

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

PLANTA DE COGENERACIÓN EN UNA FÁBRICA DE CEMENTO

Alumno
Director
Departamento
Curso académico

Hasier López Ochoa de Chinchetru
Víctor de la Peña Aranguren
Máquinas y Motores Térmicos
2018/2019

<Bilbao, 25, mayo, 2019>

DATOS BÁSICOS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

- **Alumno:** Hasier López Ochoa de Chinchetru
- **Director del Proyecto:** Víctor de la Peña Aranguren
- **Título del Proyecto:** Planta de cogeneración en una fábrica de cemento
- **Resumen:** El proceso de fabricación del cemento es una actividad muy intensiva en lo que a consumo de energía se refiere y en el cual existen grandes excedentes térmicos en forma de corrientes de calor residual. Mediante este trabajo se va a estudiar la posibilidad de recuperar el calor de dichas corrientes, que actualmente no se aprovechan y que son emitidas a la atmósfera, para producir electricidad. En este proceso destacan principalmente dos fuentes de calor residual aprovechables, los gases de salida del horno que posteriormente atraviesan los precalentadores y los gases de salida del enfriador de clínker. Se estudiarán varias alternativas para llevar a cabo dicha recuperación, y el estudio irá acompañado de un análisis de rentabilidad con el objetivo de ver si es viable dicha instalación.
- **Palabras clave:** cemento, clínker, cogeneración, aprovechamiento gases residuales.
- **Laburpena:** Zementuaren fabrikazio prozesua energia-kontsumo handia suposatzen duen jarduera da, bero-korrante moduan soberakin termiko garrantzitsuak dituena. Proiektu honen bidez, hondakin-korrante horietan askatzen diren gasen beroa berreskuratuz, elektrizitatea ekoizteko aukerak aztertuko dira. Prozesu honetan, bi bero-iturri baliagarriak nabarmentzen dira: labearen ihes-gasak, geroago aurreberogailuak zeharkatzen dutenak, eta clinker hozgailuaren ihes-gasak. Bero-berreskuratze hori gauzatzeko hainbat alternatiba ikasiko dira, baita errentagarritasun-analisi bat, instalazioa bideragarria den ikusteko.
- **Gako-hitzak:** zementua, clinker, kogenerazioa, gasen hondakinen erabilera

- **Abstract:** Cement manufacturing process is an intensive activity in terms of energy consumption, in which there are important thermal surpluses as heat-waste flows. In this work, it will be studied the possibility of recovering the heat from these currents, that are not seized, to produce electricity. In this process, there are two main sources of usable heat-waste: kiln exhaust gases that later pass through the preheater and clinker cooler exhaust gases. Several alternatives will be studied to carry out this recovery, as well as a feasibility analysis in order to see if this installation is viable.
- **Keywords:** cement, clinker, cogeneration, waste heat recovery.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	11
2. CONTEXTO	12
2.1. Contexto situación actual cemento	12
2.1.1. Situación actual a nivel mundial.....	12
2.1.2. Situación actual en España.....	14
2.2. Contexto recuperación calor residual.....	17
3. OBJETIVOS Y ALCANCE.....	20
3.1. Objetivos	20
3.2. Alcance.....	20
4. BENEFICIOS	21
5. ESTADO DEL ARTE.....	22
6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO	25
6.1. Introducción al cemento.....	25
6.2. Proceso productivo del cemento.....	26
6.2.1. Extracción y trituración de las materias primas.....	27
6.2.2. Preparación de la harina	28
6.2.2.1. Prehomogenización y almacenamiento	28
6.2.2.2. Molienda de crudo y homogenización	29
6.2.3. Fabricación del clínker.....	32
6.2.3.1. Precalentador de ciclones	33
6.2.3.2. Precalcinador	34
6.2.3.3. Horno.....	35
6.2.3.4. Enfriador del clínker	36
6.2.4. Elaboración del producto final	37
6.2.4.1. Molienda de cemento	37
6.2.4.2. Almacenamiento, ensacado y expedición	38
6.2.4.2.1. Almacenamiento	38
6.2.4.2.2. Ensacado	39

6.2.4.2.3 Expedición	39
6.2.5. Almacenamiento y preparación del combustible	39
7. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EN ESTUDIO	46
7.1. Estudio energético de la planta	46
7.1.1. Consumo electricidad.....	46
7.1.2. Consumo energía térmica	47
7.1.3. Emisiones generadas.....	48
7.2. Oportunidad recuperación calor residual.....	49
8. COGENERACIÓN.....	50
8.1. Introducción a la cogeneración	50
8.1.1 Tipos de cogeneración	50
8.1.1.1 Según la secuencia generación-consumo.....	50
8.1.1.2. Según la conexión del alternador	52
8.2. Introducción de las alternativas disponibles	53
8.2.1. Ciclo Rankine	53
8.2.2 Ciclo Orgánico de Rankine.....	61
9. DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN.....	63
9.1. Caso específico de la planta en estudio.....	63
9.2. Cálculo del calor disponible en las corrientes de gases residuales	64
9.2.1. Potencial recuperación térmico en la corriente de gases de salida del precalentador	65
9.2.2. Potencial recuperación térmico en la corriente de gases de salida del enfriador del clínker	67
9.3. Alternativas para la recuperación del calor residual	69
9.3.1. Ciclo Rankine Convencional	69
9.3.2. Ciclo Orgánico de Rankine (ORC)	74
9.4. Selección de la alternativa	77
10. PLANIFICACIÓN	79
10.1. Descripción de tareas.....	79
10.2. Diagrama de Gantt.....	81

11. PRESUPUESTO.....	82
12. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD	83
13. CONCLUSIONES.....	86
REFERENCIAS	88
ANEXOS.....	89
ANEXO I: CÁLCULOS	89
ANEXO II: CATÁLOGO TURBODEN	91
ANEXO III: MARCO REGULATORIO	93

LISTA DE ACRÓNIMOS

- ORC (Ciclo Orgánico de Rankine)
- MW (Megavatio)
- kWh (Kilovatio hora)
- ACS (Agua Caliente Sanitaria)
- Cp (Calor específico)
- CSI (Cement Sustainability Initiative)
- WHR (Recuperación Calor Residual)
- IFC (International Finance Corporation)
- Mt (millones de toneladas)
- UE (Unión Europea)
- TFM (Trabajo Fin de Máster)
- VRM (Molinos de rodillos verticales)
- CaCO₃ (Carbonato cálcico)
- CaO (Óxido de calcio)
- CO₂ (Dióxido de carbono)
- NFU (Neumáticos fuera de uso)
- CDR (Combustible derivado de residuos)
- kcal (Kilocaloría)
- MJ (Megajulio)
- kg (kilogramo)
- ton (tonelada)
- EES (Engineering Equation Solver)
- TRS (Tiempo de retorno simple)

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Carga de la piedra caliza en el volquete minero	27
Ilustración 2. Nave de almacenamiento de las materias primas	28
Ilustración 3. Molino de rodillos vertical	30
Ilustración 4. Funcionamiento proceso molienda rodillos.....	31
Ilustración 5. Proceso de absorción del polvo en molinos rodillos	31
Ilustración 6. Silos de homogenización	32
Ilustración 7. Esquema general de un horno para la producción de cemento	33
Ilustración 8. Torre precalentadores de ciclones	34
Ilustración 9. Horno rotatorio (Fuente: IECA)	35
Ilustración 10. Funcionamiento enfriador clínker (Fuente: IECA)	37
Ilustración 11. Descripción molienda de cemento (Fuente: IECA)	37
Ilustración 12. Aspecto exterior molino de bolas.....	38
Ilustración 13. Ensacadora rotativa	39
Ilustración 14. Coque de petróleo	40
Ilustración 15. Silos de almacenamiento del combustible molido.....	41
Ilustración 16. Neumáticos troceados.....	42
Ilustración 17. Esquema cogeneración ciclo de cabecera.....	51
Ilustración 18. Esquema cogeneración ciclo de cola	51
Ilustración 19. Esquema cogeneración sistema aislado	52
Ilustración 20. Esquema cogeneración sistema integrado.....	52
Ilustración 21. Ciclo Rankine.....	53
Ilustración 22. Ciclo ORC.....	61
Ilustración 23. Balance energético ORC	62
Ilustración 24. Esquema recuperación calor residual Ciclo Convencional de Rankine (Fuente: IFC)	69
Ilustración 25. Ciclo Rankine de vapor	70
Ilustración 26. Esquema recuperación calor ORC (Fuente: IFC).....	75
Ilustración 27. Unidad compacta Turboden	78

Ilustración 29. Catálogo Turboden 92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Balance térmico en la producción del clínker.....	18
Tabla 2. Sistemas ORC Turboden instalados para la industria del cemento.....	24
Tabla 3. Demanda eléctrica anual	47
Tabla 4. Balance térmico planta cementera.....	47
Tabla 5. Consumo de combustible	48
Tabla 6. Emisiones CO ₂ anuales directas emitidas	48
Tabla 7. Emisiones CO ₂ anuales debidas al consumo eléctrico.....	49
Tabla 8. Emisiones de CO ₂ anuales totales.....	49
Tabla 9. Porcentaje gases salida sistema ciclones.....	65
Tabla 10. Porcentaje gases salida enfriador del clínker	67
Tabla 11. Estados del ciclo Rankine	73
Tabla 12. Resultados simulación	73
Tabla 13. Tareas para la consecución del proyecto	79
Tabla 14. Desglose del presupuesto.....	82
Tabla 15. Energía eléctrica anual generada.....	83
Tabla 16. Ahorro bruto anual	84
Tabla 17. Análisis rentabilidad.....	85
Tabla 18. Ahorro emisiones de CO ₂ asociadas a la energía eléctrica.....	85

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Evolución de la demanda global del cemento (Fuente: International Cement Review)	12
Gráfica 2. Distribución de la producción mundial del cemento (Fuente: CEMBUREAU)	13
Gráfica 3. Producción de cemento en el periodo 2000-2016 (Fuente: OFICEMEN)	14
Gráfica 4. Consumo aparente de cemento en España (Fuente: OFICEMEN)	15
Gráfica 5. Evolución del cemento en España (Fuente: OFICEMEN)	16
Gráfica 6. Capacidad instalada y potencial de instalación de la tecnología WHR.....	19
Gráfica 7. Diagrama T-s	56
Gráfica 8. Aumento de la presión de la caldera	58
Gráfica 9. Reducción de la presión en el condensador	59
Gráfica 10. Ciclo Rankine con sobrecalentamiento.....	60
Gráfica 11. Ciclo Rankine con recalentamiento	60
Gráfica 12. Diagrama T-s	73
Gráfica 13. Diagrama de Gantt	81

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo viene motivado por la necesidad de optimizar y aprovechar los excedentes térmicos existentes en el proceso de fabricación del cemento, ya que una parte de la gran energía térmica consumida para la producción del clínker no es aprovechada y sale en forma de gases, que son emitidos a la atmósfera. Por ello, en la industria cementera existe un elevado potencial para la generación eléctrica a partir de los calores residuales del proceso de fabricación del cemento. Ese calor residual se puede convertir en energía eléctrica que cubra parcialmente la demanda eléctrica (se estima que con un apropiado sistema de recuperación de gases residuales se puede cubrir del 20 al 30 % del total de la demanda eléctrica de la planta), lo que supondría una gran cifra, ya que la industria cementera es una energía muy intensiva en lo que respecta al consumo energético.

En primer lugar, se describirá el contexto actual en el que se encuentra inmerso el sector del cemento, en lo que a datos se refiere respecto a la fabricación del mismo, previsión de futuro..., tanto a nivel nacional como internacional.

Posteriormente, se describe detalladamente el proceso de fabricación del cemento, con el objetivo de conocer en profundidad las diferentes etapas del mismo, así como cada uno de los diferentes equipos que lo componen. Cabe destacar que, a través de la descripción del proceso productivo, se van a identificar las corrientes de gases residuales, que van a ser aprovechadas con el objetivo de la generación de electricidad.

Más adelante, se introducirán las posibles alternativas existentes para la recuperación de las corrientes de gases residuales; el ciclo Rankine y el ORC. Estudiando cada alternativa para el caso concreto de este trabajo, se seleccionará la tecnología óptima.

Además, se incluirá el presupuesto del proyecto y un diagrama de Gantt en el que se muestran la duración de las diferentes tareas necesarias para llevarlo a cabo.

Se terminará el estudio con un análisis de rentabilidad, estudiando la viabilidad del proyecto y calculando el tiempo de retorno de la inversión.

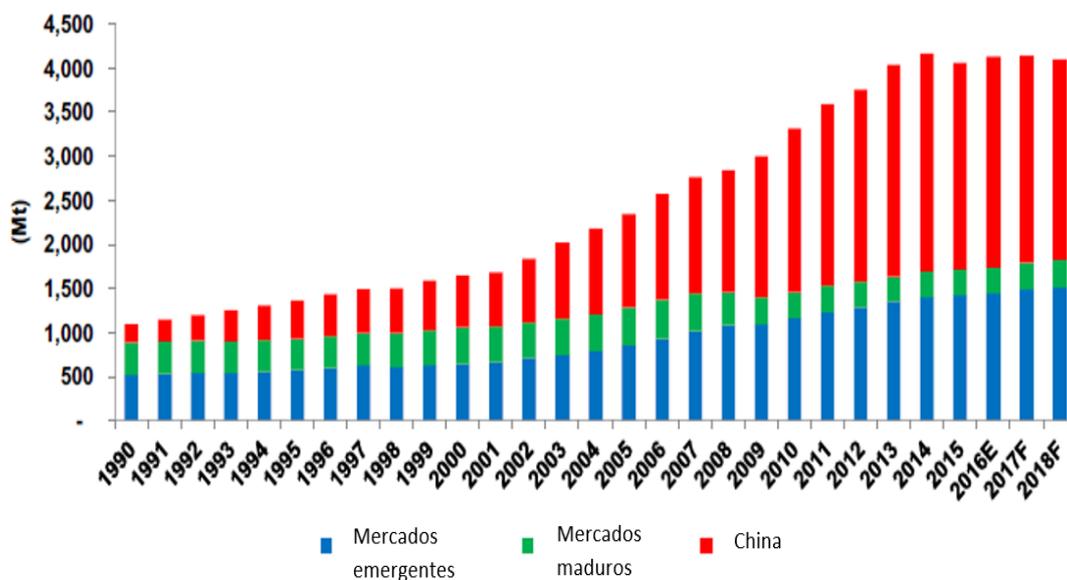
Finalmente, se expondrán las conclusiones extraídas tras la realización del trabajo.

2. CONTEXTO

2.1. Contexto situación actual cemento

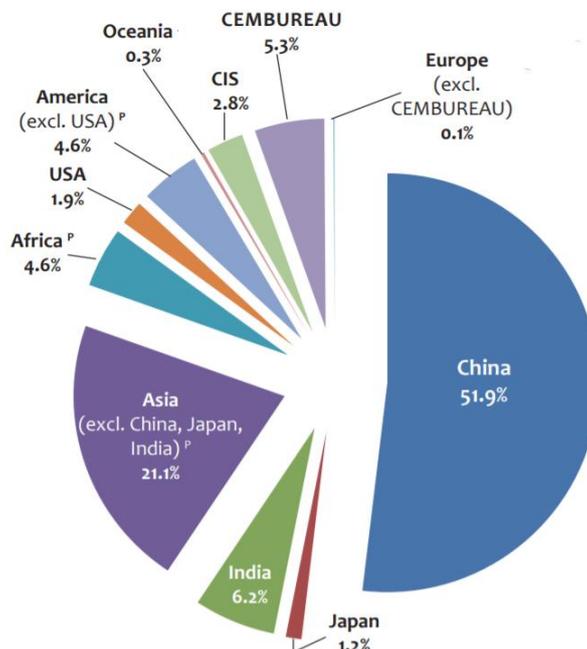
2.1.1. Situación actual a nivel mundial

El cemento es el principal componente del hormigón, material que lleva años utilizándose en la construcción debido a sus características de material resistente y duradero. El hormigón es el material más utilizado después del agua en el planeta o, dicho de otro modo, el material fabricado (no natural) con mayor consumo. Es por ello que el consumo mundial del cemento no ha dejado de crecer desde 1990, como se puede apreciar en la gráfica 1. En dicha gráfica se puede observar como el incremento de la demanda se encuentra de forma mayoritaria en China (58%)^[1], fruto de su aumento de población (un 17% desde 1990 hasta la actualidad) y en consecuencia del uso del hormigón en la construcción de viviendas e infraestructuras. También se puede observar un notable incremento de la demanda en los países emergentes, en los que se han llevado a cabo nuevas construcciones, así como una importante subida del sector industrial que también influye de forma directa en dicha demanda.



Gráfica 1. Evolución de la demanda global del cemento (Fuente: International Cement Review)

Para satisfacer las demandas de la sociedad, la producción de cemento ha ido incrementando linealmente con la demanda a lo largo de los años. Actualmente se estima que la producción de cemento es de 4,65 mil millones de toneladas. Si se divide en porcentaje por país, la producción mundial de cemento queda repartida de la siguiente forma: China 52%, India 6.2%, EU 5.3%. EE. UU. 1,9% y luego Turquía, Indonesia, Brasil, Rusia, Corea del Sur y Arabia Saudí [2]. Destaca de manera significativa China como país con mayor producción de cemento a nivel mundial, de igual manera que destacaba en la gráfica 1, como país con mayor demanda. Comparando el porcentaje de la demanda por países del cemento con el porcentaje de la producción se puede ver que hay cierta similitud. Esto es debido a que normalmente en la industria del cemento los costes de transporte son bastante significativos, por lo que las cementeras suelen estar próximas a los puntos de demanda. Aún así, actualmente cada vez son más los países que también apuestan por la exportación del cemento producido, para así compensar la falta de demanda que puede haber en el país fruto de la ausencia de construcción e inversiones en infraestructuras, factores que afectan directamente a la demanda del cemento.



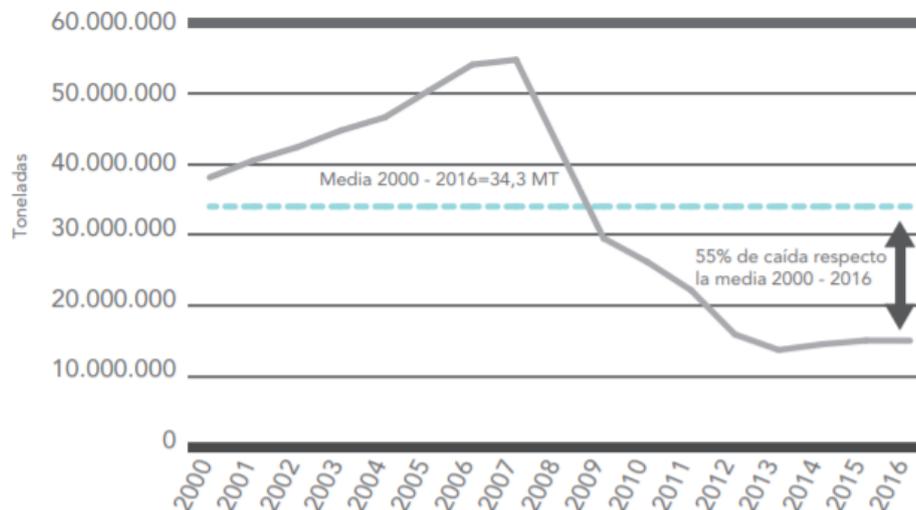
Gráfica 2. Distribución de la producción mundial del cemento (Fuente: CEMBUREAU)

2.1.2. Situación actual en España

Actualmente, el sector del cemento en España se encuentra en un estado de baja actividad, comenzando a recuperarse lentamente de la mayor crisis de su historia industrial, crisis que ha provocado que el consumo del cemento en España haya caído hasta niveles registrados en los años 60 del siglo pasado.

El sector cementero español está formado por nueve grupos empresariales y 33 fábricas integrales y tiene una capacidad de producción de clínker de 32,5 millones de toneladas al año ^[3].

La producción de cemento en 2016 cayó a volúmenes anteriores al año 1970. Concretamente, la producción de 2016 fue un 55% inferior a la media comprendida entre el periodo de los años 2000-2016 (ver gráfica 3). El consumo de cemento en España en la actualidad se sitúa alrededor del 40% del consumo medio de la década de los 90, y del 25% del consumo medio de la década de los 2000 ^[3].

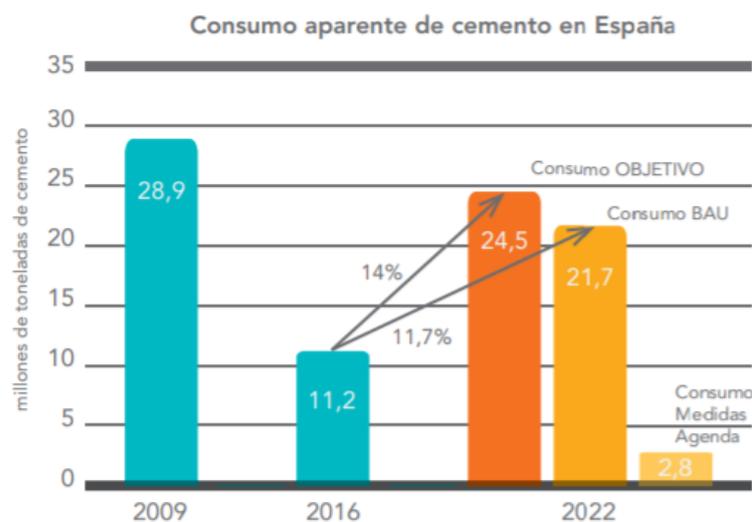


Gráfica 3. Producción de cemento en el periodo 2000-2016 (Fuente: OFICEMEN)

A pesar de ello, el sector cementero se ha mantenido como un sector referente en el que invertir, convirtiéndose, además, en el primer exportador de cemento de la Unión Europea y en el octavo del mundo.

Por su fuerte carácter local, la industria cementera se ha mantenido también como un potente motor de creación de empleo estable y de calidad sobre todo en el ámbito rural.

En diciembre de 2018, el Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, en colaboración con OFICEMEN y G-ADVISORY desarrollaron: “La Agenda Sectorial del Sector Cementero Español”, que recoge una serie de medidas de actuación con el objetivo de producir una reactivación del sector cementero, avanzando así en la mejora de la competitividad, y fortaleciendo una industria clave como es la industria cementera en España, con un alto valor estratégico para el país, además del impacto que genera esta industria sobre el resto de la economía. El objetivo a largo plazo del sector cementero español es recuperar un nivel de producción anual estable de 30 Mt (niveles del año 2009), mantener la posición de liderazgo en las exportaciones a nivel europeo e impulsar la competitividad fuera del continente.

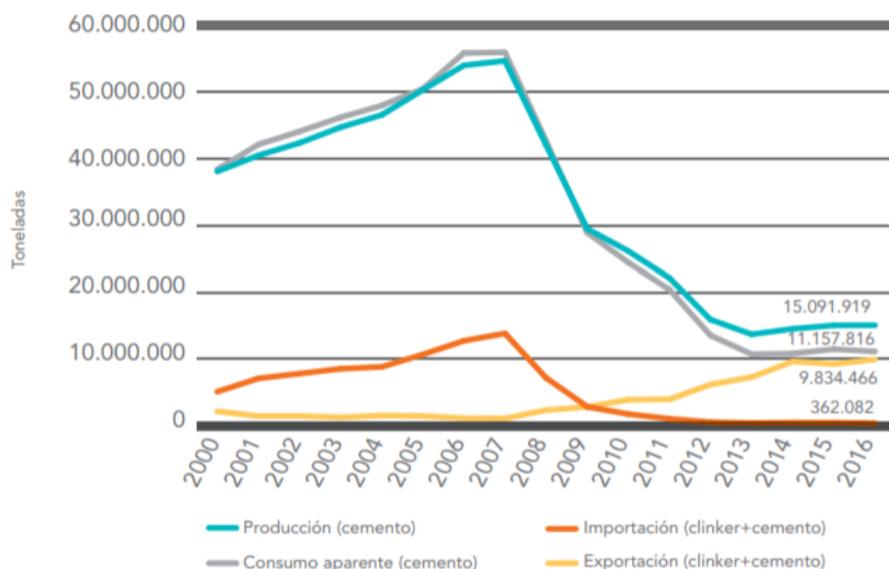


Gráfica 4. Consumo aparente de cemento en España (Fuente: OFICEMEN)

En dicha “Agenda Sectorial”, destacan principalmente tres tipos de objetivos: estratégicos, ambientales y sociales. Los principales objetivos estratégicos serán el impulso a la recuperación de la economía, la reactivación del sector cementero, la reducción del gasto público y el incremento de la competitividad internacional. En el plano ambiental, el objetivo primordial será contribuir a la economía circular y cumplir con la sostenibilidad ambiental. En el social, claramente, la creación de empleo.

Así, para el 2022 se prevé un consumo de cemento conforme un escenario tendencial (Business As Usual o BAU) de 21,7 millones de toneladas (ver gráfica 4) que junto con 2,8 millones de toneladas de consumo adicional procedente de las medidas adicionales de la Agenda Sectorial permitirán la consecución de un consumo nacional total de 24,5 millones de toneladas de cemento, equivalente a un crecimiento promedio del 14,0% en el periodo 2016-2022 (frente al 11,7% del BAU) [3].

En la gráfica 5 se resume la distribución geográfica de la capacidad productiva en España y la reciente evolución del sector, donde se aprecia claramente el crecimiento continuado en la primera parte de este siglo, seguido de una acentuada caída a partir del año 2008 como consecuencia de la crisis económica sufrida recientemente en España.



Gráfica 5. Evolución del cemento en España (Fuente: OFICEMEN)

En la gráfica 5, se puede observar como la caída de la producción del cemento en España, va acompañada de una continua subida de la exportación del cemento. En la actualidad, el sector cementero español exporta aproximadamente 9 millones de toneladas, que supone el 50% de su producción. Este volumen de exportación sitúa a España como el octavo mayor exportador a nivel mundial y el primer exportador de la UE, tal y como se ha señalado anteriormente. En el entorno de la UE, España representa más del 30% del total de las exportaciones que se realizan a países de fuera de la UE, situándose nuevamente como primer país exportador a nivel extracomunitario.

2.2. Contexto recuperación calor residual

En la actualidad, los elevados precios de la energía eléctrica inciden directamente en las actividades de las plantas cementeras debido al gran consumo energético necesario para la fabricación del cemento. Este hecho, sumado a la necesidad de aumentar la eficiencia energética de los procesos industriales, han aumentado la importancia de las aplicaciones de recuperación de calor para procesos industriales.

En un gran número de procesos industriales se producen pérdidas de energía en forma de calor residual. Hasta hace unos años, eran pocos los procesos en los que se planteaba una recuperación de dicho calor. Dicho calor suele encontrarse disponible en corrientes de gases, agua... El método de recuperación más sencillo desde un punto de vista técnico y económico, y que mayor rendimiento tiene, es la recuperación directa, aprovechar esa corriente de gases caliente para precalentar algún paso previo del proceso de fabricación, como, por ejemplo, el secado de la materia prima, o una demanda de agua caliente concreta en la fábrica. Sin embargo, en algunas situaciones no existe esa demanda o el flujo de calor residual es demasiado grande y sigue sobrando calor residual. En estos casos se plantea la recuperación de dicho calor para la generación de electricidad mediante diferentes alternativas, como el Ciclo de Rankine, o el cada vez más usado en la actualidad para este tipo de aplicaciones, el ORC.

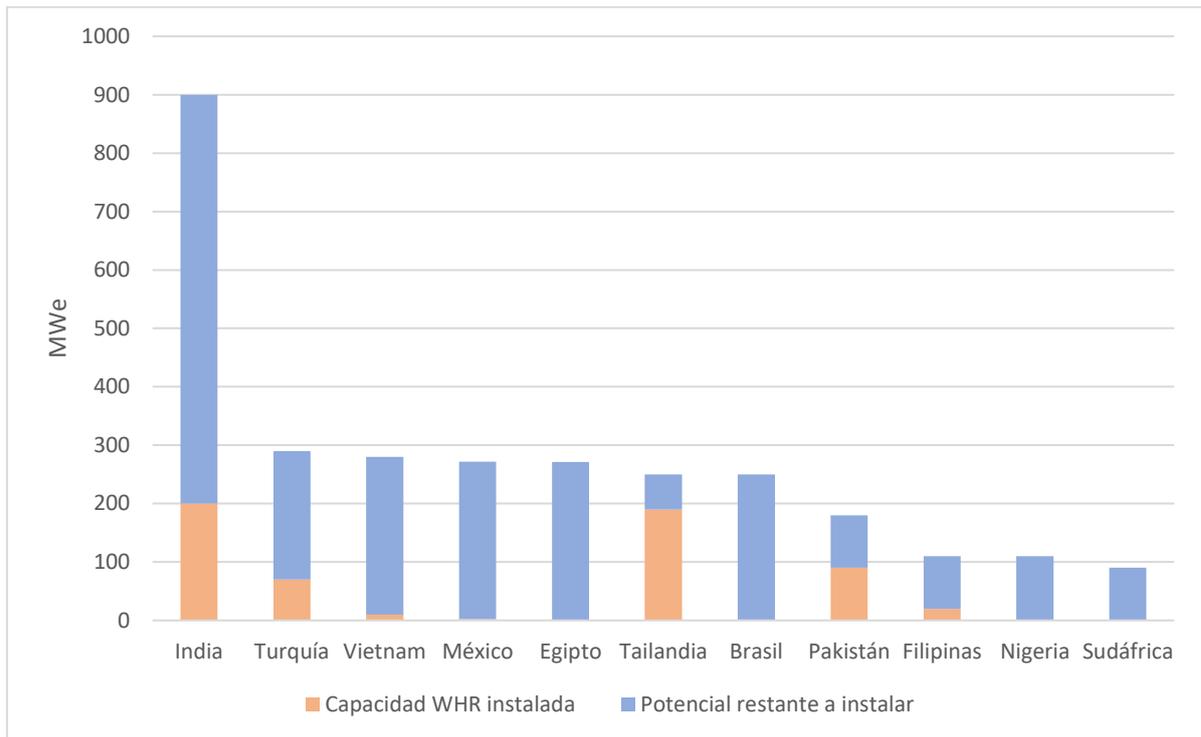
En un proceso típico de producción de cemento, solo alrededor del 53% de la energía térmica es absorbida por el proceso. Del 43% del calor perdido, alrededor del 35% puede ser recuperado con suficiente capacidad como para ser capaz de abastecer electricidad mediante una instalación adecuada generalmente entre un 20-30 % de la demanda energética de la planta ^[4]. En la tabla 1, se puede observar el balance térmico correspondiente para la producción del clínker.

Tabla 1. Balance térmico en la producción del clínker

	Porcentaje (%)
Calor absorbido por el proceso	53
Pérdidas de calor gases precalentador	21
Pérdidas de calor gases de salida enfriador del clínker	13
Pérdidas por las paredes	11
Calor perdido en forma de clínker	2
TOTAL	100

A pesar de que la recuperación de calor residual (WHR) es una tecnología probada y que cuenta con un amplio número de instalaciones en uso, todavía no es una tecnología lo suficientemente rentable en muchas aplicaciones y a pesar de sus beneficios, no ha sido extensamente implantada hasta la fecha, excepto en China. De acuerdo con el IFC (International Finance Corporation), hay alrededor de 850 cementeras con sistema de recuperación de calor residual, de las cuales en China están 739, utilizando la mayoría de ellas el Ciclo convencional de Rankine (utilizando vapor como fluido de trabajo), como sistema de aprovechamiento para la generación de electricidad.

Según el IFC, el potencial de mercado para la WHR en la industria del cemento en los 11 países con mayor potencial se estima en 5 mil millones de dólares o 2GWe instalados. India cuenta con 1.400 millones de este potencial por sí misma. La eficiencia energética en la industria del cemento de la India ya es alta, pero la hoja de ruta guiada por el CSI (Cement Sustainability Initiative) es muy ambiciosa. Sugiere un objetivo de reducir las emisiones en un 45% para el año 2050. Turquía, Vietnam, México, Egipto y Brasil también son mercados muy interesantes en términos de potencial WHR. En todos estos países, el aprovechamiento de los calores residuales es una herramienta muy importante para conseguir dicho objetivo. En la gráfica 6 se puede ver el alcance del potencial de futuras instalaciones, según el IFC^[5].



Gráfica 6. Capacidad instalada y potencial de instalación de la tecnología WHR

Observando la gráfica 6, se puede concluir que la recuperación de calor residual va a tener un papel muy importante en el futuro, ya que van a ser muchos los países que van a apostar por esta tecnología con el objetivo de incrementar la eficiencia energética de las diferentes plantas cementeras.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE

3.1. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la posibilidad de introducir un sistema de cogeneración de cola (recuperación de calor residual), aprovechando los grandes excedentes térmicos de la industria cementera que salen en forma de gases calientes directamente a la atmósfera y su posterior transformación en energía eléctrica. De esta forma, se pretende disminuir la demanda eléctrica y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Mediante el desarrollo del trabajo se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

- Adquirir conocimientos acerca de la industria del cemento.
- Poner en práctica los conceptos teóricos que han sido impartidos a lo largo del Máster relacionados con la Cogeneración y generación eléctrica y aplicarlos para este trabajo en concreto.
- Analizar el proceso productivo del cemento y los diferentes equipos que la componen, para así intentar localizar puntos de mejora con respecto a la eficiencia energética.
- Comparar las diferentes alternativas existentes para realizar dicha recuperación y seleccionar la óptima para el caso en estudio, realizando su dimensionamiento.
- Analizar si la solución propuesta es viable desde el punto de vista económico.

3.2. Alcance

Tras describir el proceso productivo, se seleccionarán las corrientes de gases residuales para llevar a cabo la recuperación. Se calculará el potencial térmico de dichas corrientes y se seleccionará, mediante la comparación de dos tecnologías existentes (Ciclo de Rankine y Ciclo Orgánico de Rankine), la tecnología óptima para el caso en estudio en este TFM. Una vez seleccionada la tecnología a utilizar para llevar a cabo la recuperación, se dimensionarán los equipos y se estimará la capacidad de generación eléctrica de la instalación. Por último, se realizará un estudio económico, visualizando el tiempo de retorno de la inversión necesaria, con el objetivo de ver si la instalación propuesta en este trabajo es realmente rentable.

4. BENEFICIOS

Con la implantación de un sistema de recuperación de calor residual se buscan varios beneficios:

- La recuperación del calor disponible de las corrientes de los humos procedentes del horno y del enfriador del clínker que, si por el contrario no son recuperados, son emitidos directamente por las chimeneas a altas temperaturas a la atmósfera, desaprovechando los grandes excedentes térmicos disponibles y favoreciendo la emisión de CO₂ y de gases de efecto invernadero. Por lo que, con este sistema, se mejorará la eficiencia energética del proceso productivo, favoreciendo a su vez la reducción de emisiones desde el punto de vista medioambiental.
- Además, a través de la alternativa seleccionada para llevar a cabo dicha recuperación, se producirá energía eléctrica con la que en principio se conseguirá generar alrededor del 20-30% de la demanda eléctrica de la planta. Esta es una cifra a tener en cuenta ya que, como se ha comentado en apartados anteriores, la industria cementera es una industria muy intensiva respecto al consumo de energía eléctrica. Además, esta disminución en la demanda eléctrica también afecta al primer punto destacado en este apartado, el medioambiental, ya que, al verse reducido el consumo eléctrico, también se verán reducidas las emisiones de CO₂ asociadas a la compra de la electricidad.

5. ESTADO DEL ARTE

Fueron las compañías japonesas las que introdujeron la tecnología de recuperación de calores residuales mediante el ciclo de Rankine de vapor. En 1980, Kawasaki Heavy Industries instalaron la primera instalación de recuperación de calor residual (WHR) en operación en Sumitomo Osaka Cement. Fue en 1998, cuando en China se instaló la primera instalación de WHR, en colaboración con un suministrador japonés. Las políticas gubernamentales respecto a la reducción de la contaminación y el Clean Development Mechanism (CDM), acuerdo introducido con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, incentivaron la instalación de esta tecnología en el país asiático, tanto que en el año 2012 eran 700 las plantas cementeras que contaban con esta tecnología. Además, se introdujo una nueva medida que obligaba a todas las líneas de producción de clínker, en dicho país asiático a partir de enero de 2011 de disponer del sistema WHR. Muchos de los primeros sistemas instalados en China, India, Pakistán y Tailandia, recibieron subvenciones del CDM. En estos países la tecnología seleccionada para dicha recuperación fue el ciclo de Rankine utilizando vapor como fluido de trabajo.

La apuesta por la utilización de sistemas cuyo fluido de trabajo no sea vapor, se ha visto apoyada sobre todo en Europa y Estados Unidos, donde los rendimientos de los hornos tienden a ser mayores y las capacidades de producción menores, consecuentemente se alcanzan temperaturas más bajas a la salida del horno, cuyos valores generalmente no son suficientes para la recuperación con vapor, teniendo que buscar otras alternativas, como el ciclo Orgánico de Rankine (ORC), que utiliza un fluido orgánico de gran peso molecular, y está diseñado para recuperar calores residuales de baja temperatura .

A pesar de que actualmente la recuperación de calor residual mediante vapor representa aproximadamente el 96% de la tecnología WHR ^[5] cada vez con más frecuencia se está apostando por la recuperación mediante ORC, debido a que es una aplicación apropiada para la recuperación de gases a baja temperatura, en contra del vapor que únicamente tiene sentido su aplicación con temperaturas mínimas de alrededor de 300°C. Por lo que esta última reseña, puede suponer un gran problema, debido a la gran variabilidad de los humos de las plantas cementeras, disminuyendo en determinados momentos su temperatura por debajo de las temperaturas deseadas y ocasionado grandes problemas en

la instalación, cómo puede ser la erosión de los álabes de las turbinas, entre otros, que se detallarán en profundidad en capítulos posteriores.

Son varias las empresas que han apostado por intentar llevar a cabo la idea de recuperación del calor residual a través del ORC. Turboden, ABB, Ormat o la francesa Aqylon, son impulsoras de esta tecnología.

Actualmente, hay 2 ciclos ORC Ormat instalados; uno en la planta de Heidelberg en Lengfurt (Alemania), y otro en Ultra Tech Cement, en India, de 4.8 MW

Respecto a ABB, tiene instalados 2 sistemas ORC, ambos en Suiza, uno de 1.9 MW en Holcim's Untervaz, y otro de 2 MW en Juás Wildegg AG.

Sin embargo, actualmente Turboden, empresa italiana comprada por Mitsubishi en 2012, es la empresa que, sin duda, más avanzada está respecto a la tecnología ORC, habiendo desarrollado unidades compactas con una capacidad de generación eléctrica de hasta 20 megavatios.

Respecto al caso concreto de estudio en este trabajo, la recuperación de calor residuales (WHR), Turboden ha instalado un total de 33 instalaciones en diferentes tipos de industrias, de los cuales, para el caso en estudio, las plantas cementeras, han sido ocho, dos de ellas, se encuentran actualmente en construcción. En la tabla 2, se puede observar con más detalle cada una de las diferentes instalaciones que han sido llevadas a cabo.

Tabla 2. Sistemas ORC Turboden instalados para la industria del cemento

Planta	Lanzamiento	País	Capacidad producción de clínker (ton/día)	Fluido intermedio	Capacidad generación eléctrica
CIMENTS DU MAROC	2010	Marruecos	5.000	Aceite térmico	2 MWe
HOLCIM ROMANIA	2012	Rumanía	4.000	Aceite térmico	4 MWe
CRH SLOVAKIA	2014	Eslovaquia	3.600	Aceite térmico	5 MWe
CARPAT CEMENT	2015	Rumanía	3.500	Aceite térmico	3,8 MWe
JURA-CEMENT-FABRIKEN	2016	Suiza	3.000	Agua sobrecalentada	2,3 MWe
CEMENTI ROSSI	2018	Italia	3.500	Ninguno (intercambio directo)	2 MWe
ÇİMKO CEMENT	2010	Marruecos	5.000	Aceite térmico	2 MWe
CIMENTS DU MAROC	2010	Marruecos	5.000	Aceite térmico	2 MWe

Se puede observar como la mayoría de ellas utilizan un aceite térmico como sustancia intermedia entre el sistema de recuperación de gases y el ciclo ORC (se verá detalladamente en los siguientes capítulos). Sin embargo, últimamente el interés está puesto en reducir dicha instalación, e intentar llevar a cabo dicha recuperación directamente sin ningún fluido intermedio, como es el caso de Cementi Rossi, aunque para que sea viable la instalación de este tipo concreto de recuperación se tienen que dar una serie de circunstancias que se verán en profundidad más adelante. Destacar, que actualmente, la mayor capacidad de generación eléctrica instalada se encuentra en la planta CRH en Eslovaquia, con una capacidad de producción de cinco megavatios eléctricos.

6. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO

6.1. Introducción al cemento

Según el IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones), el cemento se define como “un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.”. 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 preparación de un cemento comercial requiere la fabricación de clínker, un producto granulado de entre 3 y 4 cm obtenido por la calcinación de caliza y arcilla. Este material finamente molido y con las adiciones oportunas, constituye el núcleo-cemento, al que es preciso añadir, en la mayoría de los casos, un regulador de fraguado y, eventualmente, ciertos aditivos para formar el cemento.

De todos los conglomerantes hidráulicos, el cemento portland y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso, que son minerales muy abundantes en la naturaleza, ser su precio relativamente bajo en comparación con otras soluciones alternativas y tener unas propiedades adecuadas para las metas que deben alcanzar.

Los cementos se emplean, fundamentalmente, para elaborar morteros y hormigones. La mezcla del cemento con agua y áridos da lugar al hormigón, aplicación principal del uso del cemento. Por el contrario, si la mezcla del cemento se hace con agua y arena da lugar al mortero.

El hormigón es el elemento más consumido del planeta después del agua, es el material más empleado en la industria de la construcción, y su empleo es habitual en obras de arquitectura e ingeniería, tales como edificios, puentes, diques, puertos, canales o túneles.

6.2. Proceso productivo del cemento

Los dos principales procesos que se emplean en la fabricación del cemento actualmente son el proceso seco y el proceso húmedo. La diferencia fundamental entre estos dos métodos reside en la forma en que se procesan los materiales con anterioridad a su entrada en el horno de clínker, que pueden estar con distinto grado de humedad.

- Proceso de vía seca: la materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverulenta. El sistema del horno está formado por una torre de ciclones con el objetivo de que los gases de salida del horno la atraviesen y así se produzca un intercambio de calor entre la materia previo a la entrada al horno y dicha corriente de gases, produciéndose un precalentamiento de dicha materia. El proceso de descarbonatación de la caliza (calcinación) puede estar casi completado antes de la entrada del material en el horno si se instala una cámara de combustión a la que se añade parte del combustible (precalcinador).
- Proceso de vía húmeda: este proceso se utiliza generalmente para materias primas cuyo contenido en humedad es alto. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta del mismo con agua, resultando una pasta con un contenido de agua de un 30-40 % que es alimentada en el extremo más elevado del horno de clínker.

Los procesos húmedos consumen más energía, lo que desencadena finalmente en un mayor coste de producción del cemento. El proceso de vía seca está probado como el más eficiente energéticamente, requiriendo hasta un 50% menos de energía que el proceso de vía húmeda. Las plantas que emplean procesos húmedos, generalmente lo hacen debido a que el acceso que tienen es a materias primas húmedas. En España, la gran mayoría de las cementeras (93%) emplea el proceso por vía seca.

En este trabajo se va a estudiar el proceso de fabricación del cemento mediante el proceso de vía seca.

El proceso de fabricación del cemento se va a dividir en las siguientes etapas:

1. Extracción y trituración de las materias primas
2. Preparación de la harina
3. Fabricación del clínker
4. Preparación del producto final

Además, se dedicará un quinto apartado destinado a la explicación de las diferentes opciones de combustibles a utilizar, así como su almacenamiento.

6.2.1. Extracción y trituración de las materias primas

Es necesario que las cementeras estén situadas estratégicamente, cerca de las canteras de piedra caliza y arcilla, materias primas indispensables para la fabricación del cemento.

El proceso de fabricación del cemento comienza con la extracción de las materias primas, que normalmente se encuentran disponibles en canteras a cielo abierto. Para la extracción de las materias primas, dependiendo de la naturaleza de los materiales se opta por unos medios u otros. Para materiales duros, tal como calizas o pizarras, normalmente se explotan las canteras mediante voladuras controladas. Sin embargo, ante materias primas de una naturaleza más blanda (arcillas o margas), para la extracción de las mismas suelen utilizarse excavadoras. Una vez ha sido extraído el material, mediante el uso de una pala cargadora o una excavadora, se carga los fragmentos de piedra caliza depositada tras la detonación, en unos camiones o volquetes mineros (mirar ilustración 1), para transportar la caliza a la trituradora o también llamada machacadora.



Ilustración 1. Carga de la piedra caliza en el volquete minero

Los volquetes mineros transportan la piedra caliza a la trituradora, con el objetivo de obtener una granulometría adecuada para el producto de molienda, ya que el tamaño de la caliza es demasiado grande, esta primera operación, se conoce como trituración primaria. Tras la correspondiente trituración, la caliza sale con un tamaño aproximado de entre unos 10-15 centímetros. Seguidamente y tras verificar su composición química, pasa a la trituración secundaria, en la que su tamaño se ve reducido aproximadamente a unos 40 milímetros. Posteriormente es transportada a la fábrica mediante cintas transportadoras o camiones. Para el caso de la cantera de arcilla se actúa de forma similar.

6.2.2. Preparación de la harina

6.2.2.1. Prehomogenización y almacenamiento

Una vez llega la materia prima procedente de las correspondientes canteras, es almacenada en un almacén de prehomogenización, se almacena en capas uniformes para posteriormente ser seleccionado de forma controlada. La alimentación de las materias primas al horno necesita ser lo más homogénea posible desde el punto de vista de su composición química, esto se logra controlando la alimentación a la planta de molienda de crudo.



Ilustración 2. Nave de almacenamiento de las materias primas

La prehomogenización permite preparar la dosificación adecuado de los diferentes componentes, reduciendo así su variabilidad.

Este proceso se realiza, si las materias primas que se obtienen de las canteras no presentan la misma calidad o no tienen una composición química regular, entonces se realiza un proceso de prehomogenización para solucionar este problema, apilando los materiales en capas longitudinales o circulares en función de las plantas cementeras, para después extraerlo utilizando secciones transversales de toda la pila almacenada. Con la prehomogenización se reducen las diferencias en la composición de los materiales almacenados. Además, de la caliza y la arcilla, dependiendo de los minerales presentes de forma natural en la roca triturada, y la composición deseada, se analiza dicha composición y se le añaden minerales extra en caso de que sea necesario. En la aportación de sílice y hierro se introducen arena y limonita, respectivamente. Ciertos cementos, además, por las características requeridas también requieren de óxido de aluminio.

6.2.2.2. Molienda de crudo y homogenización

Se entiende por molienda, la reducción del tamaño de los materiales a polvo. En la fabricación del cemento por vía seca constituye la fase final de la producción de la mezcla cruda (harina de crudo), que posteriormente será introducida en el horno para la producción del clínker.

La caliza junto con los otros componentes provenientes de la nave de almacenamiento es llevada a los molinos de crudo con el objetivo de obtener la harina. Dicho material tiene un tamaño de grano de alrededor de 40 milímetros, y mediante dicho proceso es reducido a un tamaño comprendido entre los 0.1 y 0.5 milímetros. Las materias primas se dosifican en los molinos, cuya función es secar y pulverizar el material hasta lograr la finura adecuada.

La molienda de crudo se realiza con equipos mecánicos rotatorios, donde las materias primas introducidas son sometidas a impactos de cuerpos metálicos o a fuerzas de compresión elevadas. Los sistemas más utilizados para llevar a cabo dicha operación son los molinos de rodillos y los molinos de bolas.

Actualmente, está más expandido el uso de los molinos verticales de rodillos (VRM) ya que el consumo específico de energía de los molinos de bolas es mayor que el de los molinos verticales de rodillos, dicho consumo puede llegar a ser hasta el doble dependiendo del grado de optimización del molino de bolas.

En los molinos de rodillo, la trituración se produce a través de fuerzas de presión y cizallamiento ejercidas a través de los rodillos de molienda. En los molinos de bolas, la trituración se produce principalmente por impacto, con las bolas de molienda que se elevan por la carcasa giratoria cayendo de nuevo sobre la carga y sobre otras bolas.

En la ilustración 3, se puede observar el aspecto exterior de un molino vertical de rodillos, cabe destacar, la tolva de alimentación de la materia prima al molino, y el conducto mediante el cual, el material triturado (la harina) sale del propio molino con dirección al siguiente paso, el horno.



Ilustración 3. Molino de rodillos vertical



Ilustración 4. Funcionamiento proceso molienda rodillos

En la ilustración 4, se puede observar como la materia prima es alimentada al molino, cae en una mesa rotatoria, donde la presión generada entre los rodillos y la mesa tritura y muele la materia prima.



Además, los gases calientes que se dirigen hacia arriba secan el material molido y arrastra hacia la parte superior del molino al material triturado cuyo tamaño es el deseado (el polvo de gran finura asciende con facilidad), sin embargo, el material más grueso y que requiere molienda adicional vuelve a la mesa rotatoria. Finalmente, la harina deseada sale por la parte superior del molino.

El material resultante, constituido por un polvo de gran finura, debe presentar una composición química constante, con el objetivo de conseguir la efectividad del proceso posterior de clinkerización, Este requerimiento se consigue almacenándolo en silos verticales, denominados silos de homogenización, asegurando así una marcha continua del horno y la uniformidad en los componentes.



Ilustración 6. Silos de homogenización

6.2.3. Fabricación del clínker

La explicación de la fase de fabricación del clínker, para una mejor comprensión, se va a dividir a su vez en cuatro subapartados, tres de ellos representan las tres instalaciones por las que va pasando la harina, procedente de las torres de homogenización, hasta convertirse finalmente en clínker. Estas tres instalaciones son:

- Precalentador de ciclones
- Precalcinador
- Horno

Posteriormente, se explicará el enfriamiento del clínker, que representa la última etapa de este apartado.

En la ilustración 7 se puede observar el esquema general del horno, con cada uno de los equipos comentados, y que van a ser explicados en profundidad a continuación.

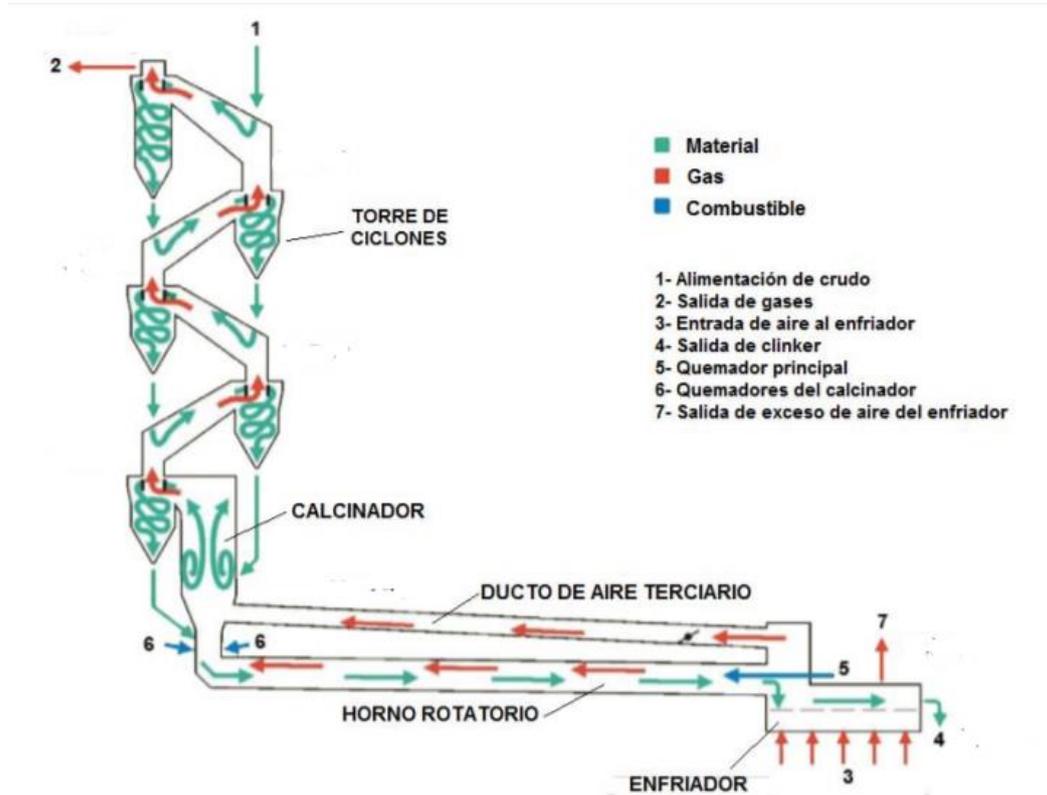


Ilustración 7. Esquema general de un horno para la producción de cemento

6.2.3.1 Precalentador de ciclones

La harina cruda procedente de los silos de homogenización, debidamente dosificada, es introducida a un intercambiador de calor por suspensión de gases de varias etapas, al final del mismo, se instala un moderno sistema de precalcificación de la mezcla antes de la entrada al horno rotatorio donde se desarrollan las restantes reacciones físicas y químicas que dan lugar a la formación del clínker. Dicho intercambiador, se conoce como el precalentador de ciclones, cuyo principio es aprovechar parte del calor de los humos del horno para precalentar la harina que va a entrar en el horno y facilitar la cocción. La torre está compuesta por diferentes ciclones, generalmente el número de ciclones está comprendido entre 4 y 6, y un precalcificador, y van desde una altura de los 50 hasta los 150 metros. La materia se introduce por la parte superior de la torre y va descendiendo por ella, hasta entrar en el horno en el nivel más bajo de la misma. A su vez, los gases

calientes procedentes del horno con temperaturas de alrededor de los 1000°C ascienden en contracorriente, produciéndose el intercambio, y consiguiendo el objetivo deseado, precalentar la harina.

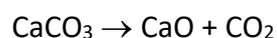


Ilustración 8. Torre precalentadores de ciclones

Entre los objetivos conseguidos con la utilización del precalentador de ciclones destacan, la reducción de la longitud del horno, ya que al introducirse al mismo la materia precalentada, se requiere un horno de menores dimensiones, debido a que es necesaria una menor energía calorífica, ya que se ha dado anteriormente un proceso de calcinación. También cabe destacar el aprovechamiento del parte del calor residual de los gases procedentes del horno.

6.2.3.2 Precalcinador

La reacción principal en el proceso de fabricación del cemento consiste en la descomposición del carbonato cálcico (CaCO_3) a una temperatura aproximada de 900 °C, para dar lugar a óxido cálcico (CaO) y dióxido de carbono (CO_2), dicho proceso se denomina calcinación.



El precalcinador se compone de una cámara de combustión, colocada como se ha comentado entre el intercambiador de ciclones y el horno rotativo. En dicha cámara se puede llegar a quemar hasta un 60 % del total del combustible utilizado en el horno, además hay que destacar que parte de la corriente residual procedente del enfriador del clínker, se redirecciona a dicha cámara para que sea utilizado como aire primario.

El objetivo del precalcinador, es que la harina tras pasar por él, y por lo tanto a la entrada del horno giratorio, se encuentre prácticamente calcinada, y favorezca posteriormente la reacción de clinkerización que se da en el horno. Cabe destacar que el material calcinado puede alcanzar los 900 ° C, tras salir del precalcinador.

6.2.3.3 Horno

Tras producirse la descarbonatación, la materia está prácticamente calcinada, es introducida en el horno, para seguir con el proceso químico, y completar la clinkerización. La llama en el horno se estima que puede alcanzar los 2000 °C, dependiendo del material utilizado como combustible. El horno es cilíndrico y tiene una ligera inclinación (alrededor de 4-5°), para favorecer el movimiento del material a lo largo del horno (donde se encuentra el quemador), de tal forma que la harina se va moviendo lentamente y va adquiriendo cada vez mayor temperatura, favoreciendo así las reacciones químicas que dan lugar al clínker. El óxido de calcio producido en la descarbonatación reacciona a alta temperatura alrededor de los 1450 °C, con sílices, alúminas y óxidos de hierro para dar lugar a silicatos, aluminatos y ferritos de calcio, que finalmente conformarán el clínker.



Ilustración 9. Horno rotatorio (Fuente: IECA)

Cabe destacar, que el tiempo de cocción es un parámetro a tener en cuenta, ya que, si es insuficiente, puede quedar cal sin reaccionar, siendo este efecto perjudicial para el producto final. Este parámetro se gradúa modificando la velocidad de rotación del horno

El horno es el elemento fundamental para la fabricación del cemento y generalmente funciona de forma continua (excepto en las tareas de mantenimiento). Es un horno rotatorio, constituido por un tubo de acero con longitudes que van desde los cuarenta hasta los sesenta metros y con diámetros de tres a seis metros., es revestido interiormente con materiales refractarios, ya que como se ha comentado, en el horno para la producción del cemento, la temperatura de llama puede alcanzar los 2000 °C, dado que las reacciones de clinkerización se encuentra alrededor de 1450°C.

6.2.3.4. Enfriador del clínker

La etapa de enfriamiento del clínker constituye una parte clave del proceso de fabricación del cemento, ya que como se verá más adelante tiene gran influencia en el rendimiento energético de la planta. Con este equipo, se consiguen principalmente dos objetivos, en primer lugar, enfriar el clínker que sale del horno a gran temperatura, y también, se produce la recuperación del calor que posee el clínker a la salida del horno, que se aprovechara mediante diferentes opciones. El clínker a la salida del horno posee una temperatura en torno a los 1200 °C, es necesario enfriarlo para seguir con el proceso de fabricación del cemento, por lo que, el siguiente paso consiste en un proceso de enfriamiento rápido mediante enfriadores de parrilla. Es por ello que el clínker es introducido en el enfriador, donde se le inyecta aire frío del exterior, y con ello se consigue reducir su temperatura desde los 1200 °C hasta aproximadamente 100 °C. En dicho intercambio, el aire inyectado inicialmente frío absorbe el calor del clínker, consecuentemente tras atravesar el clínker, el aire sale con temperaturas que en algunos casos son superiores a los 300°C, por lo que parte de este aire, es introducido nuevamente en el horno, concretamente en el quemador , con el objetivo de favorecer la combustión principal, y el resto, es emitida en forma de corriente de gas residual, corriente que a mediante este trabajo se va a intentar aprovechar, y recuperar dicho calor para la generación de electricidad. En la ilustración 10, se puede observar gráficamente, dicho proceso de enfriamiento, en donde, el clínker sale del horno, se enfría al pasar por las corrientes de aire inyectado, y una vez enfriado, el clínker sigue el proceso de fabricación, siendo transportado al silo de almacenamiento de clínker.



Ilustración 10. Funcionamiento enfriador clínker (Fuente: IECA)

6.2.4. Elaboración del producto final

6.2.4.1. Molienda de cemento

Tras el almacenamiento en los silos de clínker, el material es transportado a los molinos, donde se realiza una dosificación clínker-yeso, por medio de básculas automática, siendo la función del yeso regular el tiempo de fraguado del cemento, ya que de lo contrario pasaría a estado sólido de forma muy rápida. Además del yeso, normalmente se le añaden otros aditivos, como cenizas volátiles o escorias, la proporción de adición de estos materiales, determinarán la calidad y el tipo de cemento que se quiera obtener.



Ilustración 11. Descripción molienda de cemento (Fuente: IECA)

Respecto al modo de trabajo de los molinos, cabe destacar dos posibles modos, en circuito abierto o circuito cerrado. La mayoría de los sistemas de molienda, trabajan en circuito cerrado, consistente en un sistema, que posee un separador al final del molino, que retorna

las partículas con un grano mayor de uno previo establecido, dejando salir del molino solo a las partículas con el tamaño deseada, evitando así variaciones de la granulometría. Respecto al sistema de molienda, el más empleado para esta etapa es el molino de bolas. Este último consiste 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 colisionan entre sí, triturando el clínker y las adiciones hasta lograr un polvo fino y homogéneo: el cemento. Generalmente, en el interior del molino, se encuentran bolas de diferente tamaño, con las bolas de mayor tamaño, el objetivo que se desea es triturar el material, mientras que con las bolas de menor tamaño se refina los diferentes componentes, obteniéndose al final de esta etapa de molienda el producto final, el cemento.



Ilustración 12. Aspecto exterior molino de bolas

6.2.4.2. Almacenamiento, ensacado y expedición

6.2.4.2.1 Almacenamiento

Finalmente, tras el proceso de molienda del clínker y la obtención del cemento, éste es almacenado, siendo transportado mediante un sistema de bandas transportadoras, a los diferentes silos según el tipo de cemento que se haya producido, con el objetivo de tener correctamente clasificados los diferentes tipos y evitando así mezclas.

6.2.4.2.2 Ensacado

Dependiendo del cliente al que se le envía, el cemento se puede distribuir a granel, o empaquetado en sacos. El ensacado, consiste en un proceso en el que una tolva alimenta de producto la báscula que dosifica su material de manera que la gravedad lo vaya depositando en sus respectivos sacos, que pueden ser de diferentes capacidades. En la ilustración 13 se puede observar una ensacadora rotativa.

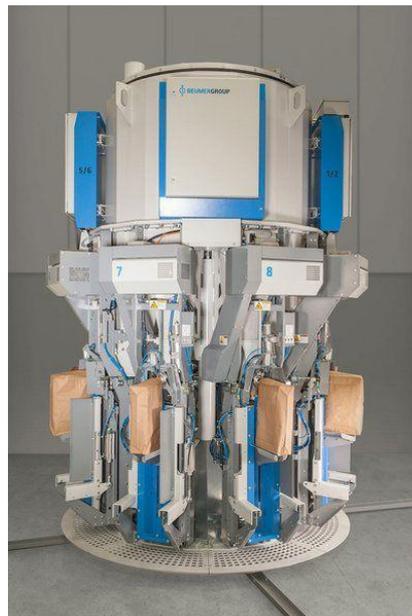


Ilustración 13. Ensacadora rotativa

6.2.4.2.3 Expedición

Ya sea tras la operación de ensacado, o si, por el contrario, se vende a granel (y no hay que realizar dicha operación), el cemento es transportado hasta el cliente mediante diferentes alternativas, como puede ser mediante camiones o la vía ferroviaria.

6.2.5. Almacenamiento y preparación del combustible

Para conseguir en el horno las temperaturas necesarias para la fabricación del clínker (en el interior del horno 1450°C y la temperatura de llama alrededor de 2000°C), será importante seleccionar adecuadamente el combustible a utilizar. El combustible más utilizado en la industria cementera es el coque de petróleo. Para el arranque del horno es empleado comúnmente fuelóleo y una vez que éste tiene la temperatura suficiente se

mantiene con carbón de coque de petróleo molido a una granulometría muy fina. También, y cada vez de manera más habitual, se trata de utilizar combustibles alternativos, con la intención de valorizar los residuos, estos materiales suelen alimentar el precalcinador.

El coque de petróleo es un material sólido con gran contenido en carbono, y es suministrado a la fábrica de cemento en forma de piedras pequeñas, con lo que es necesario tratarlo antes de su alimentación al horno. El proceso de tratamiento del combustible se puede dividir en tres instalaciones, almacenamiento del coque proveniente del suministrador, instalación de molienda, y, por último, silo para el almacenamiento del coque una vez que ha sido molido.



Ilustración 14. Coque de petróleo

Normalmente, el coque de petróleo es llevado a la fábrica a través de camiones, depositando el material en el almacén destinado a este fin. Posteriormente, el material es llevado a los molinos, con el objetivo de ser pulverizado previamente a su entrada en el horno. Este proceso se realizará en molinos verticales, similares a los ya explicados, para el proceso de molienda de la materia prima. Este proceso, tiene incidencia directa en la posterior combustión, ya que, si la granulometría del combustible es demasiado pequeña, las temperaturas de llama que se pueden alcanzar pueden ser superiores a las requeridas. De modo contrario, si el grosor del material es demasiado grande, puede desencadenar en la consecución de una mala combustión.

Posteriormente al proceso de molienda, el combustible es transportado a los silos, donde se almacenará y desde ahí se llevará directamente al horno, para quemarse y así conseguir

la combustión. Por razones de seguridad (como el riesgo de autoignición o explosiones causadas por electricidad estática), estos silos deben estar equipados con medios de seguridad, como válvulas antiexplosión y sistemas de inertización con CO₂ o nitrógeno.



Ilustración 15. Silos de almacenamiento del combustible molido

Como se ha comentado anteriormente, cada vez es más frecuente la utilización de residuos como combustibles. No todos los residuos son aptos para valorizarse en un horno de clínker, por ejemplo, algunos residuos como los radiactivos, no está permitida su utilización por ley. Con carácter general se requiere que los residuos sean preparados por gestores autorizados para que sean homogéneos y presenten unas características físicas y químicas que faciliten el tratado en las fábricas de cemento, disponiendo de esta manera de combustibles alternativos que no provoquen combustiones no deseadas en el interior del horno. De entre los residuos que son susceptibles de valorizar en un horno de clínker destacan los siguientes: neumáticos fuera de uso (NFU), harinas animales, líquidos (disolventes, aceites usados, barnices...), biomasa (madera, lodos...) o plásticos. A continuación, se van a describir con más detalle:

- CDR's: es un combustible derivado de residuos, en su mayoría plásticos. Se utilizará para alimentar los precalcinadores. Estos tras la descarga en la fábrica son analizados ya que su composición puede variar mucho en las diferentes remesas, con PCI de entre los 4000 y 7000 kcal/kg.
- NFU's: se trata de neumáticos fuera de uso, los NFU disponen de un poder calorífico alto, aproximadamente en torno a 7.600 kcal/kg. Una de las ventajas que tiene la valorización de NFU en hornos de clínker es que no es necesaria la separación del refuerzo metálico del neumático ya que este servirá para sustituir en parte al corrector férrico, siendo éste utilizado para la formación de ferritoaluminato tetracálcico, componente del clínker, este hecho se transforma en una reducción de los costes de acondicionamiento del combustible, al aprovecharse como se ha comentado los refuerzos metálicos y ahorrarse la adición del compuesto férrico.



Ilustración 16. Neumáticos troceados

- Lodos y disolventes: Es el combustible menos homogéneo de todos los que se utilizan en la fábrica, debido a que varían mucho las características según cada remesa. Tras la descarga, se filtran y se bombean a los depósitos. Con un PCI de entre 16,7-40,2 MJ/kg.

- Ecoflex: Éste proviene de los residuos del aceite mineral usado de los coches, se quema en ambos hornos hasta y tiene un PCI de entre 25-33,4 MJ/kg. Cuando llega a la fábrica se filtra, analiza y se almacena en un depósito.
- Harinas y grasas animales: Proviene de los restos de animales que no se aprovechan en el matadero, triturados, cocidos y transportados hasta la fábrica mediante camiones. Una de las soluciones es valorizarlas energéticamente en un horno de clínker, ya que éstas poseen poder calorífico medio 4.400Kcal/kg, constituyendo la opción con menor impacto ambiental asociado debido a que la fracción mineral resultante de la combustión de la harina animal queda retenida en la matriz cristalina del clínker, permitiendo un uso más eficiente desde el punto de vista ambiental para tratar harinas animales.

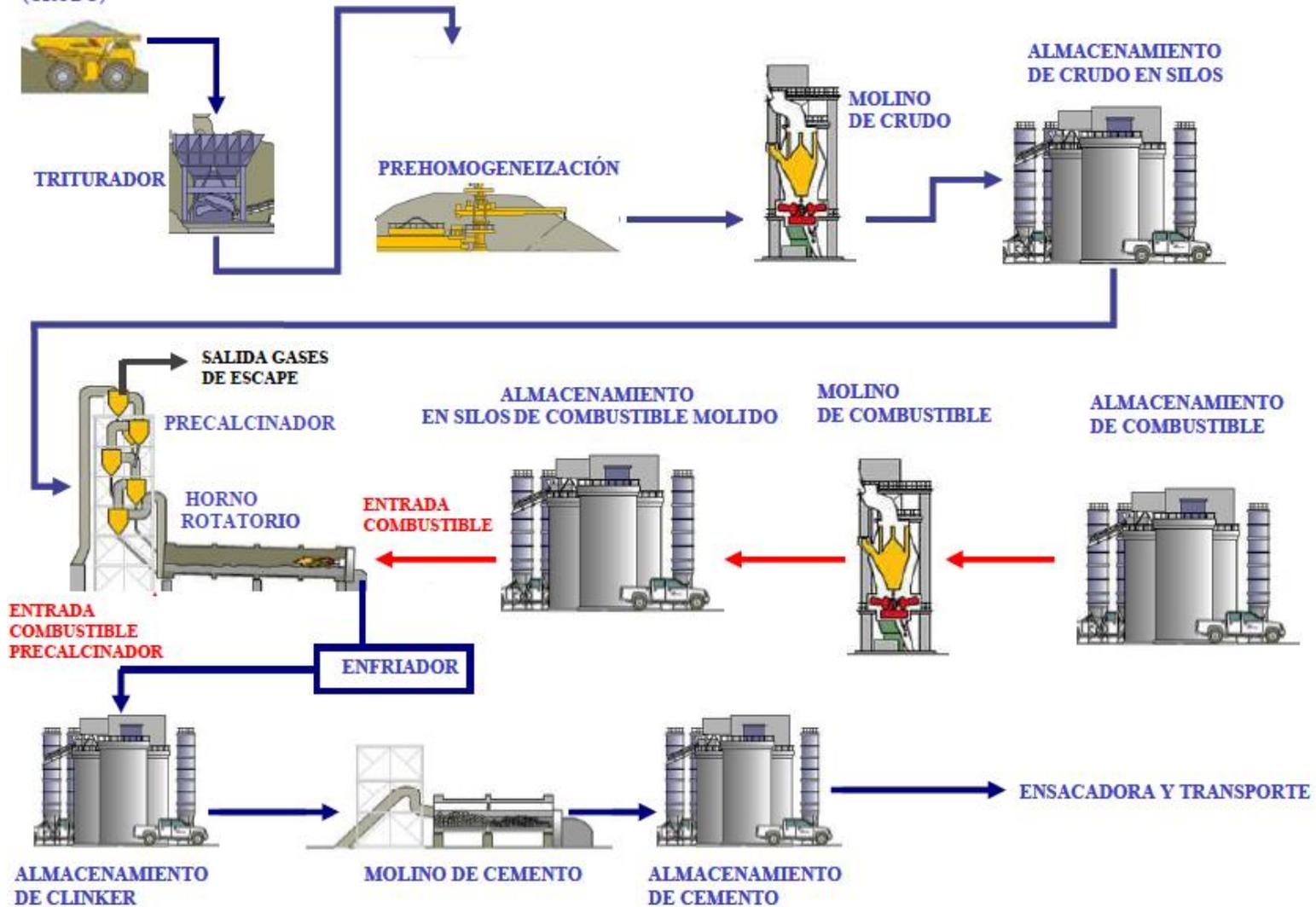
Por último, cabe destacar que, dentro de los combustibles alternativos, los NFU´s son los más utilizados hoy en día, pero se encuentran lejos de competir actualmente con los combustibles tradicionales. En la mayoría de los casos, los combustibles alternativos son utilizados para alimentar al precalcinador, debido a que se requieren temperaturas más bajas que en el interior del horno del clínker, y se pueden alcanzar con dichos combustibles alternativos.

Finalmente, y a modo de resumen, para terminar con el apartado del proceso productivo del cemento, se puede observar gráficamente, las secuencias de operaciones ordenadas que conforman dicho proceso:

- Extracción de la materia prima
- Trituración de la materia prima
- Transporte de la materia prima triturada y almacenarla en tanque de prehomogenización
- Operación de molienda de crudo, obtención de la **harina de crudo**
- Homogenización de la harina pulverizada almacenándola en silos
- Almacenamiento combustible
- Molienda combustible
- Almacenamiento combustible molido en silos
- Alimentación de la harina de crudo y del combustible al horno
- Combustión en el interior del horno, obtención del **clínker** y su posterior enfriamiento
- Almacenamiento del clínker
- Molienda del clínker y materiales adicionales, obtención del **cemento**
- Almacenamiento del cemento
- Dispensar el cemento en sacos (operación mediante ensacadoras), si es la venta a granel, no se realiza esta operación
- Transporte del cemento a los clientes

MATERIA PRIMA (CRUDO)

PROCESO PRODUCTIVO DEL CEMENTO



7. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA EN ESTUDIO

El estudio de este proyecto se va a realizar en una hipotética planta de cemento de tamaño medio que utiliza carbón de coque como combustible principal, en la que los datos de partida, así como los diferentes balances energéticos y térmicos, se realizarán tomando como base la extensa bibliografía existente en artículos científicos, así como información que suministran los fabricantes de cemento.

La capacidad asignada a la hipotética planta será de una capacidad de producción de 3000 toneladas de clínker por día, así como una producción de cemento anual de 1.100.000 toneladas. El número de horas que trabaja la fábrica se supone en 7500 horas, debido a labores de mantenimiento, operando un 85% del total de horas disponibles en un año.

7.1. Estudio energético de la planta

Dicho estudio se va a descomponer en dos apartados relativos al balance energético de la planta, que determinarán el consumo eléctrico y consumo térmico. Además, se realizará un tercer apartado relativo a las emisiones de CO₂ emitidas con el proceso de fabricación del cemento.

7.1.1. Consumo electricidad

El consumo de electricidad en el proceso de fabricación puede dividirse principalmente en tres bloques de consumo; aproximadamente el 25% se produce durante la molienda de crudo, el 35% en la molienda del cemento y el 40% restante en actividades diversas.

Con respecto al consumo medio de electricidad, algunos autores lo fijan en 3,6 GJ por tonelada de clínker, mientras que para la producción de una tonelada de cemento el consumo asciende a 105 kWh^[6]. Otros autores también coinciden en que el consumo eléctrico para la fabricación del cemento se encuentra en torno a los 100 kWh/ton^[7].

Por ello, para el caso concreto de la planta en estudio, se va a considerar que el consumo eléctrico queda establecido en 100 kWh por cada tonelada de cemento producida.

Tabla 3. Demanda eléctrica anual

Consumo eléctrico de la planta (kWh/ton cemento)	Toneladas de cemento anuales	Demanda anual electricidad (kWh)
100	1.100.000	110.000.000

7.1.2. Consumo energía térmica

En un proceso típico de producción de cemento, solo alrededor del 53% de la energía térmica es absorbida por el proceso. Del 43% del calor perdido, alrededor del 35% puede ser recuperado, para abastecer alrededor del 30% de la demanda energética de la planta ^[4]. En la tabla 4, se puede observar el balance térmico correspondiente para la producción del clínker.

Tabla 4. Balance térmico planta cementera

	Porcentaje (%)
Calor absorbido por el proceso	53
Pérdidas de calor gases precalentador	21
Pérdidas de calor gases de salida enfriador del clínker	13
Pérdidas por las paredes	11
Calor perdido en forma de clínker	2
TOTAL	100

Respecto al consumo de combustible para la producción de la energía necesaria para la fabricación del cemento, según algunos autores, dicho consumo tiene una magnitud aproximada de entre 3-3.5 GJ/ton clínker ^[7]. Para el caso particular de nuestra planta se va a suponer que es de un orden de 3 GJ/ton clínker. La cantidad térmica anual consumida se puede observar en la tabla 5.

Tabla 5. Consumo de combustible

Consumo de carbón de coque (GJ/ton clínker)	Toneladas anuales de clínker	Energía térmica necesaria (GJ)
3	937.500	2.812.500

Sabiendo la cantidad de energía térmica consumida, se puede saber aproximadamente las toneladas de este material que son necesarias alimentar al horno cada año. Estableciendo el poder calorífico del carbón del orden de 8000 kcal/kg, y sabiendo que la energía térmica necesaria es 2.812.500 GJ, son necesarias 84375 ton de carbón de coque.

7.1.3. Emisiones generadas

La industria del cemento es responsable de una gran cantidad de emisiones directas de CO₂ debido a las grandes cantidades de energía y materias primas usadas en el proceso. En principio, el 40% de las emisiones de CO₂ provienen de la combustión de los combustibles fósiles para conseguir el calor deseado en el interior del horno y así conseguir el proceso de clínkerización, mientras que el 60% restante se generan durante la descomposición de la piedra caliza y otros materiales calcáreos para la producción del clínker ^[8].

En España, en el sector cementero, la emisión de gases de efecto invernadero se encuentra en el rango de 900-1000 kg de CO₂ emitidos por cada tonelada de clínker producido ^[11]. Para el cálculo de las emisiones de CO₂ emitidas anualmente para el caso específico en estudio, se considerará un factor de 900 kg CO₂ /ton clínker, teniendo en cuenta que la planta en estudio cuenta con una capacidad de 3000 ton clínker/día y sabiendo que está en funcionamiento 7500 horas al año:

Tabla 6. Emisiones CO₂ anuales directas emitidas

Ratio emisiones CO₂ (kg/ton clínker producido)	Toneladas clínker producidas anualmente (ton clínker/año)	Emisiones anuales CO₂ emitidas (ton)
900	937.500	843.750

Contabilizando las emisiones indirectas de CO₂ asociadas al consumo de la energía eléctrica:

Tabla 7. Emisiones CO₂ anuales debidas al consumo eléctrico

Consumo anual electricidad (kWh)	Factor de emisión (kg de CO ₂ eq/kWh) ^[9]	Emisiones anuales de CO ₂ emitidas (ton)
110.000.000	0,385	42.350

Las emisiones de CO₂ totales emitidas anualmente:

Tabla 8. Emisiones de CO₂ anuales totales

Emisiones CO ₂ directas (ton)	Emisiones CO ₂ indirectas (ton)	Emisiones CO ₂ totales (ton)
843.750	42.350	886.100

Se puede observar como el mayor porcentaje de emisiones, se corresponde con las emisiones directas

7.2. Oportunidad recuperación calor residual

La realización de este trabajo viene motivada por varios aspectos como se ha comentado en los primeros apartados, destacando principalmente el gran consumo de energía que requiere la fabricación del cemento, así como el gran potencial de recuperación del calor residual como se puede observar en la tabla 4, en la cual se muestra que las corrientes de gases residuales representan un 35% de pérdidas del balance térmico. Este potencial de recuperación de calor residual, se ve desglosado principalmente en dos corrientes que se han podido identificar en la descripción del proceso productivo; los humos que egresan del horno, y que pasan por el intercambiador de ciclones, con el objetivo de precalentar la materia prima que entra en el horno, y posteriormente son emitidos a la atmósfera, y por otro lado, la corriente de aire utilizada para enfriar el clínker tras su salida del horno, este aire al entrar en contacto con el clínker, absorbe el calor del mismo, y se pierde, saliendo hacia a la atmósfera, parte de esta corriente es desviada hacia el quemador del horno para así favorecer la reacción de combustión. Esta recuperación de calor se realizará con el objetivo de generar electricidad mediante las diferentes alternativas que se van a estudiar a continuación, para así reducir la demanda energética de la planta de cemento.

8. COGENERACIÓN

8.1. Introducción a la cogeneración

Según el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), la cogeneración se define como: “la producción conjunta, en un proceso secuencial, de energía mecánica y/o eléctrica y energía térmica útil”.

Una planta de cogeneración suele estar constituida por motores alternativos, turbinas de gas o turbinas de vapor, que transforman la energía contenida en el combustible en energía mecánica y calor residual o de escape. La energía mecánica suele transformarse en energía eléctrica a través de un alternador (este es el caso más usual), y el calor residual puede recuperarse en forma de vapor de agua, agua caliente, aceites térmicos y gases calientes, como fluidos termoportadores y dispuestos para sus aplicaciones térmicas.

8.1.1 Tipos de cogeneración

8.1.1.1 Según la secuencia generación-consumo

Los sistemas de cogeneración pueden clasificarse según la secuencia generación-consumo en:

- Los **ciclos de cabecera** (Topping) de cogeneración, son aquellos en los que un combustible, generalmente gas natural, es quemado con el objetivo de la generación de energía eléctrica, ya sea utilizando turbinas de gas (TG) o motores alternativos de combustión interna (MACI) y los gases de salida de estos equipos, son aprovechados para satisfacer las demandas de calor, generalmente en forma de vapor que tengan las etapas de los diferentes procesos productivos, como pueden ser el secado o el calentamiento. Este tipo de sistemas se utiliza principalmente en la industria textil, petrolera, celulosa y papel, donde sus requerimientos de calor son moderados o bajos con temperaturas de 250 °C a 600 °C.

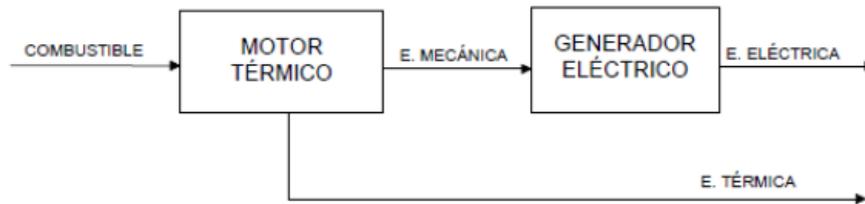


Ilustración 17. Esquema cogeneración ciclo de cabecera

- En los **ciclos de cola** (Bottoming), la energía primaria se utiliza directamente para satisfacer los requerimientos térmicos del proceso del primer escalón y la energía térmica residual se usará para la generación de energía eléctrica en el segundo escalón. Estos ciclos están asociados con procesos industriales en los que se presentan grandes corrientes residuales con temperaturas lo suficientemente altas como para ser recuperadas.

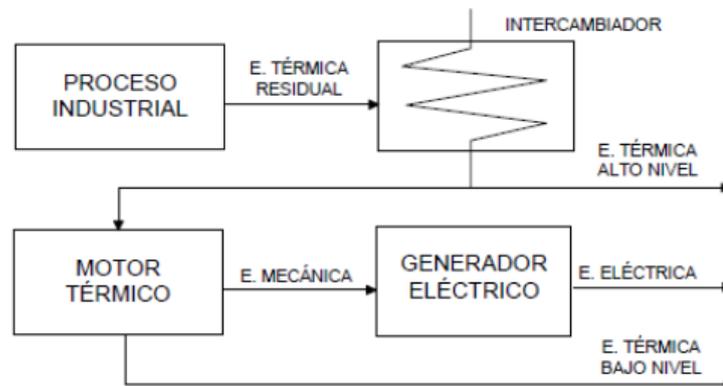


Ilustración 18. Esquema cogeneración ciclo de cola

En este subpartado (ciclos de cola), se encuentra localizado el proyecto que tratamos de desarrollar, en el que, a través del carbón de coque, conseguimos el calor necesario en el horno para que se den las reacciones necesarias para lograr la descarbonización y clinkerización, necesarias para formar el clínker. A partir de los calores residuales, se va a intentar realizar el aprovechamiento de estos con el objetivo de generar electricidad, y así disminuir la demanda eléctrica de la planta.

8.1.1.2. Según la conexión del alternador

Los sistemas de cogeneración pueden clasificarse según el modo de conexión en sistemas aislados o sistemas integrados.

- Se dice que es un sistema **aislado** cuando el sistema de cogeneración no está conectado a la red eléctrica, por lo que el sistema debe regular la potencia generada, así como la frecuencia de la energía eléctrica producida. En el caso de que la demanda de energía térmica sea menor que la energía térmica producida, ese exceso de energía, se perderá. En el caso de ser necesario mayor energía térmica, se genera adicionalmente mediante un sistema convencional.

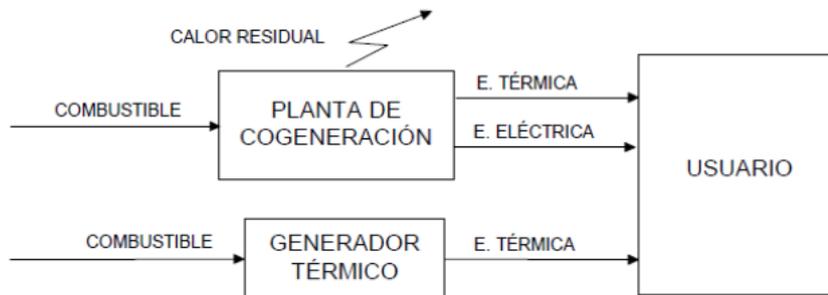


Ilustración 19. Esquema cogeneración sistema aislado

- Se dice que es un sistema **integrado** cuando el sistema de cogeneración está conectado a la red eléctrica, por lo que el sistema se ajusta, produciendo la energía térmica demandada. En caso de que sea necesaria más energía eléctrica de la producida, se compra a la Red Eléctrica, si por el contrario se produce un exceso de electricidad se vende a la misma.

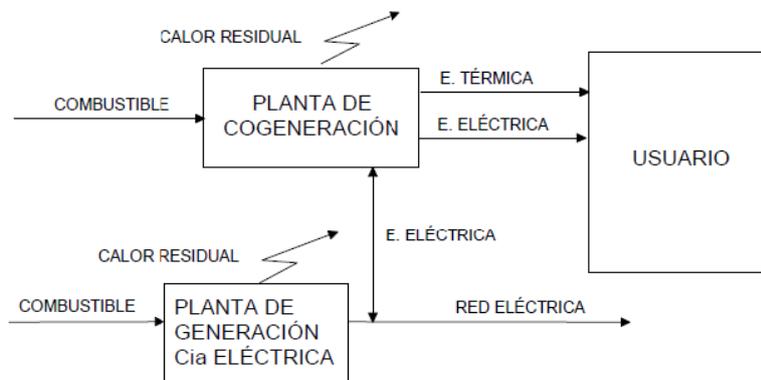


Ilustración 20. Esquema cogeneración sistema integrado

8.2. Introducción de las alternativas disponibles

8.2.1. Ciclo Rankine

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo convertir el calor en trabajo. Su eficacia está limitada por la eficiencia de un ciclo de Carnot que operase entre los dos mismos focos térmicos.

El ciclo Rankine, utiliza generalmente agua, que alternativamente se va evaporando y condensando a lo largo del ciclo, también se puede utilizar con menos frecuencia un fluido orgánico como fluido de trabajo, pero ese caso se va a analizar en el siguiente subapartado.

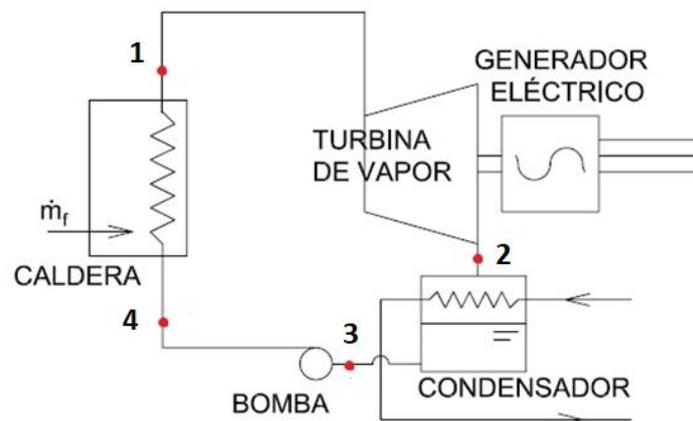


Ilustración 21. Ciclo Rankine

El ciclo que describe el fluido es el siguiente: el agua a la entrada de la caldera se encuentra en estado líquido, al pasar por la caldera o recuperador, absorbe el calor y entonces se evapora dando lugar al vapor de agua. Dicho calor es producido al quemar un combustible en la caldera, o como el caso de este proyecto, el aprovechamiento de un calor residual. El vapor producido es llevado a una turbina para ser expandido, y así generar trabajo mecánico en su eje (este eje, solidariamente unido al de un generador eléctrico, es el que generará la electricidad en la central térmica). El vapor una vez expandido y que sale de la turbina es introducido en un condensador, equipo donde el vapor condensa y cambia al estado líquido (habitualmente el calor es evacuado mediante una corriente de refrigeración procedente del mar, de un río o de un lago). Finalmente, el fluido se hace pasar por una bomba que se encarga de aumentar la presión del fluido en

fase líquida para volver a introducirlo nuevamente en la caldera, cerrando de esta manera el ciclo.

A continuación, se va a aislar cada equipo que compone el ciclo, y realizar un balance de energía a cada uno de ellos ^[10], con el objetivo de obtener las fórmulas para la resolución del ciclo, así como del rendimiento:

Turbina

El vapor generado en la caldera en el estado 1, con presión y temperaturas elevadas, se expande a través de la turbina para producir trabajo, descargándose en el condensador en el estado 2 a baja presión. Despreciando el calor transferido al ambiente, los balances de masa y energía en términos de potencia para el volumen de control de la turbina en estado estacionario se reducen a:

$$0 = \cancel{\dot{Q}} - \dot{W}_t + \dot{m} \left[h_1 - h_2 + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \right]$$

Reduciéndose a:

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2$$

Donde \dot{m} es el flujo másico del fluido de trabajo y $\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}$ es el trabajo desarrollado por la turbina por unidad de masa. Los efectos de energías cinética y potencial se desprecian.

Condensador

En el condensador se transfiere calor del vapor al agua de refrigeración que circula en flujo separado. El vapor condensa y la temperatura del agua de refrigeración aumenta. En estado estacionario, el balance de energía queda:

$$\frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}} = h_2 - h_3$$

Donde $\frac{\dot{Q}_s}{\dot{m}}$ es la energía transferida en forma de calor desde el fluido de trabajo al agua de refrigeración, por unidad de masa.

Bomba

El líquido procedente del condensador en el estado 3 es bombeado desde la presión del condensador hasta la presión más alta de la caldera. Considerando un volumen de control que rodee la bomba y suponiendo que no hay transferencia de calor en el ambiente, el balance de energía se reduce a:

$$\frac{\dot{W}b}{\dot{m}} = h4 - h3$$

Donde $\frac{\dot{W}b}{\dot{m}}$ es el trabajo consumido por unidad de masa que circula a través de la bomba.

Caldera

El fluido de trabajo completa el ciclo cuando el líquido procedente de la bomba en el estado 4, se calienta hasta la saturación y se evapora en la caldera. Considerando un volumen de control que incluya los tubos y elementos que llevan el agua de la alimentación desde el estado 4 al estado 1, el balance de energía se reduce a:

$$\frac{\dot{Q}e}{\dot{m}} = h1 - h4$$

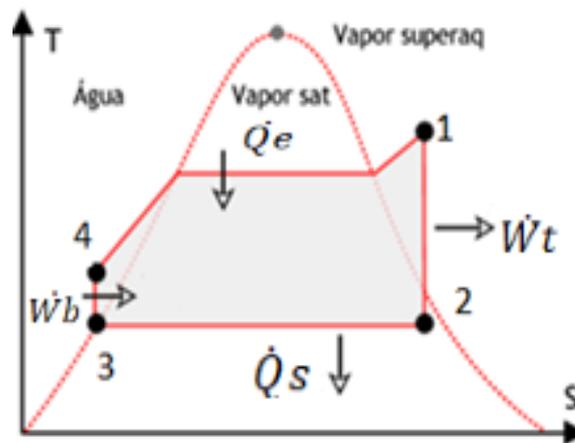
Donde $\frac{\dot{Q}e}{\dot{m}}$ es el flujo de calor transferido por la fuente de energía al fluido de trabajo por unidad de masa que atraviesa la caldera.

Finalmente, el rendimiento térmico del ciclo indica la cantidad de energía recibida por el fluido de trabajo en la caldera que se convierte en trabajo neto producido.

$$\eta = \frac{\frac{\dot{W}t}{\dot{m}} - \frac{\dot{W}b}{\dot{m}}}{\frac{\dot{Q}e}{\dot{m}}} = \frac{(h1 - h2) - (h4 - h3)}{h1 - h4}$$

Ciclo Rankine Ideal

Si el fluido pasa a través de los diversos componentes de un ciclo de vapor sin irreversibilidades, no existirán pérdidas de presión por rozamiento en la caldera y el condensador y el fluido de trabajo pasará a través de estos equipos a presión constante. También en ausencia de irreversibilidades y sin transferencia de calor al entorno, los procesos en la turbina y la bomba serán isoentrópicos. Al ciclo con estas idealizaciones, se denomina Ciclo Rankine ideal. A continuación, se muestra el diagrama T-s:



Gráfica 7. Diagrama T-s

- Proceso 1-2: Expansión isoentrópica del fluido de trabajo a través de la turbina desde vapor saturado en el estado 1 hasta la presión del condensador.
- Proceso 2-3: Transferencia de calor desde el fluido de trabajo cuando fluye a presión constante por el condensador, siendo líquido saturado en el estado 3.
- Proceso 3-4: Compresión isoentrópica en la bomba hasta el estado 4 dentro de la zona de líquido.
- Proceso 4-1: Transferencia de calor hacia el fluido de trabajo cuando circula a presión constante a través de la caldera, completándose el ciclo

Ahora bien, es importante destacar que los dispositivos reales no operan de forma ideal. Por ello, para representar el ciclo Rankine real es necesario tener en cuenta las posibles irreversibilidades de cada equipo.

Turbina

La principal irreversibilidad que experimenta el fluido de trabajo está asociada con la expansión en la turbina. Una expansión real a través de la turbina va acompañada de un incremento de entropía. El trabajo desarrollado por unidad de masa en este proceso es menor que el correspondiente a la expansión isoentrópica 1-2s. El rendimiento de la turbina permite tener en cuenta el efecto de las irreversibilidades dentro de una turbina relacionando el trabajo real con el isoentrópico.

$$\eta_{\text{turbina}} = \frac{\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}\right)}{\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}\right)_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Bomba

El trabajo requerido por la bomba, para vencer los efectos del rozamiento, también reduce el trabajo neto producido por la planta. En ausencia de transferencia de calor con el ambiente, la entropía crece a través de la bomba. El trabajo necesario para el proceso real es mayor que el correspondiente proceso isoentrópico 3-4s.

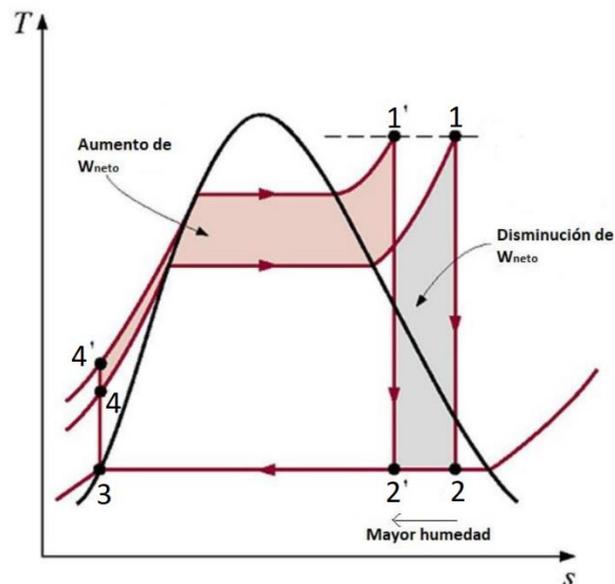
$$\eta_{\text{bomba}} = \frac{\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}}\right)_s}{\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}}\right)} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$

Debido a que el trabajo de la bomba es mucho menor que el de la turbina, las irreversibilidades en la bomba tienen un impacto en el trabajo neto del ciclo mucho menor que las irreversibilidades en la turbina.

Mejoras en el ciclo

Aumento presión de la caldera

Al producirse un aumento de la presión en la caldera, consecuentemente se produce un aumento de la temperatura de ebullición, por lo que la temperatura media a la cual se cede el calor al fluido aumenta. Es por ello que la temperatura del vapor producido y consecuentemente su entalpía aumentan, viéndose incrementado el rendimiento del ciclo. Sin embargo, este aumento de presión desplaza el ciclo hacia la izquierda, influyendo directamente en que el título de vapor a la salida de la turbina disminuya, efecto que puede ser perjudicial si se encuentra bajo un título menor al 85% por que facilita la erosión de los álabes de la turbina. Este efecto indeseable puede corregirse recalentando el vapor.



Gráfica 8. Aumento de la presión de la caldera

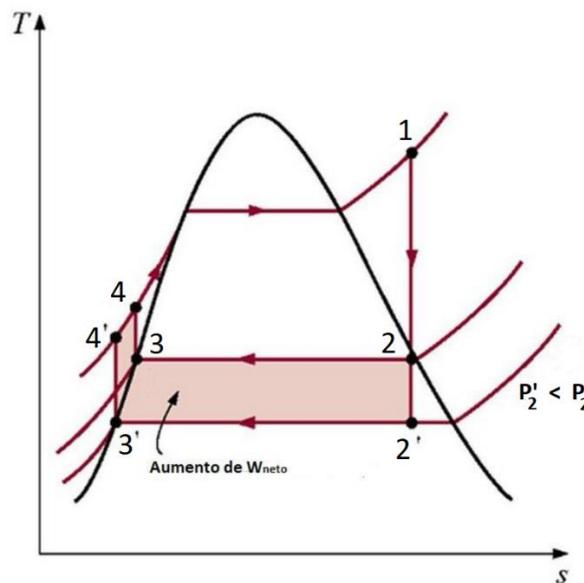
Reducción de la presión en el condensador

Al verse reducida la presión en el condensador, el vapor que egresa de la turbina lo hará a unas condiciones en las que la entalpía de dicho estado se va a ver disminuida, efecto que se produce tras la reducción de la presión en el condensador, al verse disminuida la entalpía en el estado 2, el salto entálpico en la turbina (estado 1 al 2) va a ser mayor, produciéndose mayor trabajo en la misma.

Entre los posibles efectos adversos tras llevar a cabo la reducción de la presión en el condensador destacan la posibilidad de filtraciones de aire en el condensador y sobre todo

el aumento de humedad del vapor, viéndose disminuido el título de vapor a la salida de la turbina, pudiendo desencadenar efectos perjudiciales en los álabes de la misma, como se ha comentado anteriormente.

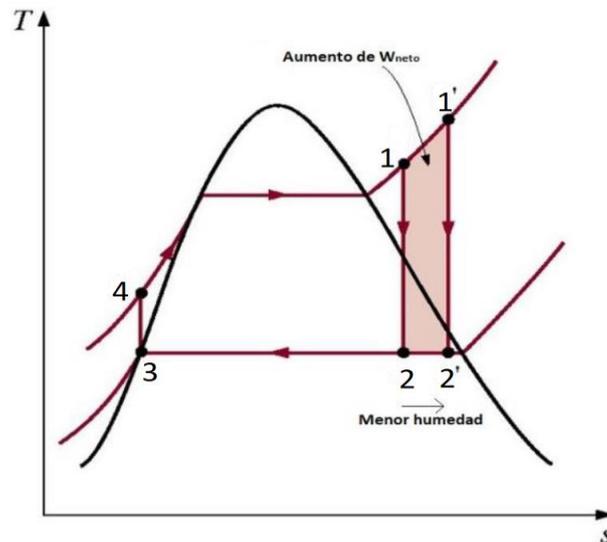
La presión más baja posible en el condensador es la presión de saturación correspondiente a la temperatura ambiente, ya que ésta es la temperatura más baja posible de cesión de calor al ambiente.



Gráfica 9. Reducción de la presión en el condensador

Sobrecalentamiento

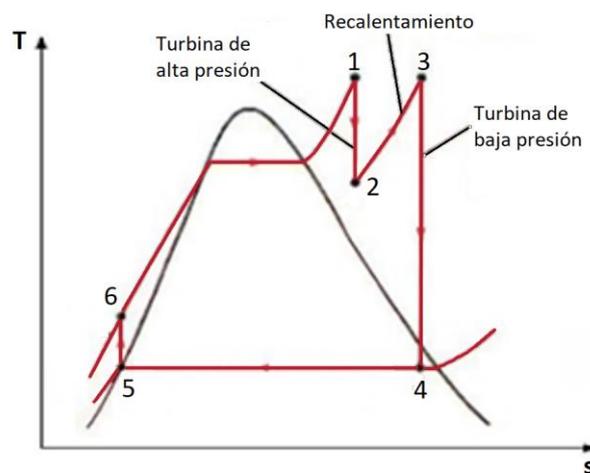
Como no existe una limitación a la hora de utilizar vapor saturado a la entrada de la turbina, puede transferirse al vapor energía adicional, obteniendo vapor sobrecalentado en la entrada de la turbina. El ciclo con sobrecalentamiento tiene una mayor temperatura media de absorción de calor que el ciclo sin sobrecalentamiento, por lo tanto, el rendimiento térmico es mayor. Además, otra ventaja del sobrecalentamiento es que el título de vapor a la salida de la turbina con sobrecalentamiento es mayor que sin él, como se puede observar en la siguiente gráfica:



Gráfica 10. Ciclo Rankine con sobrecalentamiento

Recalentamiento

Consiste en expandir el vapor en más de una etapa, generalmente dos, que es el caso en el que se va a profundizar. La turbina queda dividida en dos etapas, la primera de ellas es la etapa de alta presión y la segunda de baja presión, haciendo circular el vapor por la caldera entre las dos etapas, consiguiéndose así el recalentamiento del fluido, y posteriormente se expande en la segunda etapa hasta la presión del condensador. Con el recalentamiento se consigue un aumento de la temperatura media del calor que se transfiere al fluido. Consiguiendo un aumento del trabajo producido de la turbina. Además, también se consigue el aumento del título de vapor a la salida de la turbina, como se observa en la gráfica 11, evitando la erosión de los álabes de la misma.



Gráfica 11. Ciclo Rankine con recalentamiento

8.2.2 Ciclo Orgánico de Rankine

El ORC (Ciclo Orgánico de Rankine) es un ciclo termodinámico similar a un ciclo convencional de vapor, pero en lugar de agua, los sistemas ORC utilizan un fluido orgánico de alto peso molecular como fluido de trabajo. El fluido orgánico circula a lo largo de un ciclo comprimiéndose mediante una bomba. Entonces se evapora en un intercambiador de calor donde absorbe el calor que proporciona un aceite térmico que previamente ha sido calentado mediante, por ejemplo, la combustión necesaria para la obtención del clínker, en el proceso de fabricación del cemento, como es el caso que se estudia en este proyecto. El fluido orgánico en forma de vapor se expande y hace mover una turbina para generar la electricidad. Posteriormente el vapor a baja presión condensa en otro intercambiador de calor, donde se aprovecha el calor generado para diferentes aplicaciones: industrial, district heating and cooling, etc. Es posible aumentar la eficiencia del ciclo introduciendo un regenerador después de la turbina, con el que se consigue precalentar el fluido antes del intercambiador de calor. El esquema de un ciclo ORC, así como el diagrama T-s, se puede observar en la siguiente ilustración:

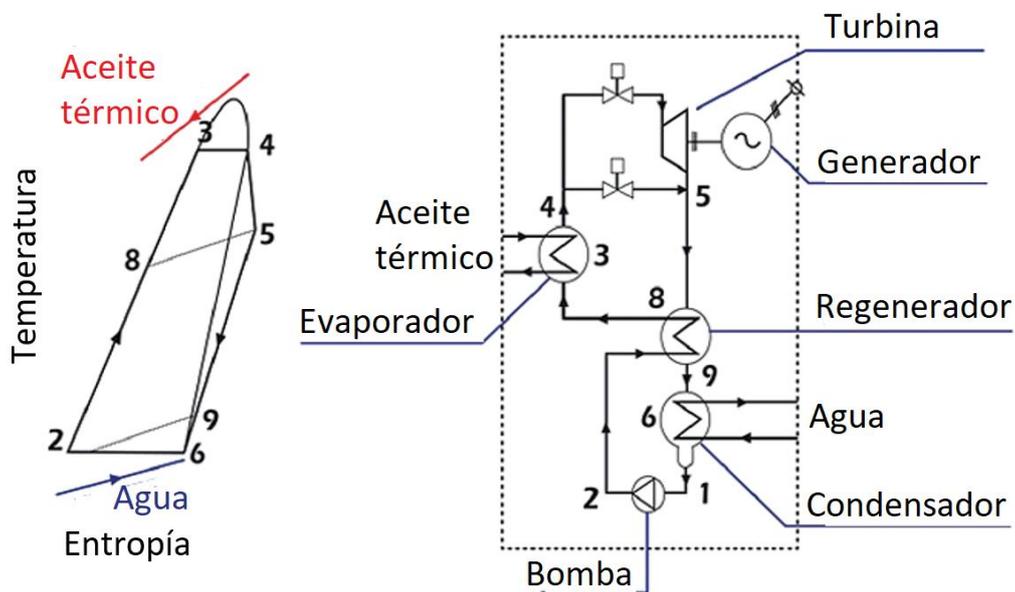


Ilustración 22. Ciclo ORC

Las principales aplicaciones de los ORC se encuentran en la recuperación de calores residuales procedentes de los diferentes procesos productivos industriales existentes. El balance energético de un ciclo ORC, se puede observar en la ilustración 24, generalmente poseen rendimientos eléctricos que se encuentran entre 16-20%, dependiendo del tamaño de las unidades. Como conclusión se puede establecer que por cada MW de electricidad se obtienen aproximadamente 4MW de agua caliente.

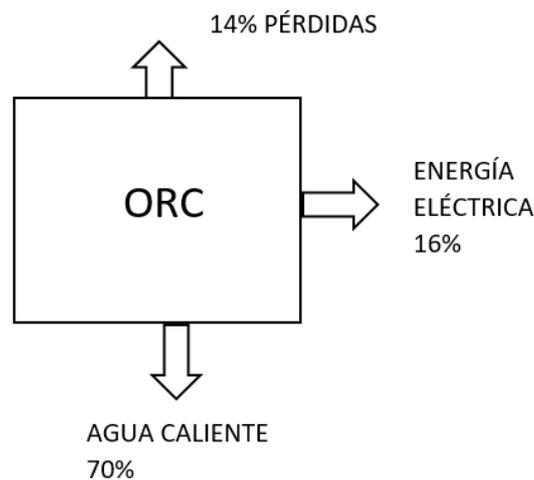


Ilustración 23. Balance energético ORC

Ventajas

- Se puede generar electricidad con fuentes de calor a temperaturas bajas a partir de 90°C.
- Amplio rango de aplicaciones debido a las características termodinámicas del fluido orgánico.
- Tienen una alta fiabilidad. Cabe destacar la ausencia de la erosión de los álabes de la turbina, debido a títulos bajos, como sucede en los ciclos convencionales de vapor de Rankine. En este caso, al usar fluidos secos (ausencia de humedad en el vapor), en la expansión de la turbina no se crean gotas.
- Presentan buenos rendimientos trabajando a cargas parciales.
- Plantas ORC pueden producir electricidad a partir de la recuperación de calor residual.
- Los rangos de generación oscilan entre los 200kW a los 15 MW eléctricos.

9. DIMENSIONAMIENTO DE LA INSTALACIÓN

9.1. Caso específico de la planta en estudio

Respecto a los valores de la temperatura que poseen las corrientes del calor residual, que como se ha establecido en apartados anteriores incidiendo con más profundidad, se han seleccionado tanto la corriente de gases de salida del precalentador como la corriente de gases proveniente del enfriador del clínker, hay pequeñas variaciones dependiendo de las diferentes fuentes. Algunos autores afirman que los valores típicos para la corriente de gases de salida de los ciclones se encuentran entre 300-400°C ^[11], mientras que otros aseguran que se encuentran entre 300-380°C ^[12]. Para el caso de la corriente proveniente del enfriador del clínker, hay artículos que establecen estas temperaturas en un rango de 250-350°C ^[11], sin embargo, otras fuentes ubican dichas temperaturas en un rango de entre 250-400°C ^[12]. Cabe destacar que la temperatura de salida de los gases tras pasar por el precalentador depende del número de ciclones del que disponga el precalentador, a mayor número de ciclones, mayor será el precalentamiento de la materia prima y por lo tanto menor será la temperatura de salida de los gases, y por lo tanto menor potencial de recuperación de calor residual. Por lo tanto, este valor de temperatura puede variar desde los 400°C (4 ciclones) hasta los 250°C (6 ciclones).

Para este estudio se va a suponer que dichas corrientes tienen las siguientes temperaturas:

- Corriente de gases de salida del precalentador (5 ciclones): 350°C
- Corriente de gases de salida del enfriador del clínker: 290°C

Los humos de salida del horno del clínker, debido al proceso de combustión, en su composición contienen gases ácidos, óxidos de nitrógeno, dióxidos de azufres, así como algunos metales pesados. Con el objetivo de evitar la condensación de estos gases en el recuperador de calor, produciéndose la corrosión y con ello deteriorando el recuperador, se va a fijar el enfriamiento de los gases residuales hasta una temperatura de 150°C.

9.2. Cálculo del calor disponible en las corrientes de gases residuales

En este apartado se va a calcular el potencial térmico de las corrientes residuales, es decir, la cantidad de calor disponible para llevar a cabo la recuperación de calor residual de cada una de las dos corrientes de gases propuestas, la corriente de gases de salida del precalentador y la corriente de gases de salida del enfriador del clínker.

Se define el calor específico como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad. El calor específico es una propiedad intensiva, por lo que solo depende de la naturaleza de la sustancia, siendo independiente su cantidad.

Una vez definido el calor específico, el potencial térmico recuperable de cada una de las corrientes residuales se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H = \dot{m} \cdot (H_2 - H_1) = \dot{m} \cdot \int_{T_2}^{T_1} C_p \cdot dT \quad (\text{Ec. 1})$$

Siendo:

- \dot{Q} : Calor disponible aprovechable (kW)
- \dot{m} : flujo másico de la corriente de gases (kg/s)
- C_p : calor específico de la corriente de gases (KJ/kgK)
- T_1 : temperatura de los gases a la entrada del recuperador
- T_2 : temperatura de los gases a la salida del recuperador

9.2.1. Potencial recuperación térmico en la corriente de gases de salida del precalentador

Los gases que salen del horno, como se ha comentado anteriormente, salen a una temperatura muy elevada (alrededor de 900°C), pero son muy polvorientos, por eso son dirigidos a un sistema de ciclones. Esta corriente se utiliza para precalentar el crudo de harina que entra por la parte superior del sistema de ciclones y va descendiendo a medida que los gases van ascendiendo y precalentando la materia, con el objetivo de desencadenar la precalcificación del combustible, para favorecer así el proceso de clinkerización en el interior del horno. El aprovechamiento que se quiere plantear en este trabajo consiste en la corriente que egresa del sistema de ciclones, que aún sigue teniendo temperaturas muy elevadas y, por lo tanto, con gran potencial térmico, ya que si no esta corriente es enfriada y posteriormente emitida a la atmósfera.

A la salida del sistema de ciclones, los caudales volumétricos de esta corriente suelen estar entre 50-70 kg/s, dependiendo del tamaño de la planta. Para este trabajo se va a suponer que el flujo de salida de los gases del sistema de ciclones es de 65kg/s. Respecto a la composición del flujo de gases dependerá del combustible utilizado, para llevar a cabo la reacción en el interior del horno. En este trabajo, la composición que se va a considerar para caracterizar al flujo de gases es el propio de una corriente de gases ^[13], fruto de la utilización de carbón de coque como combustible.

Tabla 9. Porcentaje gases salida sistema ciclones

Componente	Porcentaje en peso (%)	Flujo másico (kg/s)
N ₂	60,54	39,35
CO ₂	22,74	14,78
H ₂ O	10,03	6,52
O ₂	6,69	4,35
Total	100	65

Para calcular el potencial de recuperación térmico de esta corriente, se va a utilizar la Ec. 1 para cada uno de los compuestos que forman la corriente gaseosa. Los calores específicos a utilizar de cada componente, en función de la temperatura, son:

$$C_{pO_2} = 0.9203 + 0.0001065 \cdot T$$

$$C_{pN_2} = 1.024 + 0.00008855 \cdot T$$

$$C_{pCO_2} = 0.8654 + 0.0002443 \cdot T$$

$$C_{pH_2O} = 0.9203 + 0.0003111 \cdot T$$

Finalmente, la ecuación para el cálculo del calor que puede ser recuperado tras hacer pasar la corriente de los gases de salida del precalentador a través de un recuperador de calor quedaría:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{O_2} \cdot \int_{T_2}^{T_1} C_{pO_2} \cdot dT + \dot{m}_{N_2} \cdot \int_{T_2}^{T_1} C_{pN_2} \cdot dT + \dot{m}_{CO_2} \cdot \int_{T_2}^{T_1} C_{pCO_2} \cdot dT + \dot{m}_{H_2O} \cdot \int_{T_2}^{T_1} C_{pH_2O} \cdot dT$$

Tomando como T1 la temperatura de salida del sistema de ciclones y, por lo tanto, la temperatura de la corriente que entra en el recuperador de calor que, como se ha visto en el apartado 8.4.1, queda establecida en 350 °C. Respecto a T2, se va a fijar el enfriamiento de los gases residuales hasta una temperatura de 150°C con el objetivo de evitar la condensación de los gases en el recuperador de calor ya que, tal y como se ha comentado anteriormente, este hecho desencadenaría la corrosión en el mismo y con ello el deterioro del recuperador.

Operando, el calor obtenido en el recuperador de calor para la corriente de gases de salida del precalentador es:

$$Q = 14.810,68 \text{ kW}$$

9.2.2. Potencial recuperación térmico en la corriente de gases de salida del enfriador del clínker

Al obtenerse el clínker, éste sale del horno con gran temperatura y es necesario enfriarlo para continuar con el proceso de fabricación del cemento. Es por ello que el clínker se enfría inyectando aire del ambiente a través de unas parrillas. En la transferencia de calor aire-clínker, este flujo de aire inicialmente a temperatura ambiente es calentado, llegando a alcanzar temperaturas incluso superiores a 300 °C. Parte de este aire es recirculado al horno como aire secundario para favorecer la combustión principal, por lo que se destinará una fracción a la recuperación residual. El flujo volumétrico de gases es menor que en el caso de los gases provenientes del sistema de ciclones, además de tener menor temperatura, por lo que el potencial térmico será más bajo. El flujo de dicha corriente para el estudio se ha fijado en un valor de 1200 Nm³/ton clínker. La temperatura de los gases se va a considerar como se ha comentado en el apartado 8.2.1, que tiene un valor fijo de 290°C. Respecto a la composición de los gases de salida del enfriador del clínker, se considerará como una buena aproximación que tienen la composición del aire:

Tabla 10. Porcentaje gases salida enfriador del clínker

Componente	Porcentaje volumen (%)
N ₂	79
O ₂	21
Total	100

Tomando el Cp del aire, en función de la temperatura como:

$$C_{pO_2} = 0.9956 + 0.00009299 \cdot T$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \int_{T_2}^{T_1} C_p \cdot dT$$

Se va a calcular el flujo másico de dicha corriente:

$$1200 \text{ Nm}^3/\text{ton clinker} = 150000 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot \frac{44.6 \text{ moles}}{1 \text{ Nm}^3} \cdot \frac{28.97 \text{ g}}{1 \text{ mol aire}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 53,83 \text{ kg/s}$$

Fijando una Temperatura de 150 °C para la corriente gaseosa a la salida del recuperador (T2) y de 290°C a la entrada del mismo (T1), el calor disponible en el recuperador queda:

$$Q=7.285,12 \text{ kW}$$

Por lo tanto, la suma de los calores recuperados de ambas corrientes asciende a un calor total aprovechable de 22.095,8 kW.

El potencial térmico aprovechable de ambas corrientes de gases residuales ha sido estudiado considerando la recuperación de cada corriente individualmente, es decir, cada corriente en un recuperador de calor individual. Esta elección se debe a dos aspectos principalmente:

En primer lugar, se podría haber considerado la posibilidad de mezclar ambas corrientes de gases que diese como producto una única mezcla y así ser recuperada a través de un solo recuperador. Esta alternativa conllevaría pérdidas de temperatura significativas de ambas corrientes hasta su mezcla, viéndose disminuida la cantidad de calor aprovechado en el recuperador ya que existe una distancia considerable en la planta de cemento entre los equipos de los que salen ambas corrientes, y por lo tanto perderían temperatura hasta su mezcla y posterior recuperación.

En segundo lugar, hay que tener en cuenta que la naturaleza de dichas corrientes difiere en cuanto a sus características se refiere. La corriente gaseosa que egresa de los ciclones tiene una naturaleza cuya corriente es más pegajosa y adhesiva frente a los conductos, en comparación a la corriente de gases del enfriador del clínker, cuya naturaleza es más abrasiva ^[14]. Es por ello que los materiales de recubrimiento de ambos recuperadores deben tener distintas características de diseño, con el objetivo de adaptarse a la naturaleza de cada flujo.

9.3. Alternativas para la recuperación del calor residual

9.3.1. Ciclo Rankine Convencional

Una de las alternativas para el aprovechamiento térmico de las corrientes de gases residuales, tanto de los gases de salida de los ciclones, como los gases que salen del enfriador del clínker, es el Ciclo Convencional de Rankine. En la ilustración 24 se puede observar el esquema global de recuperación del calor residual del proceso de fabricación del cemento, donde se observa las dos corrientes a recuperar.

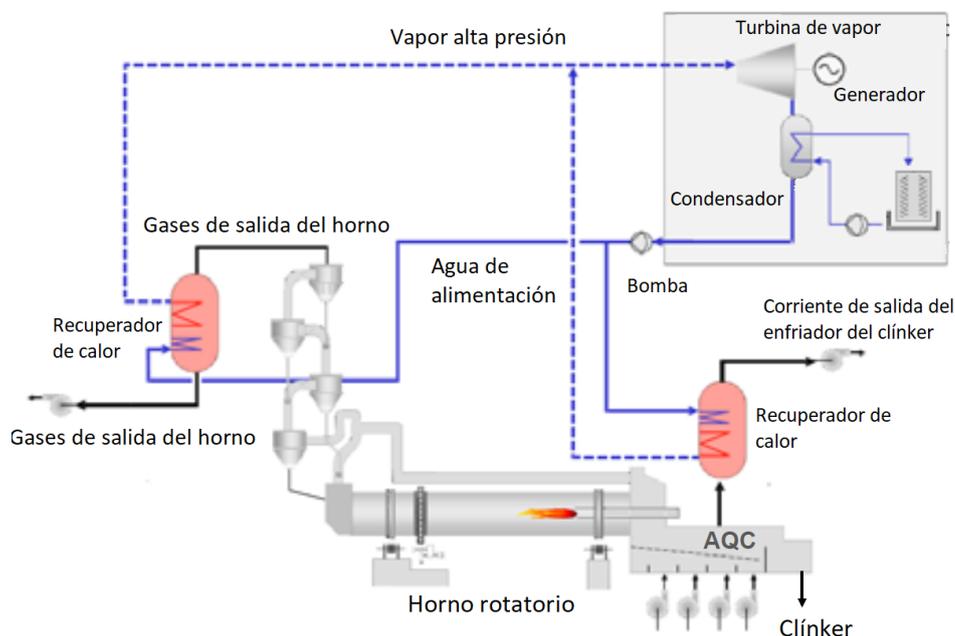


Ilustración 24. Esquema recuperación calor residual Ciclo Convencional de Rankine (Fuente: IFC)

El calor de dichas corrientes se recupera al hacer pasar cada una de ellas a través de una caldera de recuperación, donde se extrae el calor de los humos, para vaporizar el fluido de trabajo. En el caso de este ciclo es agua, obteniendo vapor que posteriormente se hace pasar por una turbina, acoplada a un alternador para así transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Tras salir de la turbina, el vapor será condensado y se bombeará nuevamente hasta la caldera de recuperación, para volver a empezar de nuevo el ciclo. En la ilustración 25 se puede observar dicho ciclo con cada uno de los estados, que van a ser definidos posteriormente.

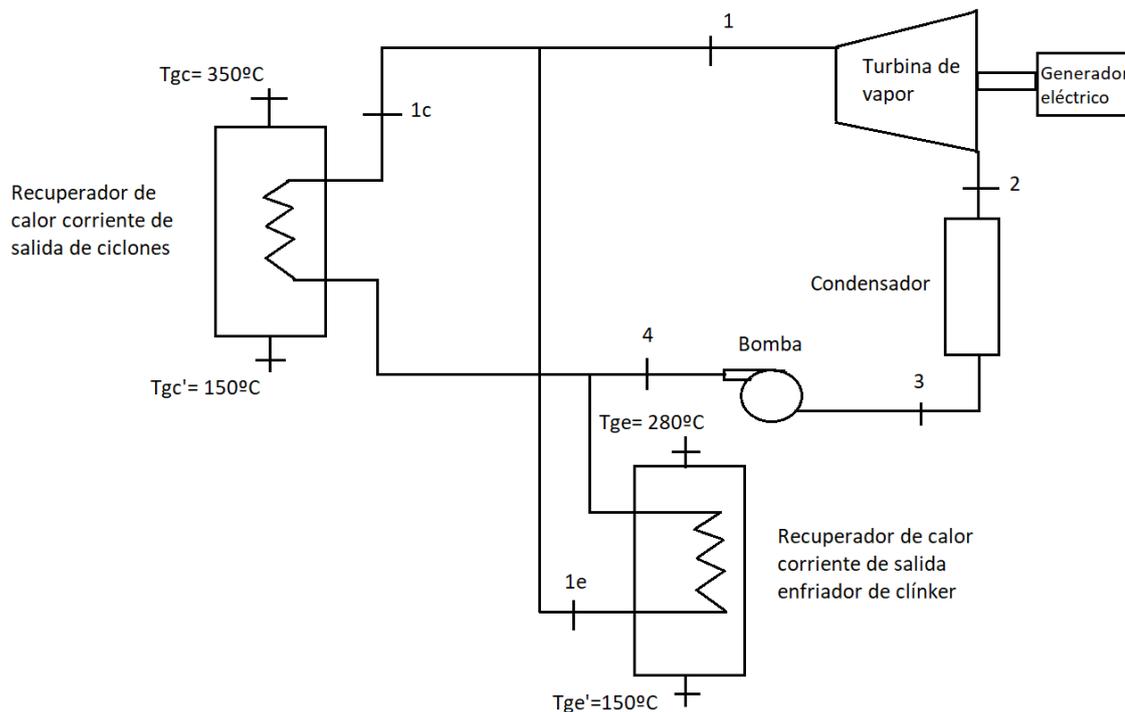


Ilustración 25. Ciclo Rankine de vapor

Para resolver el ciclo, se parte del potencial térmico recuperable de cada corriente. Se recuerda que, para el caso de la corriente proveniente de los ciclones, el calor que se consigue recuperar asciende a 14.810,68 kW, mientras que para la recuperación de la corriente que sale del enfriador del clínker, el calor recuperado asciende a 7.285,12 kW.

Teniendo en cuenta las temperaturas de las corrientes gaseosas (350°C para la corriente de los ciclones y 290°C para la que egresa del enfriador del clínker), se ha considerado como datos de diseño del ciclo que, tras el intercambio de cada corriente en su respectivo recuperador de calor, entre los gases y el agua, a la salida del recuperador de calor de la corriente de salida del enfriador del clínker (estado 1e), el vapor tiene una temperatura de 240°C y una presión de 30 bar, mientras que para el caso del estado del vapor a la salida del recuperador de la corriente de salida de los ciclones, tiene una temperatura de 300°C y una presión de 30 bar.

Para la resolución del ciclo, se ha considerado que el rendimiento isoentrópico de la turbina es del 65% debido a que, para temperaturas y presiones tan bajas, no existen turbinas con mejor rendimiento. Para la bomba se ha considerado un 80% de rendimiento.

Con respecto a los rendimientos mecánicos y eléctricos de la turbina, se supondrá un rendimiento mecánico del conjunto turbina-alternador de un 90% y un rendimiento eléctrico del alternador de un 92%.

La presión del condensador se ha fijado en un valor de 0.1 bar.

Para la definición de cada estado del ciclo, se parte de los estados 1c y 1e, correspondientes a los estados del vapor a la salida de cada recuperador. Realizando un balance de energía en cada recuperador, se obtiene el flujo de vapor que recorre cada recuperador de calor.

Para el recuperador de calor de la corriente de salida de los ciclones:

$$Q_c = \dot{m}_{vc} \cdot (h_{1c} - h_4)$$

Siendo Q_c el calor recuperado, \dot{m}_{vc} el flujo de vapor que recorre dicho recuperador, h_{1c} el estado de vapor a la salida del recuperador y h_4 el estado de vapor a la entrada del mismo.

De manera análoga se actuaría para el caso del recuperador en el caso de la corriente de salida del enfriador del clínker:

$$Q_e = \dot{m}_{ve} \cdot (h_{1e} - h_4)$$

Siendo Q_e el calor recuperado, \dot{m}_{ve} el flujo de vapor que recorre dicho recuperador, h_{1e} el estado de vapor a la salida del recuperador y h_4 el estado de vapor a la entrada del mismo.

De estas ecuaciones, se obtienen ambos flujos máxicos, tanto \dot{m}_{vc} como \dot{m}_{ve} .

El siguiente paso sería definir el estado 1. Para ello se realiza un balance tanto de masa como de energía en dicho punto.

Realizando el balance de masa, se obtiene \dot{m}_v :

$$\dot{m}_{vc} + \dot{m}_{ve} = \dot{m}_v$$

Una vez se ha obtenido \dot{m}_v se realiza el balance de energía para obtener h_1 :

$$\dot{m}_{vc} \cdot h_{1c} + \dot{m}_{ve} \cdot h_{1e} = \dot{m}_v \cdot h_1$$

Una vez se ha definido el estado 1, tras la expansión en la turbina hasta una presión de 0.1 bar, se puede obtener el estado 2s (estado correspondiente a un ciclo ideal, en el cual

el rendimiento isoentrópico es del 100%), para obtener el estado real en dicho punto, el 2, hay que tener en cuenta el rendimiento isoentrópico de la turbina:

$$\eta_{\text{turbina}} = \frac{\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}\right)}{\left(\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}}\right)_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

El estado 3, correspondiente al estado a la salida del condensador, queda definido con la presión y el título (a la salida del condensador el título es 0)

Por último, para definir el estado 4 se calcula el trabajo necesario de la bomba

$$\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}}\right)_s = v_3 \cdot (p_4 - p_3)$$

Y una vez calculado dicho trabajo, se introduce el rendimiento isoentrópico de la bomba para calcular el trabajo real, y se obtiene h_4 .

$$\eta_{\text{bomba}} = \frac{\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}}\right)_s}{\left(\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}}\right)} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$

Finalmente, una vez que se han fijado todos los estados, para calcular el trabajo neto eléctrico obtenido, hay que restar al trabajo producido por la turbina el trabajo necesario de la bomba y multiplicarlo por el rendimiento mecánico y eléctrico, definidos anteriormente:

$$W_{\text{elec}} = \dot{m}v \cdot (h_1 - h_2 - (h_4 - h_3)) \cdot \eta_{\text{mec}} \cdot \eta_{\text{elec}}$$

Para la definición de todos los estados, y la resolución del ciclo se ha utilizado el programa EES, el código utilizado para la simulación se encuentra en la sección de Anexos.

En la tabla 11 se pueden observar cada estado con sus propiedades termodinámicas, la temperatura, entalpía y presión.

Tabla 11. Estados del ciclo Rankine

Punto	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Entalpía (kJ/kg)
1c	3000	300	2993
1e	3000	240	2823
1	3000	277,8	2934
2	10	45,82	2355
3	10	45,82	191,8
4	3000	46,04	195,4

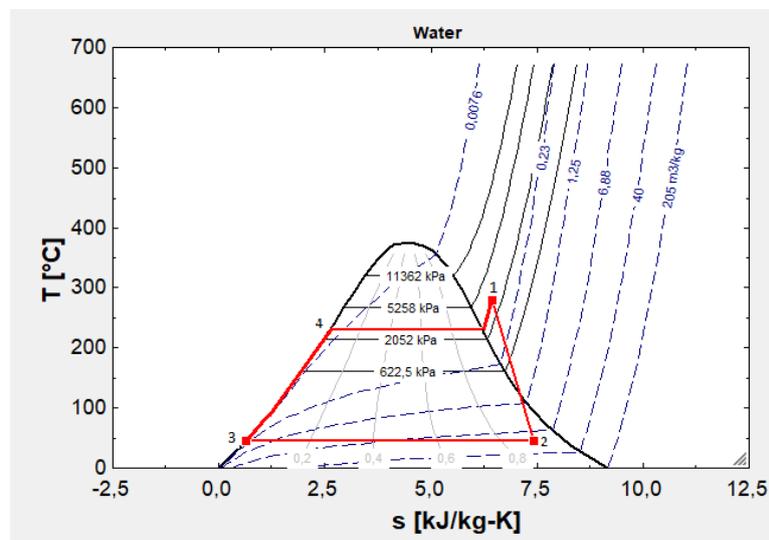
Tras la simulación del ciclo, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 12. Resultados simulación

<i>m_v</i>	8,068 kg/s
<i>m_{vc}</i>	5,295 kg/s
<i>m_{ve}</i>	2,772 kg/s
<i>W_b</i>	3,776 kW
<i>W_{elec}</i>	3,872 MW

Se observa que se consigue una potencia eléctrica neta en la turbina de 3,872 MW.

A continuación, se puede observar el diagrama T-s del ciclo Rankine



Gráfica 12. Diagrama T-s

9.3.2. Ciclo Orgánico de Rankine (ORC)

A través del ciclo ORC se puede obtener energía eléctrica y calor. Al igual que un ciclo de Rankine convencional, permite la obtención de la energía eléctrica con la ventaja de que la temperatura de los condensados suele estar entre los 90 °C, pudiendo hacerse un uso posterior del mismo en las propias instalaciones de la planta. Hay que tener en cuenta que los rendimientos de este ciclo rondan el 80-90% en producción de energía térmica, mientras que respecto al rendimiento de generación eléctrica suele encontrarse en valores entre 15 y 20%, valores inferiores en general en comparación con el ciclo de Rankine convencional.

En lo que respecta al dimensionamiento de estos equipos, son sistemas compactos, que se compran en paquetes al fabricante e incluyen todos los equipos necesarios tanto para la generación de energía eléctrica como para la producción de agua caliente. Existen varios fabricantes, pero como se ha comentado en el apartado 5 de este trabajo, Turboden es la que más avanzada está en la utilización de la tecnología ORC para aprovechar calores residuales. Es por ello que, para la elección de esta alternativa, se va a escoger una unidad compacta ORC fabricada por Turboden.

Tanto los gases provenientes del enfriador del clínker como los que provienen de la salida de los ciclones, son introducidos en recuperadores de calor, con el objetivo de transferir el calor que poseen los gases residuales a un aceite térmico que va a actuar como fluido intermedio cuya misión principal es transferir el calor de los gases hasta el fluido orgánico. La mayoría de los sistemas ORC funcionan bajo este principio de utilización de un aceite térmico, como fluido intermedio de transporte. La razón principal es que en las plantas de cemento el espacio disponible suele estar muy limitado, por lo que la unidad compacta ORC no se podría instalar con facilidad a la salida de los gases de cada corriente, teniendo que buscar un lugar más alejado. Esto influye directamente en la temperatura de los gases, puesto que a medida que se aleja la recuperación del calor de los gases con respecto a la salida de los mismos la corriente gaseosa va perdiendo temperatura, hecho perjudicial, ya que se reduce el calor disponible, afectando directamente a la posterior recuperación de calor.

Es por ello que, para el caso en estudio de este trabajo, se ha considerado que el espacio es ajustado en la planta, no disponiendo del espacio suficiente para situar la unidad ORC

a la salida de las corrientes gaseosas, por lo que se ha optado por la recuperación de calor mediante fluido intermedio. Dicho esquema, se puede observar en la ilustración 26.

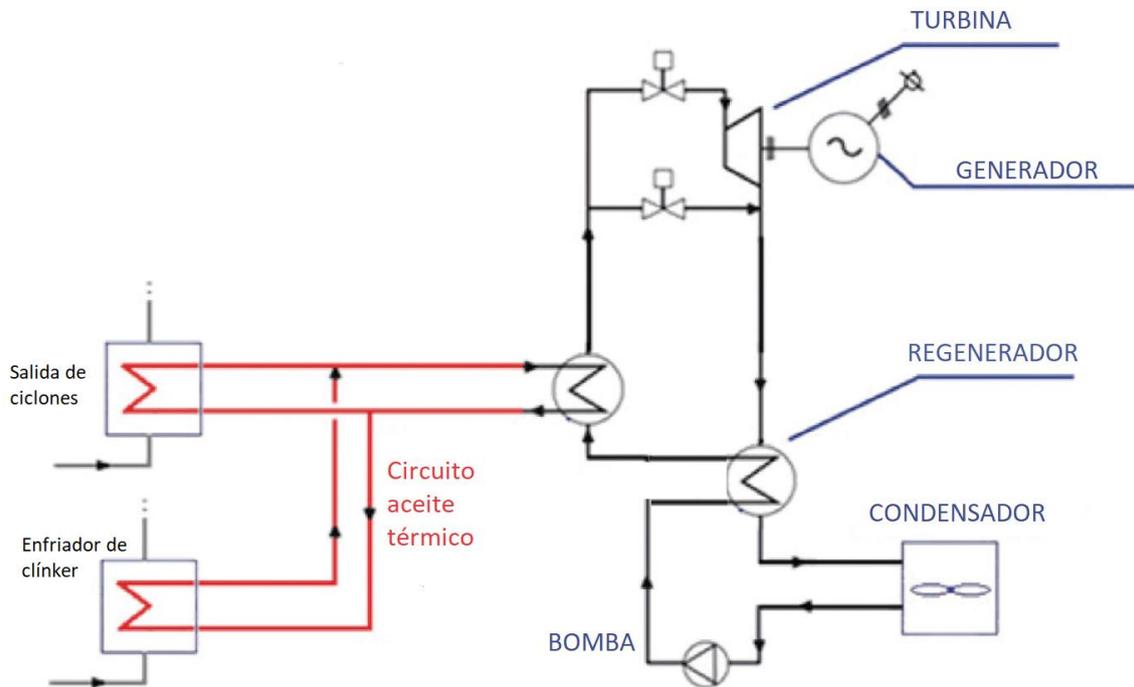


Ilustración 26. Esquema recuperación calor ORC (Fuente: IFC)

El aceite térmico transporta el calor, cediéndolo al fluido orgánico en el recuperador de la unidad de ORC. El fluido orgánico, de gran peso molecular, es calentado y posteriormente se expande en la turbina, que está conectada a un alternador, para la generación de electricidad. El fluido orgánico una vez expandido, se condensa y es impulsado por una bomba para cerrar el ciclo y empezar de nuevo.

Para la elección de la unidad compacta de ORC de Turboden es necesario acudir al catálogo de unidades disponibles, previamente diseñadas y con valores prefijados, disponibles en diferentes rangos de potencia. Turboden realiza, aunque con poca frecuencia, diseños de unidades personalizadas, partiendo de las características disponibles en cada caso, pero estas unidades solo están disponibles para unidades de generación superior a los 15 MW, no siendo el caso en estudio de este proyecto.

Las unidades disponibles de ORC para la recuperación del calor residual son los modelos de la categoría HR (Heat Recovery), estando recogidos los diferentes modelos disponibles en el catálogo de Turboden, que se encuentra en el apartado de Anexos.

Los parámetros fijados por Turboden para la selección del modelo a instalar son el calor disponible residual y la temperatura del aceite térmico a la entrada.

El calor disponible en los humos ha sido calculado en el apartado 8.2 tras analizar ambas corrientes de gases y, haciendo los pertinentes cálculos, el calor disponible a recuperar es de aproximadamente 22,1 MW. Este calor es una aproximación, debido a que las temperaturas de los gases no se mantienen constantes en todo momento, sufriendo pequeñas variaciones a lo largo del proceso productivo del cemento, con lo que el calor disponible puede variar respecto del valor calculado. Observando el catálogo se determina que la unidad a seleccionar para el caso en estudio de este trabajo se encuentra en el rango de unidades 27 to 40 HR (los calores disponibles van desde 13 a 22 MW) y en la que los rendimientos varían del 16 al 20 % dependiendo de cada unidad en concreto.

No se ha tenido acceso a todas las unidades disponibles en el rango comentado (27 to 40 HR). En Anexos se pueden observar los diferentes rangos disponibles y, dentro de cada rango hay un modelo con las características específicas, pero para el caso de la planta en estudio con una potencia térmica disponible de 22,1 MW (es un valor que no es fijo, debido a la variabilidad de las temperaturas de salida de las corrientes gaseosas como se ha comentado anteriormente), podría encajar con el modelo 40 TD HR SPLIT, el cual puede trabajar con hasta 21,4 MW de calor recuperado generando una potencia eléctrica neta de 3,8 MW.

Por lo que para la alternativa de recuperación de los calores residuales a través de un ciclo ORC, y con las condiciones comentadas anteriormente, se procedería a escoger la unidad 40 TD HR SPLIT de Turboden.

9.4. Selección de la alternativa

En primer lugar, cabe destacar que para ambas alternativas la potencia neta a instalar es similar, ligeramente superior en el Ciclo Rankine de vapor, obteniéndose una potencia neta de 3,872 MW frente a 3,8 MW de potencia para el caso del ORC, de los aproximadamente 22 MW de potencia térmica disponible a recuperar. Por tanto, ambas alternativas presentan el mismo rendimiento para el caso en estudio (aproximadamente del 18%). Estos rendimientos son habituales en el ORC, en el que se encuentran rendimientos en torno al 16-20%, mientras que el Ciclo Convencional de Rankine generalmente no presentan rendimientos tan bajos. Para el caso particular de este estudio, el rendimiento es menor debido a las temperaturas de las corrientes de gases residual (el Ciclo Rankine Convencional generalmente tiene sentido su utilización con corrientes a partir de 450°C). Es por ello que la compra de una turbina de vapor de 3,9 MW, además de tener un mal rendimiento isoentrópico (65%, normalmente se suelen encontrar en torno al 85%), su coste para esa potencia se dispararía, suponiendo un coste de unos dos millones de euros más que para el caso del ORC.

Otro aspecto importante a tener en cuenta para la selección de la solución a instalar es que los equipos ORC son equipos modulares compactos por lo que, al elegir esta solución, se produce un ahorro tanto del espacio requerido para su instalación como de los costes asociados al montaje de los diferentes componentes y de obra civil. Además, los costes de mantenimiento, al tratarse de una unidad compacta y automatizada, se ven reducidos respecto al ciclo Rankine convencional.

Desde el punto de vista operacional, cabe destacar un factor negativo a tener en cuenta para el caso de la turbina de vapor. En la industria cementera, las corrientes de gases residuales a recuperar, generalmente sufren variaciones de temperaturas, hecho que influye directamente en el calor disponible a recuperar, y en las condiciones de diseño del punto 1 del ciclo (entrada turbina), ya que si en algún momento dado baja a una temperatura considerablemente inferior a la tomada como referencia, puede tener influencia de forma directa, puesto que puede provocar que las condiciones de la calidad del vapor a la salida de la turbina (el título) se vea disminuida, llegando a valores que pueden ser inferiores al 85% del título, lo que provocaría daños muy perjudiciales a la turbina. Esto es debido a que cuando el vapor se encuentra con títulos inferiores al 85%,

las gotas de agua que hay en el vapor, al girar en la turbina a altas revoluciones, se comportar como “perdigones” que dañan gravemente la turbina, causando grandes daños. Por lo que este problema es un aspecto a tener muy en cuenta, cuando se trabaja con calores residuales cuyas temperaturas no son excesivamente altas, y puede provocar estos problemas señalados respecto al título de vapor a la salida de la turbina. Este tipo de problemas no se manifiestan en el ORC, ya que, para esta alternativa, al usar fluidos secos (ausencia de humedad en el vapor), en la expansión de la turbina no se crean gotas que puedan erosionar el álabe, causando daños en la turbina.

Finalmente, por todos los motivos señalados anteriormente, se ha considerado que la mejor alternativa para el caso en estudio de este proyecto es la alternativa del ciclo ORC, por lo que como se ha comentado en dicho apartado, para el caso del ORC se va a seleccionar la alternativa de Turboden, concretamente el modelo 40 TD HR SPLIT, con una potencia neta eléctrica de 3,8 MW.



Ilustración 27. Unidad compacta Turboden

10. PLANIFICACIÓN

10.1. Descripción de tareas

Las diferentes tareas necesarias para llevar a cabo la consecución del proyecto descrito en este trabajo, junto con las fechas de inicio, fin y duración de cada una de ellas, se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Tareas para la consecución del proyecto

Actividad	Inicio	Final	Duración
Ingeniería básica	10/09/2018	10/12/2018	3 meses
Ingeniería de detalle	10/12/2018	10/06/2019	6 meses
Compra de equipos	10/12/2018	10/11/2019	11 meses
Obra civil	10/04/2019	25/06/2019	4 meses
Montaje mecánico	10/11/2019	10/01/2020	2 meses
Montaje eléctrico e instrumentación	10/01/2020	10/03/2020	2 meses
Puesta en marcha	10/03/2020	10/05/2020	2 meses

A continuación, se van a analizar y describir con más profundidad las diferentes tareas que conforman el proyecto en estudio:

Ingeniería básica

Constituye la primera fase del proyecto, en la cual se analizan las diferentes alternativas disponibles, así como la ubicación de la unidad a construir dentro de las instalaciones de la planta. También se definen de forma general los equipos necesarios para llevar a cabo la consecución del proyecto.

Ingeniería de detalle

En esta fase, los aspectos generales definidos en la ingeniería básica se acoplan y se definen específicamente para el proyecto en cuestión. Define entre otros asuntos de forma exacta el diseño concreto de la instalación, así como cada uno de los diferentes equipos necesarios a utilizar para llevar a cabo el proyecto.

Compra de equipos

Una vez se han definido los equipos específicos necesarios para el correcto funcionamiento del proyecto, ya se puede proceder a la compra de los mismos. Para el caso concreto de la alternativa seleccionada, el ciclo ORC, la unidad compacta de Turboden, el tiempo de entrega estimada como se puede observar en el catálogo (ver Anexo II), se encuentra entre 11-13 meses, para la definición de la planificación de este proyecto se ha considerado una duración de 11 meses.

Obra civil

La obra civil del proyecto, con la preparación del espacio necesario y la construcción de los elementos requeridos para el desarrollo del proyecto, se ha estimado en una duración de 4 meses. La obra civil puede comenzarse una vez se haya finalizado la ingeniería básica y haya pasado un período desde el inicio de la ingeniería de detalle (4 meses), para definir algunos criterios necesarios.

Montaje mecánico

Una vez llegan los equipos a la instalación ya es posible la instalación y el acoplamiento de los mismos.

Montaje eléctrico e instrumentación

Cuando los diferentes equipos han sido instalados apropiadamente, el siguiente paso es la conexión eléctrica de los mismos, así como establecer un paso clave para el funcionamiento de la instalación, el control automático de los equipos mediante el control SCADA.

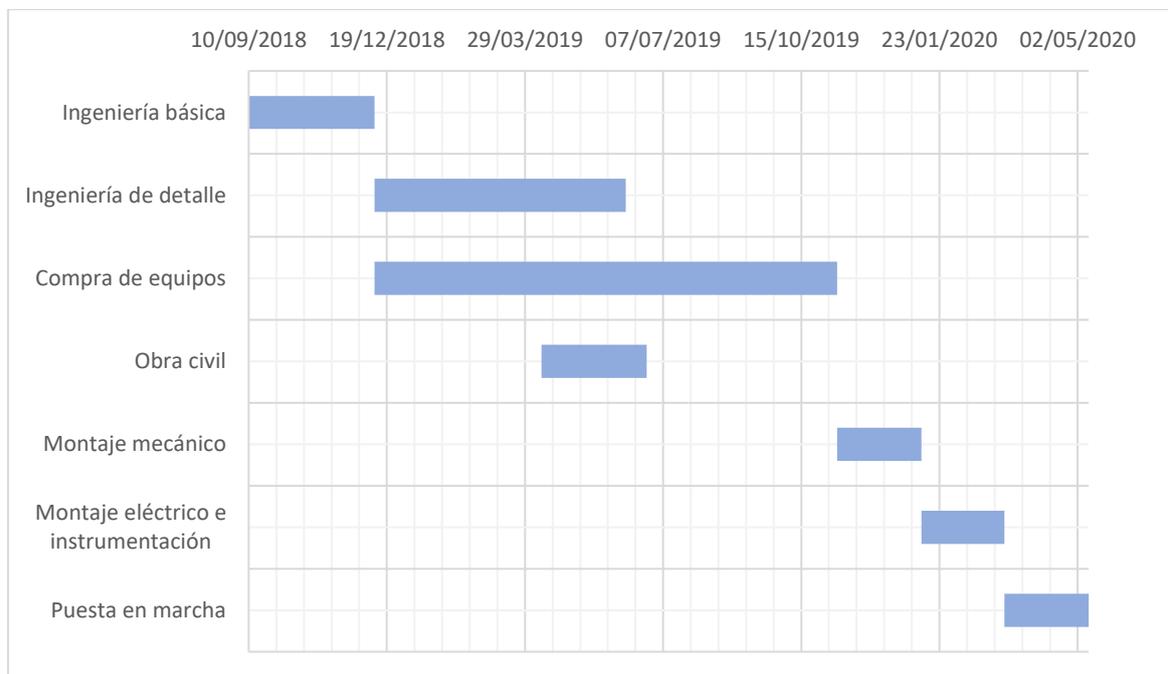
Puesta en marcha

La última actividad a realizar, y que constituye el factor clave del proyecto, es la puesta en marcha. Generalmente es un proceso laborioso, debido a que hay que solventar los posibles problemas que pueden aparecer en las fases anteriores, y que pueden ocasionar el fallo del sistema, impidiendo el correcto funcionamiento de la instalación.

10.2. Diagrama de Gantt

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt creado a partir de las actividades descritas en el anterior subapartado.

Cabe destacar la fecha de inicio del proyecto, 10 de septiembre de 2018, y la del final del mismo, 10 de mayo de 2020, dando lugar a una duración del proyecto, que asciende a un total de 20 meses.



Gráfica 13. Diagrama de Gantt

Hay que destacar también que, para la realización de algunas tareas, como se puede observar en el diagrama, no es necesario la consecución de las mismas, como lo son la compra de equipos o la obra civil, en las cuales no es necesario haber finalizado la tarea anterior para empezar con dicha actividad. Sin embargo, la ingeniería de detalle, montaje mecánico, montaje eléctrico e instrumentación y la puesta en marcha, sí que son tareas que no se pueden realizar hasta que la tarea predecesora haya finalizado, por lo que un retraso en alguna de ellas conllevaría un retraso en la totalidad del proyecto.

11. PRESUPUESTO

En este apartado se va a representar el presupuesto, es decir la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto de este trabajo, con el objetivo de realizar un análisis de rentabilidad en el siguiente apartado y analizar la viabilidad de dicho proyecto. El presupuesto total del proyecto para la alternativa seleccionada, el Ciclo Orgánico de Rankine, asciende a un total de 12.303.000 €. A continuación, se procede a desglosar el presupuesto en las diferentes partidas que lo componen.

Tabla 14. Desglose del presupuesto

PRESUPUESTO

Equipo	7.690.000 €
Auxiliares	1.486.000 €
Electrónica y control	665.000 €
Obra Civil	512.000 €
Montaje Mecánico	720.000 €
Montaje Eléctrico	1.230.000 €
TOTAL	12.303.000 €

Como se puede observar en la tabla 14, el coste mayoritario es debido a la unidad compacta ORC, que representa más de la mitad del presupuesto total del proyecto y entre los equipos que se incluyen destacan los recuperadores de calor, la turbina, la bomba y el condensador.

Cabe destacar que el importe correspondiente a la obra civil se ve reducido respecto a otras alternativas, debido a que se trata de una unidad compacta.

12. ANÁLISIS DE RENTABILIDAD

Como conclusión del trabajo, se va a realizar un análisis de rentabilidad con el objetivo de analizar la viabilidad del proyecto, determinando el tiempo de retorno de la inversión necesaria para llevar a cabo el proyecto.

Inversión inicial

Como se ha concluido en el apartado 8, se ha optado por elegir la alternativa del ciclo ORC y, como se ha establecido en el anterior apartado (Presupuesto), para dicha alternativa se ha considerado una inversión necesaria de 12.303.000 €.

Producción anual

En primer lugar, como se ha ido comentando a lo largo del trabajo, para el caso de las plantas cementeras en las cuales existe un gran consumo de energía eléctrica, generalmente se dice que, con la incorporación de un sistema de recuperación de calor residual se puede cubrir entre un 20-30% de la demanda eléctrica de la planta. Por tanto, se va a comprobar este cálculo para el caso concreto de la planta en estudio en este trabajo.

La demanda de energía eléctrica para el caso particular de este proyecto ha quedado definida en el apartado 7.1.1, obteniendo un total de energía eléctrica anual demandada de 110.000.000 kWh. A continuación, se va a calcular la energía eléctrica generada a lo largo de un año con la alternativa seleccionada, con las siguientes consideraciones:

- Se considera una disponibilidad de 7.500 h anuales de operación del ORC
- La potencia eléctrica de la unidad ORC es de 3,8 MW

Tabla 15. Energía eléctrica anual generada

Potencia unidad ORC (MW)	Horas anuales operación	Energía eléctrica anual generada (MWh)
3,8	7.500	28.500

Multiplicando la potencia por las horas anuales de operación de la unidad, se obtiene un total de 28.500 MWh de generación de energía eléctrica, lo que supone un porcentaje de un 25,9% del consumo eléctrico total de la planta, que es una cifra reseñable.

Una vez conocida la cantidad de energía eléctrica generada anualmente, los beneficios de la inversión llevada a cabo provienen de la cantidad de energía eléctrica que se autoconsume y que, por lo tanto, se deja de comprar a la Red Eléctrica.

Para ello se ha considerado un precio de compra de la electricidad a Red Eléctrica de 70 €/MWh, puesto que las cementeras son grandes consumidoras de electricidad y es por ello que el precio de compra se ve reducido en comparación con otras industrias.

Tabla 16. Ahorro bruto anual

Energía eléctrica generada anualmente (MWh)	Precio compra electricidad (€/MWh)	Ahorro bruto anual (€)
28.500	70	1.995.000

A la cantidad calculada de ahorro anual habría que descontarle los costes de operación y mantenimiento, que se han establecido en 190.000 € al año, por lo que finalmente el ahorro neto anual es de 1.805.000 €.

Rentabilidad

El tiempo de retorno simple se define como:

$$TRS = \frac{\text{Inversión realizada}}{\text{Ahorro neto anual}} = \frac{12.303.000}{1.805.000} = 6,8 \text{ años}$$

Tabla 17. Análisis rentabilidad

Año	Inversión Inicial (€)	Ahorro bruto anual (€)	Costes operación y mantenimiento (€)	Ahorro neto	Acumulado
1	12.303.000	1.995.000	190.000	1.805.000	-10.498.000
2		1.995.000	190.000	1.805.000	-8.693.000
3		1.995.000	190.000	1.805.000	-6.888.000
4		1.995.000	190.000	1.805.000	-5.083.000
5		1.995.000	190.000	1.805.000	-3.278.000
6		1.995.000	190.000	1.805.000	-1.473.000
7		1.995.000	190.000	1.805.000	332.000
8		1.995.000	190.000	1.805.000	2.137.000

En la tabla 17 se puede observar el análisis de rentabilidad año por año, mostrándose cuál sería el beneficio para cada año. Se observa que, tal y como se había calculado con la fórmula del TRS anteriormente (6.8 años), es a partir de séptimo año cuando los beneficios tienen un valor positivo y por lo tanto esto indica que la inversión ha sido recuperada.

Analizando el TRS se puede afirmar que el proyecto es viable puesto que no es un tiempo de retorno excesivamente largo. Además, cada vez la utilización de los ORC es más común por lo que en los próximos años los costes asociados a esta tecnología serán menores, siendo aún más rentables.

Finalmente, cabe destacar que además del ahorro económico ya comentado, la instalación también supone un ahorro anual de las emisiones indirectas de CO₂ asociadas a la compra de la energía eléctrica:

Tabla 18. Ahorro emisiones de CO₂ asociadas a la energía eléctrica

Energía eléctrica generada anualmente (kWh)	Factor de emisión (kg de CO ₂ eq/kWh)	Ahorro emisiones CO ₂ (ton)
28.500.000	0,385	10.972,5

13. CONCLUSIONES

La realización de este trabajo ha venido motivada por la gran demanda energética de las plantas cementeras y la existencia de focos con excedentes térmicos que no son aprovechados a lo largo del proceso de fabricación del cemento. Por ello, en primer lugar, se ha conseguido comprender en profundidad el proceso de fabricación, con el objetivo de identificar dichos excedentes térmicos, seleccionando dos corrientes de gases residuales; la corriente de salida de los ciclones, así como la corriente gaseosa que egresa del enfriador del clínker.

Tras la identificación de las corrientes residuales a recuperar, se han considerado dos posibles alternativas para la introducción del sistema de cogeneración con ciclo de cola; el ciclo Rankine convencional y el ciclo Orgánico de Rankine. Una vez se han estudiado ambos casos, se concluye que la potencia neta a instalar es similar, ligeramente superior en el Ciclo Rankine de vapor (3,872 MW frente a 3,8 MW del ORC), por lo que, en cuanto a términos de rendimiento se refiere, ambas alternativas son semejantes. Analizando ambas opciones para el caso en estudio, se ha optado por el ciclo ORC, debido principalmente a la reducción de los costes de instalación y operación, al tratarse de una unidad compacta y totalmente automatizada. Los costes de mantenimiento también se ven reducidos frente al ciclo Rankine Convencional, debido a que, para esta alternativa, la variabilidad de temperaturas existentes en las corrientes residuales puede desencadenar grandes problemas de erosión de los álabes, como se ha comentado anteriormente. Sin embargo, para el caso del ORC al producirse la expansión con un fluido orgánico seco, no existe este problema, por lo que consecuentemente también se ven reducidos los costes asociados al mantenimiento.

Una vez escogida la alternativa ORC, se procede a instalar una unidad compacta Turboden, modelo 40 TD HR SPLIT, con una potencia neta eléctrica de 3,8 MW.

Posteriormente, se realiza un análisis de rentabilidad en el cual se obtiene que la energía eléctrica anual producida por la alternativa seleccionada supone un 25,9% de la demanda total anual, con lo que supone un gran ahorro económico, así como un ahorro de emisiones de CO₂ asociadas a la compra de electricidad (10.972, 5 ton de CO₂). Finalmente, se realizan los cálculos teniendo en cuenta la inversión necesaria y el ahorro anual que se

obtiene, resultando en un tiempo de retorno de la instalación de 6,9 años aproximadamente, cifra que supone un período de amortización de la instalación aceptable, teniendo en cuenta los beneficios que supone y el tiempo de duración de una planta cementera.

Por lo tanto, la realización de este proyecto se puede considerar satisfactoria desde el punto de vista económico para el caso concreto del estudio para la planta estudiada.

Para cada planta cementera habría que realizar un caso particular de estudio, puesto que existe mucha diversidad respecto a las características de cada planta (niveles de producción, tamaño, temperaturas de los efluentes gaseosos...), puntos que resultan clave para la determinación de la alternativa a seleccionar para la instalación de recuperación. Como se ha comentado en los puntos introductorios de este trabajo, China tiene instaladas un gran número de instalaciones de recuperación de calor residual, la mayoría de ellas han seleccionado una instalación que funciona bajo el ciclo convencional de Rankine, hecho producido por el gran tamaño de las instalaciones en el país asiático, hecho que influye directamente en la temperatura de salida de los gases residuales, haciendo que al salir con mayores temperaturas sea más rentable dicha alternativa frente al ciclo ORC. Sin embargo, en Europa se está apostando por las instalaciones que funcionan bajo el ciclo ORC, siendo Turboden el fabricante referencia, y viéndose aumentado cada año el número de instalaciones de recuperación en las plantas cementeras. Este hecho va a continuar en ascenso según las previsiones por los beneficios que conlleva, convirtiendo a las plantas cementeras, grandes consumidoras de energía eléctrica, en plantas más eficientes.

REFERENCIAS

- [1] International Cement Review. *A Review of Global Cement Industry Trends*. 2017
- [2] CEMBUREAU (The European Cement Association). Activity Report 2017
Sitio web: <https://cembureau.eu/>
- [3] Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, en colaboración con OFICEMEN.
Agenda Sectorial de la Industria del Cemento. 2018
- [4] Guillaume Jeangros (Aqylon). Global Cement Magazine. December, 2015
- [5] Institute for Industrial Productivity, International Finance Corporation. *Waste Heat Recovery for the Cement Sector: Market and Supplier Analysis*. 2014
- [6] B.Abmay, A.Aharoune, L. Bouirden and A.Ihlai. *Potential of recovery and conversion of waste heat from rejected exhaust gases in Moroccan Industry: Application to the cement manufacturing sector*. October,16, 2016.
- [7] Thomas Börrnert & Dr. Thomas Bürki, ABB Switzerland Ltd. *Waste Heat Generation*. International Cement Review. November 2010
- [8] Carlos Arribas. *Emisiones en España por sectores*. Revista El Ecologista nº 86
- [9] Cámara de Zaragoza. *Calculador de emisiones. Factor de emisión de consumo eléctrico*.
- [10] Michael J Moran, Howard N. Shapiro. *Fundamentos de Termodinámica Técnica*. 2ª edición.2012
- [11] Turboden. International Cement Review. *The organic option*. Septiembre 2015
- [12] Turboden. International Cement Review. *ORC: direct exchange*. Junio 2017
- [13] J. P Paredes-Sánchez, O.J Restrepo-Baena, B. Álvarez-Rodríguez, A. M Osorio-Correa & G. Restrepo. *Using waste energy from the Organic Rankine Cycle cogeneration in the Portland cement industry*. October 25, 2015
- [14] International Cement Review. *Going Organic*, by Turboden. 2018
- [15] IECA (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones)
Sitio web: <https://www.ieca.es/>

ANEXOS

ANEXO I: CÁLCULOS

A continuación, se adjunta el código del programa EES (Engineering Equation Solver), mediante el cual se calcula la potencia neta eléctrica que se puede generar, con los datos de partida del ciclo, que han sido definidos previamente.

```
{TRABAJO FIN DE MASTER}
{DEFINE UNITS: kPa; °C; kJ}
```

```
{General data}
```

```
eta_t=0,65          {-}
eta_p =0,80         {-}

eta_mec=0,90        {-}
eta_elec=0,92       {-}
```

```
{STATE 1c}
```

```
p_c[1]=3000         {kPa}
T_c[1]=300          {°C}
h_c[1]=Enthalpy(Water;T=T_c[1];P=P_c[1]) {kJ/kg}
```

```
14810,68=m_vap_c*(h_c[1]-h[4])
```

```
{STATE 1e}
```

```
p_e[1]=3000         {kPa}
T_e[1]=240          {°C}
h_e[1]=Enthalpy(Water;T=T_e[1];P=P_e[1]) {kJ/kg}
7285,12=m_vap_e*(h_e[1]-h[4])
```

```
{Balance punto 1}
```

```
m_vap=m_vap_c+m_vap_e
```

```
m_vap_c*h_c[1]+m_vap_e*h_e[1]=m_vap*h[1]
```

{STATE 1}

{Data}

$$p[1] = 3000 \quad \text{{kPa}}$$

{Calculations}

$$s[1] = \text{Entropy}(\text{Water}; h=h[1]; P=P[1]) \quad \text{{kJ/kgk}}$$

$$T[1] = \text{Temperature}(\text{Water}; P=P[1]; h=h[1]) \quad \text{{°C}}$$

{STATE 2s}

{Data}

$$p[2] = 10 \quad \text{{kPa}}$$

$$s_s[2] = s[1] \quad \text{{kJ/kgk}}$$

{Calculations}

$$h_s[2] = \text{Enthalpy}(\text{Water}; P=P[2]; s=s_s[2]) \quad \text{{kJ/kg}}$$

{STATE 2}

{Calculations}

$$\eta_{t} = (h[1] - h[2]) / (h[1] - h_s[2]) \quad \text{{-}}$$

$$T[2] = \text{Temperature}(\text{Water}; P=P[2]; h=h[2]) \quad \text{{°C}}$$

$$x[2] = \text{Quality}(\text{Water}; P=P[2]; h=h[2]) \quad \text{{-}}$$

$$s[2] = \text{Entropy}(\text{Water}; h=h[2]; P=P[2]) \quad \text{{kJ/kgk}}$$

{STATE 3}

{Data}

$$x[3] = 0 \quad \text{{-}}$$

$$p[3] = 10 \quad \text{{kPa}}$$

{Calculations}

$$h[3] = \text{Enthalpy}(\text{Water}; x=x[3]; P=P[3]) \quad \text{{kJ/kg}}$$

$$v[3] = \text{Volume}(\text{Water}; x=x[3]; P=P[3]) \quad \text{{kJ/kg}}$$

$$T[3] = \text{Temperature}(\text{Water}; P=P[3]; x=x[3]) \quad \text{{kJ/kg}}$$

$$s[3] = \text{Entropy}(\text{Water}; P=P[3]; x=x[3]) \quad \text{{kJ/kgk}}$$

{STATE 4}

{Data}

$p[4]=3000$ {kPa}

{Calculations}

$Wb_s=(v[3]*(p[4]-p[3]))$ {kJ/kg}
 $Wb=Wb_s/eta_p$ {kJ/kg}
 $h[4]=h[3]+Wb$ {kJ/kg}
 $T[4]=Temperature(Water;P=P[4];h=h[4])$ {kJ/kg}
 $s[4]=Entropy(Water;h=h[4];P=P[4])$ {kJ/kgk}

{RESULTS}

$Welec=m_vap*(h[1]-h[2]-(h[4]-h[3]))*eta_mec*eta_elec/1000$ {MW}

ANEXO II: CATÁLOGO TURBODEN

A continuación, se va a mostrar el catálogo del fabricante Turboden para la gama HR (Heat Recovery), la gama que aplicaría en el caso de estudio de este proyecto, al tratarse de una recuperación de calor residual.

Turboden Heat Recovery (HR) Units - Typical Range of Operation and Performances

		TURBODEN 6/7 HR <i>DE</i>		TURBODEN 10 to 14 HR <i>DE</i>		TURBODEN 18 to 24 HR <i>DE</i>		TURBODEN 27 to 40 HR <i>DE</i>		TURBODEN 50 to 100 HR <i>DE</i>	
		Range of Operation	Reference Case TD 6 HR	Range of Operation	Reference Case TD 10 HR	Range of Operation	Reference Case TD 22 HR SPLIT	Range of Operation	Reference Case TD 40 HR SPLIT	Range of Operation	Reference Case TD 70 HR
INPUT* - Thermal Oil											
Thermal Oil inlet temperature	°C	240-300	270	240-310	290	240-310	285	250-315	315	240-310	290
Thermal Oil outlet temperature	°C	170-120	140	170-120	145	170-120	120	170-120	130	150-110	115
Thermal power input	MW	2.5-4.0	3.0	5.0-7.0	5.54	8.0-12.0	11.21	13.0-22.0	21.40	24.0-50.0	32.00
Thermal Oil inlet temperature	°F	464-572	518	464-590	554	464-590	545	482-599	599	464-590	554
Thermal Oil outlet temperature	°F	338-248	284	338-248	293	338-248	248	338-248	266	302-230	239
Thermal power input	MMBtu/hr	8.53-13.65	10.24	17.06-23.88	18.90	27.30-40.95	38.25	44.38-75.07	73.02	81.89-170.61	109.00
OUTPUT** - Cooling Water											
Typical cooling water temperature (in/out)	°C	25/35	25/35	25/35	26/38	25/40	22/40	20/45	22/54	25/40	20/27
Thermal power to condenser	MW	2.0-3.5	2.4	4.0-5.0	4.4	6.0-9.5	9.0	10.0-17.5	17.2	19.2-40.0	25.2
Typical cooling water temperature (in/out)	°F	77/95	77/95	77/95	79/100	77/104	72/104	68/113	72/129	77/104	68/81
Thermal power to condenser	MMBtu/hr	6.82-11.94	8.19	13.65-17.06	15.01	20.47-32.42	30.71	34.12-59.71	58.69	65.51-136.49	86.00
PERFORMANCES											
Gross electric power	kW	500-800	600	900-1600	1108	1700-2500	2120	2600-4500	4000	4800-10500	6800
Gross electric efficiency***		17%-20%	20%	17%-22%	20%	17%-22%	19%	17%-21%	19%	17%-22%	21%
Captive power consumption	kW	18-36	25	36-70	46	60-100	80	100-200	200	200-800	465
Net active electric power output	kW	480-760	575	850-1550	1062	1650-2400	2040	2500-4000	3800	4500-9900	6335
Net electric efficiency***		16%-19%	19%	16%-21%	19%	16%-21%	18%	16%-20%	18%	16%-21%	20%
Electric generator****		50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 400V 60Hz, 480V	50Hz, 660V 60Hz, 4160V	50Hz, 660V 60Hz, 4160V	50Hz, 6kV 60Hz, 4160V	50Hz, 6kV 60Hz, 4160V	50Hz, 6kV 60Hz, 4160V	60Hz, 4160V
Cooling systems		closed loop water cooling or wet tower		closed loop water cooling or wet tower		closed loop water cooling or wet tower		closed loop water cooling or wet tower		wet tower or air condenser	
Typical delivery time (EXW)	Months	9-11		9-11		9-11		11-13		12-14	

Ilustración 28. Catálogo Turboden

ANEXO III: MARCO REGULATORIO

A continuación, se va a describir el marco regulatorio que tiene aplicación en este proyecto. La implantación de un sistema de cogeneración a través de la recuperación del calor residual mediante ORC viene regulada en la siguiente normativa:

Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Este proyecto podrá acogerse a Real Decreto, como se establece en el artículo 2 del mismo; Ámbito de aplicación, quedando recogido en el grupo a.2. Se muestra a continuación el fragmento comentado 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 -27- 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, 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, como es nuestro caso, utilizada la energía eléctrica para satisfacer alrededor del 30% de la demanda eléctrica de la planta.

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.

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.