cemento y durante las 4 horas restantes no hay consumo eléctrico para los molinos.

Con estos datos se llega a unos consumos de los elementos del sistema resumidos en la *Tabla 8.4*.

## 8. Resultados

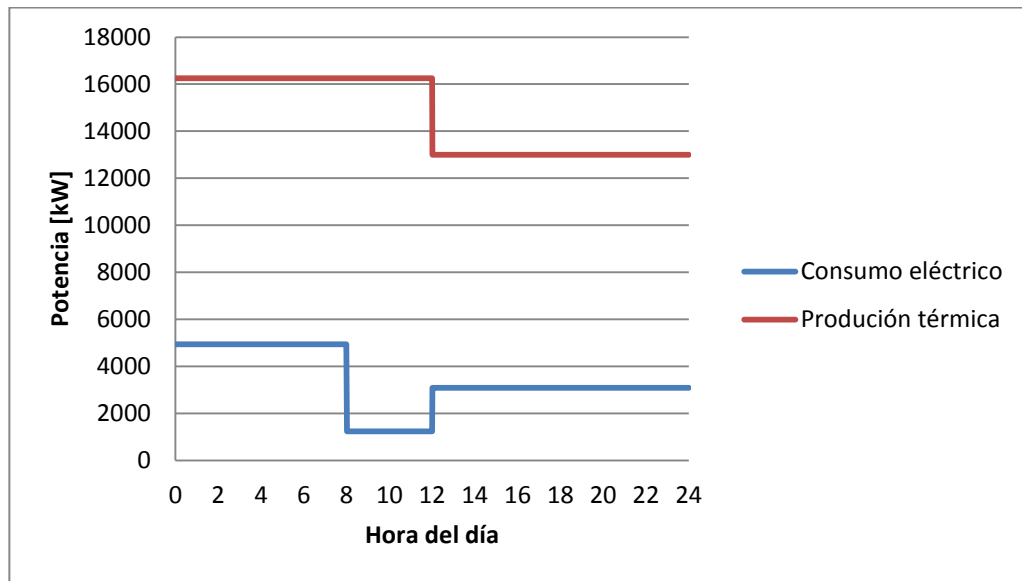
---

Tabla 8.4: Potencia y horarios de las distintas estaciones diarias

		Horario	Potencia por tn (kW/tn clinker-día)	Potencia consumida (kW)
Estación 1	Molino cemento	00:00 a 8:00	3	4940,12
Estación 2	Sin molinos	8:00 a 12:00	0,75	1235,03
Estación 3	Molino crudo	12:00 a 24:00	1,875	3087,57

Los consumos eléctricos de la cementera están determinados para la producción de clínker de 550000 toneladas anuales. También está determinado el excedente térmico de los gases de escape. Para un día cualquiera del año la *Figura 8.6* representa estas dos variables. Está dividida en tres franjas horarias correspondientes a los tres modos de operación de la cementera. En la primera estación se dispone de un 100 % de gases de escape y está el funcionamiento el molino de cemento. En la segunda estación también se dispone de todos los gases de escape con la diferencia de que no está funcionando ningún molino con lo que el consumo decae (este momento va a ser el de máxima venta a la red). Por último la tercera etapa en la que el foco térmico se reduce en un 20% ya que el molino de crudo necesita de parte de ese calor para su proceso, además aumenta el consumo eléctrico respecto a la etapa anterior por el hecho de abastecer de energía eléctrica el molino.

## 8. Resultados



*Figura 8.6: Consumo eléctrico y excedente térmico de la cementera.  
(Fuente: Elaboración Propia).*

Parte de estos consumos eléctricos se autoabastecerán gracias al ORC que se está diseñando.

Para representar las distintas estaciones a lo largo de un año se han tomado los días centrales de cada estación. En las *Figuras 8.7 a 8.10* se muestran el consumo eléctrico de la cementera, cuánto de ese consumo se reemplaza. Cuando es superior la producción del ORC frente al consumo eléctrico de la cementera se muestra el excedente o, lo que es lo mismo, la producción vendida a red.

## 8. Resultados

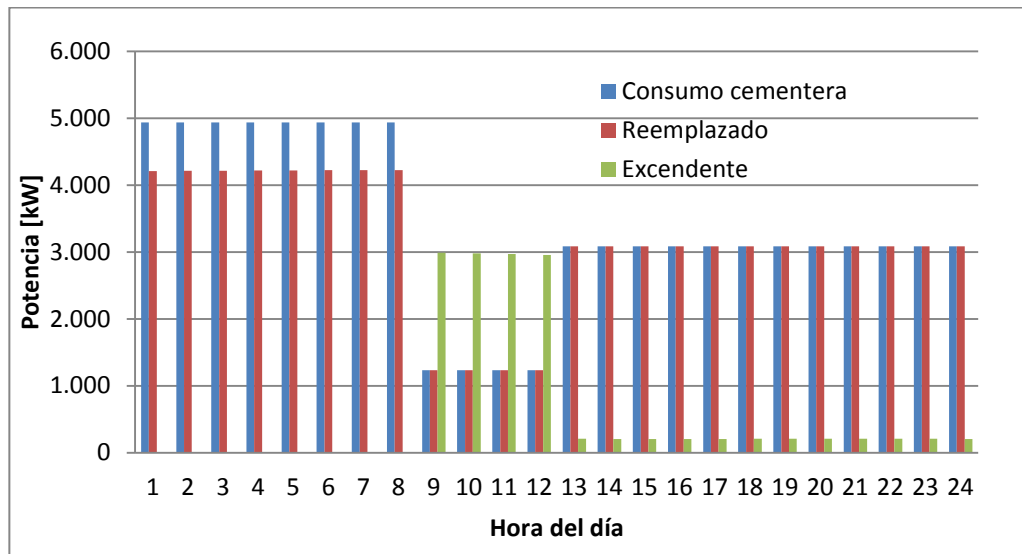


Figura 8.7: Balance energético el día 15 de enero. (Fuente: Elaboración Propia).

En el primer trimestre se aprecia cómo en las primeras horas del día, desde las 12 de la noche del día anterior hasta las 8 de la mañana el consumo es de casi 5MW y de ese consumo se autoabastece más del 80%. En la segunda estación los molinos dejan de funcionar, con lo que el consumo de la cementera es mucho menor y debido a esto se vende la energía sobrante a la red. En la tercera y última estación están en marcha los molinos de crudo con lo que consumo de la cementera aumenta pero el ORC lo satisface al 100 además de vender una pequeña cantidad a la red.

## 8. Resultados

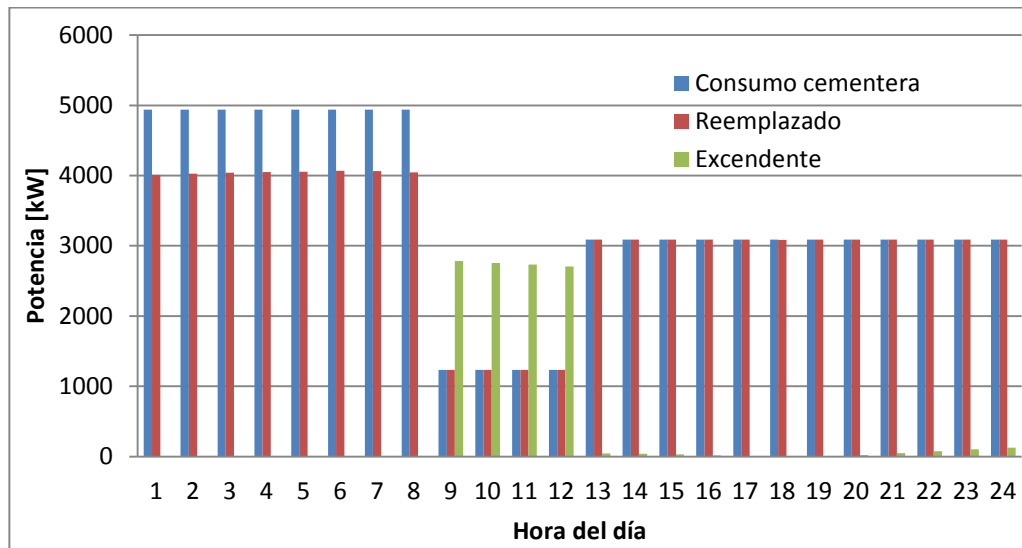


Figura 8.8: Balance energético el día 15 de abril (Fuente: Elaboración Propia).

Comparando el primer trimestre con el segundo se ve que la potencia producida en el primer trimestre va a ser mayor que la del segundo trimestre. Esto es porque la temperatura del foco frío es menor en invierno que en primavera: mientras más diferencia de temperaturas entre el foco caliente y el foco frío mayor rendimiento y por lo tanto mayor potencia desarrollada por la turbina.

## 8. Resultados

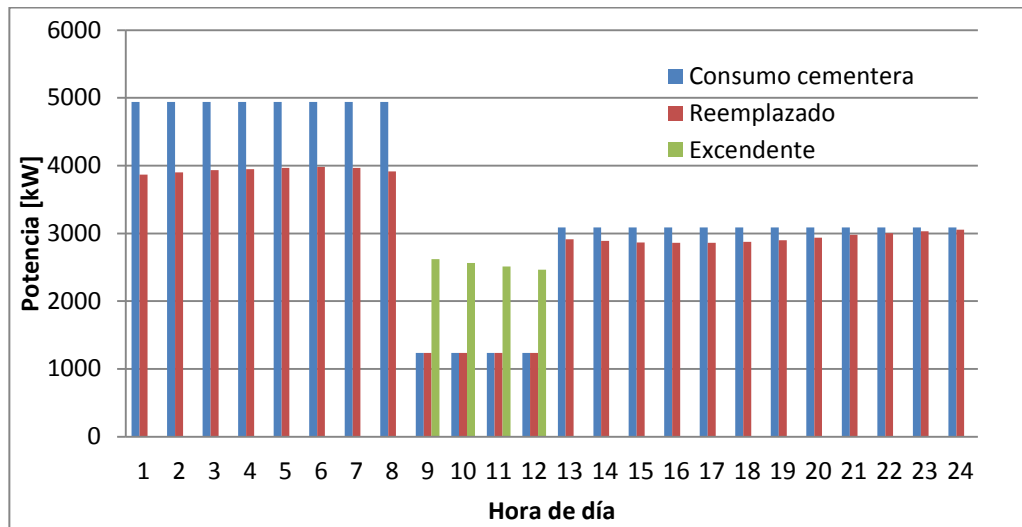


Figura 8.9: Balance energético el día 15 de julio. (Fuente: Elaboración Propia).

En verano vuelve a bajar la producción eléctrica del ciclo por el aumento de las temperaturas del foco frío. Así, en la *Figura 8.9* se aprecia que en la etapa del molino de crudo no se produce la energía suficiente para el autoabastecimiento.

## 8. Resultados

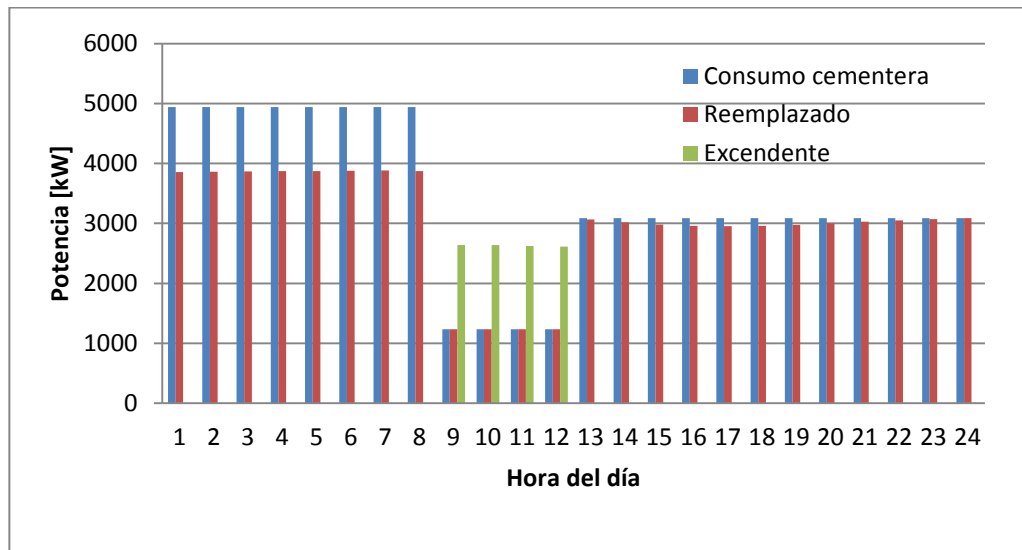


Figura 8.10: Balance energético el día 15 de octubre. (Fuente: Elaboración Propia).

En otoño la producción eléctrica se mantiene similar al mes de verano aunque algo inferior. Esto es por el motivo señalado del decremento de las temperaturas ambiente que afectan al aerocondensador.

La energía eléctrica producida por el ORC durante un año de trabajo asciende a 28.163 MWh, de los que 24.328 MWh se han autoconsumido y 3.835 MWh se han evacuado a red.

### 8.3 Viabilidad económica

En este apartado se desarrolla los cálculos necesarios para estimar si la instalación de este ORC resulta rentable. Para esto se plantean distintos escenarios de manera que se engloben todas las posibles circunstancias que pudieran darse al realizar este proyecto.

Como se explica en el apartado 7 las variables menos precisas son la inversión y la tarifa industrial de venta de electricidad. Por esto se calcula la viabilidad económica de los siguientes escenarios. De esta manera se valora la incertidumbre en estos datos.

*Tabla 8.5: Escenarios para estudios de sensibilidad.  
(Fuente: Elaboración Propia).*

Escenario	Tarifa industrial		Inversión	
1	RE	5,0168 c€/kWh	Nominal	4.244.000 €
2	RE x1,3	6,5 c€/kWh	Nominal	4.244.000 €
3	RE x1,5	7,5 c€/kWh	Nominal	4.244.000 €
4	RE	5,0168 c€/kWh	Nominal x 1,2	5.092.800 €
5	RE	5,0168 c€/kWh	Nominal x 1,5	6.366.000 €
6	RE	5,0168 c€/kWh	Nominal x 2	8.488.000 €

Las *Tablas 8.7 a 8.13* corresponden a los análisis de viabilidad de los distintos escenarios. Las columnas que aparecen son las siguientes:

- VE: Venta de electricidad, energía total vendida en el año a la tarifa estipulado por el Real Decreto.

## 8. Resultados

---

- ER: Energía reemplazada, es decir la fracción autoconsumida de la producida por el ORC.
- OM: Gastos en operación y mantenimiento.
- A: Amortización de la inversión.
- FC: Flujo de caja.
- FC desc: Flujo de caja descontado.
- Acumulado: Flujo de caja descontado acumulado.

Además de los parámetros indicados en el Apartado 7: Modelo económico, se ha utilizado para el cálculo la energía vendida y la energía reemplazada en un año. Estos valores se han sacado a partir de la suma de potencias desarrolladas por el ciclo para cada hora y día del año, resultando las cifras dadas en la *Tabla 8.6*.

*Tabla 8.6: Energía producida. (Fuente: Elaboración Propia).*

Energía vendida	3835,03 MWh
Energía reemplazada	24328,35 MWh

Como se observa en la *Figura 8.11* los meses que más contribuyen a esta energía desarrollada son los más fríos ya que la temperatura ambiente es más baja y por lo tanto el foco frío también.

## 8. Resultados

---

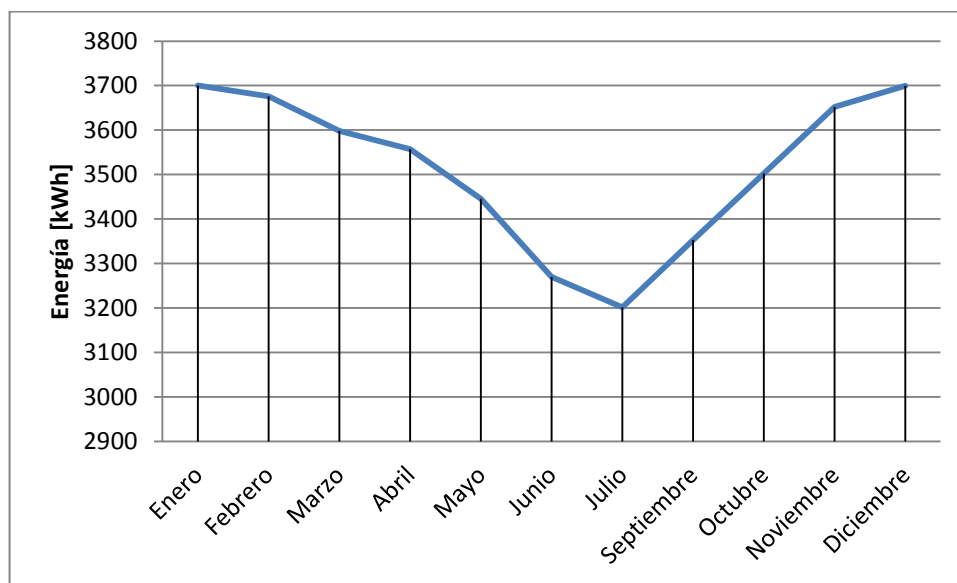


Figura 8.11: Energía eléctrica producida por el ORC. (Fuente: Elaboración Propia).

### 8.3.1 Escenario 1

Tabla 8.7: Viabilidad económica del escenario 1. (Fuente: Elaboración Propia)

Año	VE	ER	OM	A	FC	FC desc	Acumulado
1	192.396	1.216.418	4.000	212.200	975.473	886.793	886.793
2	198.168	1.252.910	4.100	212.200	1.002.458	828.477	1.715.271
3	204.113	1.290.497	4.203	212.200	1.030.253	774.044	2.489.315
4	210.236	1.329.212	4.308	212.200	1.058.882	723.231	3.212.546
5	216.543	1.369.089	4.415	212.200	1.088.371	675.792	3.888.338
6	223.039	1.410.161	4.526	212.200	1.118.744	631.502	4.519.840
7	229.731	1.452.466	4.639	212.200	1.150.029	590.147	5.109.987
8	236.623	1.496.040	4.755	212.200	1.182.253	551.530	5.661.516
9	243.721	1.540.921	4.874	212.200	1.215.444	515.467	6.176.983
10	251.033	1.587.149	4.995	212.200	1.249.631	481.787	6.658.770
11	258.564	1.634.763	5.120	212.200	1.284.844	450.330	7.109.100
12	266.321	1.683.806	5.248	212.200	1.321.114	420.948	7.530.048
13	274.310	1.734.320	5.380	212.200	1.358.473	393.501	7.923.549
14	282.540	1.786.350	5.514	212.200	1.396.952	367.861	8.291.411
15	291.016	1.839.941	5.652	212.200	1.436.587	343.907	8.635.318
16	299.746	1.895.139	5.793	212.200	1.477.411	321.528	8.956.846
17	308.739	1.951.993	5.938	212.200	1.519.460	300.617	9.257.463
18	318.001	2.010.553	6.086	212.200	1.562.771	281.078	9.538.541
19	327.541	2.070.869	6.239	212.200	1.607.382	262.820	9.801.361
20	337.367	2.132.995	6.395	212.200	1.653.332	245.757	10.047.118

### 8.3.2 Escenario 2

Tabla 8.8: Viabilidad económica del escenario 2. (Fuente: Elaboración Propia)

Año	VE	ER	OM	A	FC	FC desc	Acumulado
1	192.396	1.581.343	4.000	212.200	1.209.025	1.099.113	1.099.113
2	198.168	1.628.783	4.100	212.200	1.243.016	1.027.286	2.126.400
3	204.113	1.677.647	4.203	212.200	1.278.028	960.202	3.086.601
4	210.236	1.727.976	4.308	212.200	1.314.091	897.542	3.984.143
5	216.543	1.779.815	4.415	212.200	1.351.236	839.011	4.823.154
6	223.039	1.833.210	4.526	212.200	1.389.495	784.334	5.607.488
7	229.731	1.888.206	4.639	212.200	1.428.903	733.253	6.340.741
8	236.623	1.944.852	4.755	212.200	1.469.493	685.529	7.026.270
9	243.721	2.003.198	4.874	212.200	1.511.301	640.939	7.667.209
10	251.033	2.063.294	4.995	212.200	1.554.364	599.275	8.266.484
11	258.564	2.125.192	5.120	212.200	1.598.719	560.341	8.826.825
12	266.321	2.188.948	5.248	212.200	1.644.405	523.958	9.350.783
13	274.310	2.254.617	5.380	212.200	1.691.462	489.956	9.840.739
14	282.540	2.322.255	5.514	212.200	1.739.932	458.178	10.298.918
15	291.016	2.391.923	5.652	212.200	1.789.856	428.477	10.727.395
16	299.746	2.463.680	5.793	212.200	1.841.278	400.716	11.128.111
17	308.739	2.537.591	5.938	212.200	1.894.243	374.766	11.502.876
18	318.001	2.613.719	6.086	212.200	1.948.797	350.508	11.853.385
19	327.541	2.692.130	6.239	212.200	2.004.989	327.832	12.181.216
20	337.367	2.772.894	6.395	212.200	2.062.867	306.632	12.487.848

### 8.3.3 Escenario 3

Tabla 8.9: Viabilidad económica del escenario 3. (Fuente: Elaboración Propia)

Año	VE	ER	OM	A	FC	FC desc	Acumulado
1	192.396	1.824.626	4.000	212.200	1.364.726	1.240.660	1.240.660
2	198.168	1.879.365	4.100	212.200	1.403.389	1.159.826	2.400.486
3	204.113	1.935.746	4.203	212.200	1.443.212	1.084.307	3.484.792
4	210.236	1.993.818	4.308	212.200	1.484.230	1.013.749	4.498.541
5	216.543	2.053.633	4.415	212.200	1.526.479	947.823	5.446.365
6	223.039	2.115.242	4.526	212.200	1.569.996	886.222	6.332.586
7	229.731	2.178.699	4.639	212.200	1.614.818	828.657	7.161.243
8	236.623	2.244.060	4.755	212.200	1.660.986	774.862	7.936.105
9	243.721	2.311.382	4.874	212.200	1.708.539	724.587	8.660.693
10	251.033	2.380.723	4.995	212.200	1.757.519	677.600	9.338.292
11	258.564	2.452.145	5.120	212.200	1.807.969	633.682	9.971.974
12	266.321	2.525.709	5.248	212.200	1.859.932	592.632	10.564.606
13	274.310	2.601.481	5.380	212.200	1.913.455	554.260	11.118.866
14	282.540	2.679.525	5.514	212.200	1.968.585	518.390	11.637.256
15	291.016	2.759.911	5.652	212.200	2.025.368	484.857	12.122.113
16	299.746	2.842.708	5.793	212.200	2.083.855	453.508	12.575.620
17	308.739	2.927.989	5.938	212.200	2.144.098	424.198	12.999.819
18	318.001	3.015.829	6.086	212.200	2.206.148	396.795	13.396.614
19	327.541	3.106.304	6.239	212.200	2.270.060	371.173	13.767.787
20	337.367	3.199.493	6.395	212.200	2.335.890	347.215	14.115.002

**8.3.4 Escenario 4***Tabla 8.10: Viabilidad económica del escenario 4. (Fuente: Elaboración Propia)*

Año	VE	ER	OM	A	FC	FC desc	Acumulado
1	192.396	1.216.418	4.000	254.640	990.751	900.683	900.683
2	198.168	1.252.910	4.100	254.640	1.017.736	841.104	1.741.787
3	204.113	1.290.497	4.203	254.640	1.045.531	785.523	2.527.310
4	210.236	1.329.212	4.308	254.640	1.074.160	733.666	3.260.976
5	216.543	1.369.089	4.415	254.640	1.103.649	685.279	3.946.255
6	223.039	1.410.161	4.526	254.640	1.134.022	640.126	4.586.381
7	229.731	1.452.466	4.639	254.640	1.165.307	597.987	5.184.368
8	236.623	1.496.040	4.755	254.640	1.197.531	558.657	5.743.026
9	243.721	1.540.921	4.874	254.640	1.230.723	521.946	6.264.972
10	251.033	1.587.149	4.995	254.640	1.264.910	487.677	6.752.649
11	258.564	1.634.763	5.120	254.640	1.300.123	455.685	7.208.335
12	266.321	1.683.806	5.248	254.640	1.336.393	425.816	7.634.151
13	274.310	1.734.320	5.380	254.640	1.373.751	397.927	8.032.077
14	282.540	1.786.350	5.514	254.640	1.412.231	371.885	8.403.962
15	291.016	1.839.941	5.652	254.640	1.451.865	347.565	8.751.527
16	299.746	1.895.139	5.793	254.640	1.492.689	324.853	9.076.380
17	308.739	1.951.993	5.938	254.640	1.534.738	303.640	9.380.019
18	318.001	2.010.553	6.086	254.640	1.578.049	283.826	9.663.845
19	327.541	2.070.869	6.239	254.640	1.622.660	265.318	9.929.163
20	337.367	2.132.995	6.395	254.640	1.668.610	248.028	10.177.192

### 8.3.5 Escenario 5

Tabla 8.11: Viabilidad económica del escenario 5. (Fuente: Elaboración Propia)

Año	VE	ER	OM	A	FC	FC desc	Acumulado
1	191.752	1.216.418	4.000	318.300	1.013.256	921.142	921.142
2	197.504	1.252.910	4.100	318.300	1.040.229	859.693	1.780.835
3	203.429	1.290.497	4.203	318.300	1.068.011	802.413	2.583.248
4	209.532	1.329.212	4.308	318.300	1.096.628	749.011	3.332.259
5	215.818	1.369.089	4.415	318.300	1.126.102	699.221	4.031.480
6	222.293	1.410.161	4.526	318.300	1.156.462	652.793	4.684.273
7	228.961	1.452.466	4.639	318.300	1.187.733	609.495	5.293.768
8	235.830	1.496.040	4.755	318.300	1.219.942	569.112	5.862.880
9	242.905	1.540.921	4.874	318.300	1.253.118	531.444	6.394.324
10	250.192	1.587.149	4.995	318.300	1.287.289	496.306	6.890.630
11	257.698	1.634.763	5.120	318.300	1.322.486	463.523	7.354.153
12	265.429	1.683.806	5.248	318.300	1.358.740	432.936	7.787.089
13	273.392	1.734.320	5.380	318.300	1.396.081	404.395	8.191.484
14	281.594	1.786.350	5.514	318.300	1.434.543	377.760	8.569.244
15	290.041	1.839.941	5.652	318.300	1.474.159	352.902	8.922.146
16	298.743	1.895.139	5.793	318.300	1.514.964	329.700	9.251.847
17	307.705	1.951.993	5.938	318.300	1.556.994	308.043	9.559.890
18	316.936	2.010.553	6.086	318.300	1.600.285	287.825	9.847.715
19	326.444	2.070.869	6.239	318.300	1.644.876	268.950	10.116.666
20	336.237	2.132.995	6.395	318.300	1.690.804	251.327	10.367.993

### 8.3.6 Escenario 6

Tabla 8.12: Viabilidad económica del escenario 6. (Fuente: Elaboración Propia)

Año	VE	ER	OM	A	FC	FC desc	Acumulado
1	191.752	1.216.418	4.000	424.400	1.051.452	955.866	955.866
2	197.504	1.252.910	4.100	424.400	1.078.425	891.260	1.847.126
3	203.429	1.290.497	4.203	424.400	1.106.207	831.110	2.678.236
4	209.532	1.329.212	4.308	424.400	1.134.824	775.100	3.453.336
5	215.818	1.369.089	4.415	424.400	1.164.298	722.938	4.176.273
6	222.293	1.410.161	4.526	424.400	1.194.658	674.353	4.850.627
7	228.961	1.452.466	4.639	424.400	1.225.929	629.095	5.479.722
8	235.830	1.496.040	4.755	424.400	1.258.138	586.931	6.066.653
9	242.905	1.540.921	4.874	424.400	1.291.314	547.643	6.614.296
10	250.192	1.587.149	4.995	424.400	1.325.485	511.032	7.125.328
11	257.698	1.634.763	5.120	424.400	1.360.682	476.911	7.602.238
12	265.429	1.683.806	5.248	424.400	1.396.936	445.107	8.047.345
13	273.392	1.734.320	5.380	424.400	1.434.277	415.459	8.462.804
14	281.594	1.786.350	5.514	424.400	1.472.739	387.818	8.850.622
15	290.041	1.839.941	5.652	424.400	1.512.355	362.046	9.212.668
16	298.743	1.895.139	5.793	424.400	1.553.160	338.013	9.550.681
17	307.705	1.951.993	5.938	424.400	1.595.190	315.600	9.866.281
18	316.936	2.010.553	6.086	424.400	1.638.481	294.695	10.160.976
19	326.444	2.070.869	6.239	424.400	1.683.072	275.196	10.436.172
20	336.237	2.132.995	6.395	424.400	1.729.000	257.005	10.693.177

### 8.3.7 Resultados estudio sensibilidad

Con las hipótesis nominales económicas (escenario 1) se obtiene una tasa interna de rentabilidad (TIR) superior al 25%, un período de retorno inferior a 6 años y un valor actual neto (VAN) de 5,8 M€.

La estimación de la inversión está sujeta a cierta incertidumbre. Para valorar la sensibilidad de la viabilidad económica se han calculado los distintos escenarios con los resultados mostrados en la *Tabla 8.13*.

*Tabla 8.13: Resultados análisis económico de sensibilidad. (Fuente: Elaboración Propia)*

Escenario	Tarifa industrial	Inversión	VAN [€]	TIR [%]	PR [años]	C.N. [€/MWh]
<b>1</b>	<b>5,0168 c€/kWh</b>	<b>4.244.000 €</b>	<b>5.803.118</b>	<b>25,34</b>	<b>5,5</b>	<b>17,88</b>
2	6,5 c€/kWh	4.244.000 €	8.243.848	31,09	4,3	17,88
3	7,5 c€/kWh	4.244.000 €	9.871.002	34,86	3,75	17,88
4	5,0168 c€/kWh	5.092.800 €	5.084.392	21,53	7	21,42
5	5,0168 c€/kWh	6.366.000 €	4.001.993	17,55	9	26,73
6	5,0168 c€/kWh	8.488.000 €	2.205.177	13,29	13	35,58

Como se puede observar en la *Tabla 8.13* el caso más favorable de los seis propuestos es el tercer escenario en el que la inversión es la nominal y la tarifa industrial se paga a 7,5 c€/kWh. Se deja de pagar una electricidad a un precio elevado con lo que el VAN alcanza casi los 10 millones de euros con una TIR del 35% y un periodo de retorno que no llega al 20% de la vida útil del ciclo. Este panorama es muy realista ya que el precio de la energía va a subir debido al contexto en el que se encuentra España. Por otro lado se observa cómo si se dobla la inversión (escenario 6) el VAN desciende hasta casi un tercio del valor nominal y aún en esta circunstancia de que el precio de la energía no subiera con una tasa superior al IPC el proyecto seguiría siendo rentable. Esta casuística es la más desfavorable que se contempla.

## 8. Resultados

---

El CAE (Coste Anual Equivalente) se aplica tanto a los costes de combustible, como a los de operación y mantenimiento,  $C_{O\&M}$ , a las ventas e incluso a la inversión inicial.

Generalmente en proyectos de producción eléctrica se define el coste normalizado de producción eléctrica (CNE) como la suma del de combustible, el de operación y mantenimiento y el de inversión. Como se comentó en el apartado 7 del modelo económico, el combustible no influye en nuestro coste normalizado, teniendo en cuenta esto se llega a un valor entre 17,88 €/MWh en el caso más favorable. Para el caso de en el que la inversión es el doble, el coste normalizado también es cercano doble, 35,58€/MWh. Esto se debe a que la mayor parte del cálculo de este coste depende de la inversión que en este caso duplicamos para observar el estudio de sensibilidad.

## ***9. CONCLUSIONES***



En este apartado se va a realizar un balance global sobre el proyecto, tanto del trabajo realizado como de los resultados obtenidos. Estas conclusiones se van a desarrollar sobre el esquema de los objetivos marcados.

### 9.1 Conclusiones a partir de los objetivos

Volviendo al inicio del proyecto, se recuperan los objetivos marcados en un primer momento, desglosados en el apartado 1.2, para analizar su correcto cumplimiento y sus respectivas conclusiones.

#### **9.1.1 Identificar los excedentes de calor y su potencial para convertirse en energía eléctrica en una cementera.**

El proyecto comenzó con la búsqueda y lectura de bibliografía sobre cementeras. Esta documentación se desarrolló estudiando los distintos tipos de fabricación del cemento. Así como las partes de las que consta el proceso productivo.

El proceso de producción del cemento se describe en el apartado 2 en el que se puede apreciar como el proceso productivo tiene grandes excedentes térmicos provocados por la combustión que dará lugar al clínker.

Continuando con el estudio de las cementeras, el proyecto se centra en el estudio de las fuentes térmicas que más adelante serán el centro del ciclo ya que sin éstas no tendría sentido construir el ORC.

Entre estos datos que extraídos, se destaca, cómo es de su planta, en esta cementera sólo encontramos un único foco de calor al ser una cementera con horno rotatorio y enfriador de satélites.

El aire que se utiliza para enfriar el clínker se introduce en el horno para ayudar a la combustión. Como resultado se tiene un foco térmico que es los humos de escape, con una temperatura de 360°C y un flujo másico de 65 kg/s. Otro dato importante que se extrajo fueron las horas de funcionamiento de la industria, debido a trabajar continuamente, es decir, a no tener paradas diarias, se alcanza una cifra de 8016 horas (11 meses \* 24 horas). Este es un dato importante para el estudio económico ya que este número elevado de horas de funcionamiento influyen directamente en el rendimiento económico de nuestra inversión.

### **9.1.2 Análisis de las diferentes alternativas de ciclos ORC aplicables al proceso.**

Una vez visto el foco que calor, se estudió el funcionamiento de un ciclo orgánico de Rankine, así como, sus ventajas e inconvenientes con respecto a otros ciclos. Se dedicó una primera fase al estudio exhaustivo y contraste de las diferentes tecnologías disponibles con el fin de encontrar la mejor opción para el configurado final del ciclo ORC, así como familiarizarse con el entorno tecnológico aquí manejado, para permitir la realización de un proyecto más competente. En la bibliografía se pueden encontrar desglosados los artículos y publicaciones en los cuales se ha basado esta etapa imprescindible de documentación previa.

Se eligió la configuración supercrítica frente a la subcrítica y un modelo regenerado que aumenta el rendimiento del ciclo. Por último se seleccionaron los fluidos de trabajo más acordes a las condiciones de trabajo.

El análisis de los diferentes fluidos de trabajo, candidatos a ser el empleado en el ciclo, ha sido posible gracias a la herramienta informática Engineering Equation Solver, EES. Mediante su extensa base de datos, el análisis ha podido realizarse rigurosamente dado que cubre un amplio espectro de fluidos posibles. Con ayuda del mismo soporte informático, se realizó un primer modelado del ciclo, en su versión más sencilla, sin tener en cuenta pérdidas de carga. En base a este sencillo modelo, cuyo fin no era otro más que servir de base fiable para la elección del fluido más óptimo, se generó una serie de ejecuciones para diferentes fluidos seleccionados previamente en base a su curva T-s y su designación como no nocivos para la capa de ozono; pudiendo así elegir como el más adecuado aquel que ofreciera los mejores resultados. Finalmente se eligió el isopentano.

### **9.1.3 Modelado del ORC mediante EES en el punto nominal**

Se desarrollaron las distintas ecuaciones del ciclo a partir de las del ciclo de Rankine convencional. Se empezó por el más sencillo y se fueron añadiendo condiciones de trabajo, aumentando la complejidad del modelo. Este tipo de variaciones son, por ejemplo, la introducción del regenerador y las pérdidas de carga de los conductos.

Esta parte fue la que más tiempo ha llevado no sólo por la curva de aprendizaje del software EES, sino porque es la parte más delicada ya que el modelado debe ajustarse a las condiciones impuestas por la realidad de la planta.

Este modelado aparece descrito en el apartado 6 y la programación utilizada en el EES aparece en los anexos.

#### **9.1.4 Modelado del ORC punto de operación; a carga parcial y estudio del foco frío mediante estudio climatológico.**

Otra conclusión del estudio del foco de calor es que en cada día hay 3 estaciones diferenciadas de trabajo. El caudal de gases de escape varía dependiendo de los molinos que se estén usando en un determinado momento.

En una franja horaria determinada parte de los gases de escape se utilizan en el proceso de la molienda, con lo que la potencia térmica suministrada a nuestro ciclo varía al varía el caudal másico de los gases de escape. Esto tiene una serie de repercusiones que hay que estudiar a partir de un modelo de carga parcial.

Además se ha tenido que realizar un estudio teniendo en cuenta las variaciones del foco frío. La temperatura ambiente a la que se encuentra el aire en Toledo influye en la potencia entregada por nuestro ciclo. De esta manera se ensaya el modelo haciendo variar la temperatura ambiente, es decir, la temperatura del aire a la entrada del aerocondensador. Dependiendo de estas temperatura la potencia suministrada va a ser una u otra. Para una temperatura de 9°C y un gasto másico del 80% (funcionamiento de los molinos de crudo) el ciclo entrega una potencia de 3,2 MW frente a los 4 MW que entrega en condiciones del 100%.

Esta relación entre la potencia y la temperatura se introducen en Excel así como cada una de las temperaturas de un año típico en Toledo. Con estos dos datos se consigue sacar la potencia generada en cada hora y por tanto la energía producida en un año. También se añaden las etapas de funcionamiento de un día con lo que determinan los consumos eléctricos de la cementera en un año.

Se ha analizado el aprovechamiento del calor residual de una cementera con una producción de clínker de 550.000 toneladas anuales para

su posterior conversión en electricidad mediante un ciclo de cola con tecnología ORC. El ciclo diseñado es supercrítico con regeneración y emplea isopentano como fluido de trabajo, teniendo una potencia nominal de 4 MWe con un rendimiento del 26,6%. En el análisis técnico se ha tenido en cuenta el perfil horario del excedente térmico y de la demanda eléctrica, así como las condiciones ambientales que determinan el foco frío. De los resultados obtenidos se concluye en el período de máxima demanda eléctrica el ORC logra satisfacer el 80% de la misma, cubriendo el 100% el resto del tiempo y generando un excedente durante el período valle que es evacuado a red.

### **9.1.5 Analizar la viabilidad económica con un estudio de sensibilidad.**

Una vez calculada la energía eléctrica que consume la cementera en un año y la energía producida por el ORC se analizan el estudio de la viabilidad económica. Las distintas variables de producción eléctrica así como los gastos de operación y mantenimiento. Para este apartado es necesario la lectura de marco regulatorio que establece la venta de esta energía en el régimen especial. Se hace el estudio para una vida útil de 20 años.

Dada la moderada tarifa eléctrica que contempla el RD 661/2007 se opera en régimen de autoconsumo eléctrico evacuando a red sólo los excedentes. De los resultados obtenidos se deriva que el proyecto es rentable incluso ante oscilaciones imprevistas en la inversión de la planta. Por otra parte, los ingresos por venta de electricidad representan menos del 12% del total lo que hace que la rentabilidad de la inversión sea poco sensible a la variación del marco regulatorio.

## ***10. Bibliografía***



## 10. Bibliografía

---

- [1] LA AGRUPACIÓN DE FABRICANTES DE CEMENTO ARTIFICIAL DE ANDALUCÍA web site: <http://www.cementosdeandalucia.org>
- [2] INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES web site: <http://www.ieca.es>
- [3] LINARES, J.I., MORATILLA, B.Y., DIAGO LÓPEZ, M., “Recuperación de Calor de Refrigeración de un motor de gas natural mediante ciclo ORC” (Badajoz, 6-8 June 2007).
- [4] ENEKO ECHEVARRIA, M., “Economía de la utilización de Ciclos Binarios para Recuperación de Calor de baja Temperatura en una Cementera”
- [5] SIRCHIS, J. (Ed.) Energy efficiency in the cement industry. London: Elsevier, 1990. 198 p.
- [6] BÖRRNERT, T., BÜRKI, T. ABB’s flexible ORC power plant. ICR, 2010, November, pp. 75-78.
- [7] SCHUSTER, A., KARELLAS, S., KAKARAS, E., SPLIETHOFF, H. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. Applied Thermal Engineering, 2009, vol. 29, pp. 1809-1817.
- [8] INCROPERA F., Fundamentos de transferencia de calor. Edición 2004.
- [9] BUNDELA, P.S., CHAWLA, V. Sustainable development through waste heat recovery. American Journal of Environmental Sciences, 2010, vol. 6, pp. 83-89.
- [10] LINARES, J.I., MORATILLA, B.Y. “Cogeneración mediante ciclos de cola basada en tecnología ORC”, En Actas del I Congreso de Generación Distribuida GENEDIS (Madrid, 24 y 25 de noviembre de 2009). Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2009. pp. 21-26.
- [11] METEONORM web site: <http://www.meteonorm.com/pages/en/meteonorm.php>.
- [12] ALGOR Energía 2010, Madrid: Foro Nuclear, 2010, 287 p.
- [13] VANSLAMBROUCK, B., VANKEIRSBILCK, I., GUSEV, S., DE PAEPE, M. “Turn waste heat into electricity by using an Organic Rankine Cycle”, In Proceedings of 2nd European Conference on Polygeneration (Tarragona, 30th March-1st April 2011).
- [14] ÇENGEL, Y.A. Heat Transfer. A Practical Approach, Boston: McGraw-Hill, 1998, 1006 p.
- [15] KLEIN, S.A. Development and Integration of an Equation-Solving Program for Engineering Thermodynamics Courses, Computer applications in Engineering, 1993, vol.1(3), pp. 265-275.

## ***11. Anexos***



### \$Unitsystem SI bar C

```
fluido$='isopentane'
```

```
p[1]=38,5
```

```
38,5=alpha* P_Crit(fluido$)
```

```
eta_T=0,85
```

```
eta_B=0,75
```

```
sub_con=2
```

```
T_cond=33
```

```
m_dot_g=65
```

```
C_pg=1,1
```

```
T_g[2]=360
```

```
T_g[1]=150
```

```
C_pa=1,005
```

```
T_ea=9
```

```
T_sa=23
```

```
ratio=W_dot/UA_reg
```

```
PP_reg=10
```

```
PP_ev=10
```

```
deltaP[1]=0,2
```

```
deltaP[2]=0,16
```

```
deltaP[3]=0,2
```

```
deltaP[4]=0,16
```

```
deltaP[5]=0,2
```

```
deltaP[7]=0,03
```

```
deltaP[8]=0,07
```

```
deltaP[9]=0,03
```

```
deltaP[10]=0,07
```

```
deltaP[11]=0,03
```

```
duplicate i=1;12
```

```
s[i]=entropy(fluido$;p=p[i];t=T[i])
```

```
end
```

#### *"Cálculo presiones de todos los puntos"*

```
duplicate i=1;5
```

```
p[i+1]=p[i]-deltaP[i]
```

```
end
```

```
duplicate i=7;11
```

```
p[i+1]=p[i]-deltaP[i]
```

```
end
```

#### *"Pérdidas de 1 a 2"*

```
h[2]=h[1]
```

```
h[2]=enthalpy(fluido$;t=t[2];p=p[2])
```

#### *"Pérdidas de 3 a 4"*

```
h[4]=h[3]
```

```
h[4]=enthalpy(fluido$;t=t[4];p=p[4])
```

#### *"Pérdidas de 5 a 6"*

```
h[5]=h[6]
```

```
h[5]=enthalpy(fluido$;p=p[5];t=t[5])
```

*"Pérdidas de 7 a 8"*

h[8]=h[7]

h[8]=enthalpy(fluido\$;p=p[8];t=t[8])

*"Pérdidas de 9 a 10"*

h[10]=h[9]

h[10]=enthalpy(fluido\$;p=p[10];t=t[10])

*"Pérdidas de 11 a 12"*

h[12]=h[11]

h[12]=enthalpy(fluido\$;x=0;t=t[12])

x[12]=quality(fluido\$;p=p[12];h=h[12])

*"Recuperador"*

Q\_dot\_rec=m\_dot\_o\*(h[5]-h[4])

Q\_dot\_rec=m\_dot\_g\*C\_pg\*(T\_g[2]-T\_g[1])

epsilon\_rec=(T\_g[2]-T\_g[1])/(T\_g[2]-t[4])

epsilon\_rec=1-exp((1/C\_R\_rec)\*(NUT\_rec^0,22)\*(exp(-C\_R\_rec\*(NUT\_rec^0,78))-1))

deltaT\_rec\_o=T[5]-T[4]

deltaT\_rec\_g= T\_g[2]-T\_g[1]

C\_rec\_o=Q\_dot\_rec/deltaT\_rec\_o

C\_rec\_g=Q\_dot\_rec/deltaT\_rec\_g

C\_R\_rec=min(C\_rec\_o;C\_rec\_g)/max(C\_rec\_o;C\_rec\_g)

NUT\_rec=UA\_rec/min(C\_rec\_o;C\_rec\_g)

*"Turbina"*

h[6]=enthalpy(fluido\$;p=p[6];t=T[6])

*{s[6]=entropy(fluido\$;p=p[6];t=T[6])}*

eta\_T\*(h[6]-h\_s[7])=(h[6]-h[7])

h\_s[7]=enthalpy(fluido\$;p=p[7];s=s[6])

T[7]=temperature(fluido\$;p=p[7];h=h[7])

*"Regenerador"*

h[8]-h[9]=h[3]-h[2]

h[3]=enthalpy(fluido\$;t=t[3];p=p[3])

h[9]=enthalpy(fluido\$;t=T[9];p=p[9])

c\_23\*(T[3]-T[2])=(h[3]-h[2])

c\_89=(h[9]-h[8])/(T[9]-T[8])

epsilon\_reg\*c\_89\*(T[8]-T[2])=h[8]-h[9]

epsilon\_reg=1-exp((1/C\_R\_reg)\*(NUT\_reg^0,22)\*(exp(-C\_R\_reg\*(NUT\_reg^0,78))-1))

Q\_dot\_reg=m\_dot\_o\*(h[3]-h[2])

C\_reg\_a=m\_dot\_o\*c\_23

C\_reg\_b=m\_dot\_o\*c\_89

C\_R\_reg=min(C\_reg\_a;C\_reg\_b)/max(C\_reg\_a;C\_reg\_b)

NUT\_reg=UA\_reg/C\_reg\_b

*"Condensador"*

T[11]=T\_cond-sub\_con

p[11]=pressure(fluido\$;t=T\_cond;x=0)

h[11]=enthalpy(fluido\$;t=T[11];x=0)

epsilon\_cond=(t\_sa-t\_ea)/(T\_cond-t\_ea)

Q\_dot\_cond=m\_dot\_o\*(h[10]-h[11])

Q\_dot\_cond=m\_dot\_a\*C\_pa\*(T\_sa-T\_ea)

epsilon\_cond=1-exp(-NUT\_cond)

C\_cond\_a=m\_dot\_a\*C\_pa

NUT\_cond=UA\_cond/C\_cond\_a

*"Bomba"*

v[12]=volume(fluido\$;p=p[12];h=h[12])

```
h[1]-h[12]=v[12]*(p[1]-p[12])*100/eta_B
h[1]=enthalpy(fluido$,t=T[1];x=0)
```

### *"Prestaciones"*

```
w=((h[6]-h[7]) - (h[1]-h[12]))
q=(h[5]-h[4])
eta=w/q
W_dot=m_dot_o*w
```

### *"Diagramas T-Q"*

```
duplicate i=1;50
  q_o[i]=(i-1)/49
end
```

```
p_23=(p[2]+p[3])/2
p_45=(p[4]+p[5])/2
p_89=(p[8]+p[9])/2
p_1011=(p[10]+p[11])/2
```

### *"Recuperador"*

```
duplicate i=1;50
  q_o[i]=(h_oev[i]-h[4])/q
  h_oev[i]=enthalpy(fluido$,p=p_45;t=T_oev[i])
  T_gg[i]=T_g[1]+(T_g[2]-T_g[1])*(i-1)/49
  PP_evm[i]=T_gg[i]-T_oev[i]
  Q_dot_evgraf[i]=q_o[i]*m_dot_o*(h[5]-h[4])/1000
end
```

```
PP_ev=min(PP_evm[1..50])
```

### *"Regenerador"*

```
duplicate i=1;50
  q_o[i]=(h_oregAP[i]-h[2])/(h[3]-h[2])
  h_oregAP[i]=enthalpy(fluido$,p=p_23;t=T_oregAP[i])
  q_o[i]=(h_oregBP[i]-h[9])/(h[8]-h[9])
  T_oregBP[i]=temperature(fluido$,p=p_89;h=h_oregBP[i])
  PP_regm[i]=T_oregBP[i]-T_oregAP[i]
  Q_dot_reggraf[i]=q_o[i]*m_dot_o*(h[8]-h[9])/1000
end
```

```
PP_reg=min(PP_regm[1..50])
```

### *"Condensador"*

```
duplicate i=1;50
  q_o[i]=(h_ocond[i]-h[11])/(h[10]-h[11])
  t_ocond[i]=temperature(fluido$,p=p_1011;h=h_ocond[i])
  T_acond[i]=T_ea+(T_sa-T_ea)*(i-1)/49
  PP_condm[i]=T_ocond[i]-T_acond[i]
  Q_dot_condgraf[i]=q_o[i]*m_dot_o*(h[10]-h[11])/1000
end
```

```
PP_cond=min(PP_condm[1..50])
```

**\$Unitsystem SI bar C**

fluido\$='isopentane'

m\_dot\_g=65\*0,8

eta\_T=0,85

eta\_B=0,75

sub\_con=2

m\_dot\_gN=65

C\_pg=1,1

T\_g[2]=360

T[5]=247,6

C\_pa=1,005

T\_ea=25

m\_dot\_aN=1127

m\_dot\_a=m\_dot\_aN

m\_dot\_oN=32,09

deltaP\_N[1]=0,2

deltaP\_N[2]=0,16

deltaP\_N[3]=0,2

deltaP\_N[4]=0,16

deltaP\_N[5]=0,2

deltaP\_N[7]=0,03

deltaP\_N[8]=0,07

deltaP\_N[9]=0,03

deltaP\_N[10]=0,07

deltaP\_N[11]=0,03

p\_N[6]=37,58

p\_N[7]=1,903

UA\_recN=714,5

UA\_regN=1744

UA\_condN=859,5

*"Cálculo presiones de todos los puntos"*

duplicate i=1;5

deltaP[i]=deltaP\_N[i]\*(m\_dot\_o/m\_dot\_oN)^2

end

duplicate i=7;11

deltaP[i]=deltaP\_N[i]\*(m\_dot\_o/m\_dot\_oN)^2

end

duplicate i=1;5

p[i+1]=p[i]-deltaP[i]

end

duplicate i=7;11

p[i+1]=p[i]-deltaP[i]

end

*"Pérdidas de 1 a 2"*

h[2]=h[1]

h[2]=enthalpy(fluido\$,t=t[2];p=p[2])

*"Pérdidas de 3 a 4"*

$$h[4]=h[3]$$

$$h[4]=\text{enthalpy}(\text{fluido};t=t[4];p=p[4])$$

*"Pérdidas de 5 a 6"*

$$h[5]=h[6]$$

$$h[5]=\text{enthalpy}(\text{fluido};p=p[5];t=t[5])$$

*"Pérdidas de 7 a 8"*

$$h[8]=h[7]$$

$$h[8]=\text{enthalpy}(\text{fluido};p=p[8];t=t[8])$$

*"Pérdidas de 9 a 10"*

$$h[10]=h[9]$$

$$h[10]=\text{enthalpy}(\text{fluido};p=p[10];t=t[10])$$

*"Pérdidas de 11 a 12"*

$$h[12]=h[11]$$

$$h[12]=\text{enthalpy}(\text{fluido};x=0;t=T[12])$$

$$x[12]=\text{quality}(\text{fluido};p=p[12];h=h[12])$$

*"Recuperador"*

$$Q_{\text{dot\_rec}}=m_{\text{dot\_o}}(h[5]-h[4])$$

$$Q_{\text{dot\_rec}}=m_{\text{dot\_g}}C_{\text{pg}}(T_{\text{g}}[2]-T_{\text{g}}[1])$$

$$\epsilon_{\text{rec}}=(T_{\text{g}}[2]-T_{\text{g}}[1])/(T_{\text{g}}[2]-t[4])$$

$$\epsilon_{\text{rec}}=1-\exp((1/C_{\text{R\_rec}})(NUT_{\text{rec}}^{0,22})(\exp(-C_{\text{R\_rec}}(NUT_{\text{rec}}^{0,78}))-1))$$

$$\Delta T_{\text{rec\_o}}=T[5]-T[4]$$

$$\Delta T_{\text{rec\_g}}=T_{\text{g}}[2]-T_{\text{g}}[1]$$

$$C_{\text{rec\_o}}=Q_{\text{dot\_rec}}/\Delta T_{\text{rec\_o}}$$

$$C_{\text{rec\_g}}=Q_{\text{dot\_rec}}/\Delta T_{\text{rec\_g}}$$

$$C_{\text{R\_rec}}=\min(C_{\text{rec\_o}};C_{\text{rec\_g}})/\max(C_{\text{rec\_o}};C_{\text{rec\_g}})$$

$$NUT_{\text{rec}}=UA_{\text{rec}}/\min(C_{\text{rec\_o}};C_{\text{rec\_g}})$$

$$UA_{\text{rec}}/UA_{\text{recN}}=(m_{\text{dot\_g}}^{0,8}m_{\text{dot\_o}}^{0,8}(m_{\text{dot\_gN}}+m_{\text{dot\_oN}}))/(m_{\text{dot\_gN}}^{0,8}m_{\text{dot\_oN}}^{0,8}(m_{\text{dot\_g}}+m_{\text{dot\_o}}))$$

*"Turbina"*

$$h[6]=\text{enthalpy}(\text{fluido};p=p[6];t=T[6])$$

$$s[6]=\text{entropy}(\text{fluido};p=p[6];t=T[6])$$

$$\eta_{\text{T}}(h[6]-h_{\text{s}}[7])=(h[6]-h[7])$$

$$h_{\text{s}}[7]=\text{enthalpy}(\text{fluido};p=p[7];s=s[6])$$

$$T[7]=\text{temperature}(\text{fluido};p=p[7];h=h[7])$$

$$(P[6]^2-P[7]^2)/(P_{\text{N}}[6]^2-P_{\text{N}}[7]^2)=(m_{\text{dot\_o}}/m_{\text{dot\_oN}})^2$$

$$s[7]=\text{entropy}(\text{fluido};p=p[7];h=h[7])$$

*"Regenerador"*

$$h[8]-h[9]=h[3]-h[2]$$

$$h[3]=\text{enthalpy}(\text{fluido};t=t[3];p=p[3])$$

$$h[9]=\text{enthalpy}(\text{fluido};t=T[9];p=p[9])$$

$$c_{89}(T[9]-T[8])=(h[9]-h[8])$$

$$c_{23}(T[3]-T[2])=(h[3]-h[2])$$

$$\epsilon_{\text{reg}}c_{89}(T[8]-T[2])=h[8]-h[9]$$

$$\epsilon_{\text{reg}}=1-\exp((1/C_{\text{R\_reg}})(NUT_{\text{reg}}^{0,22})(\exp(-C_{\text{R\_reg}}(NUT_{\text{reg}}^{0,78}))-1))$$

$$Q_{\text{dot\_reg}}=m_{\text{dot\_o}}(h[3]-h[2])$$

$$C_{\text{reg\_a}}=m_{\text{dot\_o}}c_{23}$$

$$C_{\text{reg\_b}}=m_{\text{dot\_o}}c_{89}$$

$$C_{\text{R\_reg}}=\min(C_{\text{reg\_a}};C_{\text{reg\_b}})/\max(C_{\text{reg\_a}};C_{\text{reg\_b}})$$

$$NUT_{\text{reg}}=UA_{\text{reg}}/C_{\text{reg\_b}}$$

$$UA_{\text{reg}}/UA_{\text{regN}}=(m_{\text{dot\_o}}^{1,6}(2m_{\text{dot\_oN}}^{0,8}))/m_{\text{dot\_oN}}^{1,6}(2m_{\text{dot\_o}}^{0,8})$$

*"Condensador"*

$$T[11]=T_{\text{cond-sub\_con}}$$

```

p[11]=pressure(fluido$,t=T_cond;x=0)
h[11]=enthalpy(fluido$,t=T[11];x=0)
epsilon_cond*(T_cond-t_ea)=(t_sa-t_ea)
Q_dot_cond=m_dot_o*(h[10]-h[11])
Q_dot_cond=m_dot_a*C_pa*(T_sa-T_ea)
epsilon_cond=1-exp(-NUT_cond)
C_cond_a= m_dot_a*C_pa
UA_cond=NUT_cond*C_cond_a
UA_cond/UA_condN=(m_dot_a^0,8*m_dot_o^0,8*(m_dot_aN^0,8+m_dot_oN^0,8))/(m_dot_aN^0,8*m_dot_oN^0,8*(m_dot_a^0,8+m_dot_o^0,8))

```

*"Bomba"*

```

v[12]=volume(fluido$,x=0;t=T[12])
h[1]-h[12]=v[12]*(p[1]-p[12])*100/eta_B
h[1]=enthalpy(fluido$,t=T[1];p=p[1])

```

*"Prestaciones"*

```

w=((h[6]-h[7]) - (h[1]-h[12]))
q=(h[5]-h[4])
eta=w/q
W_dot=m_dot_o*w

```

*"Diagramas T-Q"*

```

duplicate i=1;50
  q_o[i]=(i-1)/49
end

```

```

p_23=(p[2]+p[3])/2
p_45=(p[4]+p[5])/2
p_89=(p[8]+p[9])/2
p_1011=(p[10]+p[11])/2

```

*"Recuperador"*

```

duplicate i=1;50
  q_o[i]=(h_oev[i]-h[4])/q
  T_oev[i]=temperature(fluido$,p=p_45;h=h_oev[i])
  T_gg[i]=T_g[1]+(T_g[2]-T_g[1])*(i-1)/49
  PP_evm[i]=T_gg[i]-T_oev[i]
  Q_dot_evgraf[i]=q_o[i]*m_dot_o*(h[5]-h[4])/1000
end

```

```

PP_ev=min(PP_evm[1..50])

```

*"Regenerador"*

```

duplicate i=1;50
  q_o[i]=(h_oregAP[i]-h[2])/(h[3]-h[2])
  T_oregAP[i]=temperature(fluido$,p=p_23;h=h_oregAP[i])
  q_o[i]=(h_oregBP[i]-h[9])/(h[8]-h[9])
  T_oregBP[i]=temperature(fluido$,p=p_89;h=h_oregBP[i])
  PP_regm[i]=T_oregBP[i]-T_oregAP[i]
  Q_dot_reggraf[i]=q_o[i]*m_dot_o*(h[8]-h[9])/1000
end

```

```

PP_reg=min(PP_regm[1..50])

```

*"Condensador"*

```

duplicate i=1;50

```

```
q_o[i]=(h_ocond[i]-h[11])/(h[10]-h[11])
t_ocond[i]=temperature(fluido$,p=p_1011;h=h_ocond[i])
T_acond[i]=T_ea+(T_sa-T_ea)*(i-1)/49
PP_condm[i]=T_ocond[i]-T_acond[i]
Q_dot_condgraf[i]=q_o[i]*m_dot_o*(h[10]-h[11])/1000
end

PP_cond=min(PP_condm[1..50])
```

