

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DEL ORUJILLO DE ACEITUNA

| | |
|------------------------|-------------------------------------|
| Alumno | <i>Iglesias Loredó, Ruben</i> |
| Director | <i>De La Peña Aranguren, Víctor</i> |
| Departamento | <i>Máquinas y Motores Térmicos</i> |
| Curso académico | <i>2018/2019</i> |

Bilbao, 12 de junio del 2019

DATOS BÁSICOS DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

- **Título del Proyecto:** Valorización energética del orujillo de aceituna.
- **Resumen:** El objetivo de este proyecto es valorar el orujillo seco y extractado, para generar 5 MWe de energía eléctrica en una planta de biomasa. Este residuo se quema en una caldera para producir vapor y expansionarlo a través de una turbina produciendo electricidad, que se conoce como el ciclo Rankine. Para tener una idea del tamaño de este proyecto, será necesario describir la gestión del residuo, una descripción de la planta y su dimensionamiento. Todo ello acompañado de un estudio económico para evaluar su viabilidad.
- **Palabras clave:** Biomasa, orujillo, alperujo, ciclo Rankine, caldera.
- **Abstract:** The aim of this project is to evaluate the dried and extracted orujillo, to generate 5 MWe of electrical energy in a biomass plant. This residue is burned in a boiler to produce steam and to expand it through a turbine producing electricity, which is known as the Rankine cycle. To get an idea of the size of this project, it will be necessary to describe the management of the waste, a description of the plant and its dimensioning. All this accompanied by an economic study to evaluate its viability.
- **Laburpena:** Proiektu honen helburua biomasa zentral baten bitartez 5MWe energia elektriko lortzeko, oliba-lapa lehor eta laburtuaren erabilpena balioztatzea da. Hondakin hau galdara baten erretzen da, ur lurruna ekoizteko eta hau turbina baten bitartez zabaldu energia elektrikoa lortzeko, Rankine ziklo bat osatuz. Proiektu honen irispena ezagutzeko, landarearen deskribapena eta dimentsionaketa beharko dira. Hau guztia, azterketa ekonomiko bat gehituta proiektuaren bideragarritasuna balioztatuz.

Agradecimientos:

A mi querido profesor el Sr. Víctor de la Peña Aranguren, por su acompañamiento, apoyo y estímulo durante la redacción de este trabajo y mi más sincero agradecimiento por su labor como profesor y los conocimientos que me ha transmitido durante la etapa académica que hoy culmina.

INDICE

| | |
|----------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 2. CONTEXTO..... | 7 |
| 3. OBJETIVOS..... | 8 |
| 4. PROCESOS PRODUCTIVOS | 9 |
| 4.1 Almazara | 9 |
| 4.2 Extractora u Orujera | 14 |
| 5. ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN | 17 |
| 6. ALTERNATIVA SELECCIONADA..... | 22 |
| 7. GESTIÓN DEL RESIDUO | 23 |
| 8. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA | 26 |
| 8.1 CALDERA..... | 27 |
| 8.1.1 HOGAR | 27 |
| 8.1.2 ECONOMIZADOR | 33 |
| 8.1.3 CALENTADORES AIRE-GAS..... | 37 |
| 8.1.4 EVAPORADOR Y SOBRECALENTADOR..... | 38 |
| 8.1.5 ALIMENTACIÓN Y TRATAMIENTO DEL AGUA | 40 |
| 8.1.6 LIMPIEZA DE SUPERFICIES DE INTERCAMBIO | 42 |
| 8.1.7 FILTRO DE MANGAS | 44 |
| 8.1.8 CHIMENEA..... | 46 |
| 8.2 TURBOALTERNADOR | 48 |
| 8.3 CONDENSADOR..... | 49 |
| 8.4 DESGASIFICADOR | 50 |
| 8.5 PRECALENTADOR DE ALTA PRESIÓN | 52 |
| 8.6 ALMACENAMIENTO ORUJILLO | 53 |
| 8.7 OFICINAS, LABORATORIOS Y SCADA | 53 |
| 9 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA | 54 |
| 9.1 DATOS DE PARTIDA..... | 55 |
| 9.2 ESTADOS TERMODINAMICOS DEL CICLO RANKINE..... | 57 |
| 9.3 BALANCES DE MASA Y ENERGIA | 60 |

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9.3.1 | Caldera | 60 |
| 9.3.2 | Turbo-alternador | 62 |
| 9.3.3 | Condensador | 64 |
| 9.3.4 | Desgasificador..... | 65 |
| 9.3.5 | Precalentador agua alimentación | 66 |
| 9.3.6 | Bombas | 67 |
| 9.4 | RENDIMIENTO DEL CICLO | 68 |
| 9.5 | ALMACENAMIENTO Y DIMENSIONADO PATIO DEL ORUJILLO | 68 |
| 9.6 | RESULTADOS..... | 69 |
| 10 | PLAN DE PROYECTO..... | 74 |
| 10.1 | TAREAS E HITOS | 74 |
| 10.2 | DIAGRAMA GANTT | 76 |
| 11 | PRESUPUESTO..... | 77 |
| 12 | CONCLUSIÓN | 81 |
| 13 | BIBLIOGRAFIA | 83 |
| | ANEXO I. Visión general de productos, subproductos y residuos en la industria del aceite. Propiedades físicas y químicas del alperujo y orujillo seco y extractado. | 84 |
| | ANEXO II. Imágenes extractora..... | 87 |
| | ANEXO III. Disposición general de caldera de parrillas para biomasa (Caldera Stirling) | 90 |
| | ANEXO IV. Evaporador y atemperador..... | 92 |
| | ANEXO V. Calidad del agua de alimentación en calderas acuotubulares según norma UNE 9.075. | 93 |
| | ANEXO VI. Fluoculador- decantador dinámico sin rasquetas de fondo..... | 94 |
| | ANEXO VII. Desgasificador..... | 95 |
| | ANEXO VIII. Precalentador alta presión..... | 96 |
| | ANEXO IX. Código EES y soluciones..... | 97 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Diagrama de flujo de una almazara. | 13 |
| Figura 2. Diagrama de flujo de una extractora. | 16 |
| Figura 3. Caldera de parrillas móviles de biomasa. | 28 |
| Figura 4. Disposición de los tubos lisos en alineación regular para un economizador. | 35 |
| Figura 5. Envolvente "Casing" típico de un economizador. | 36 |
| Figura 6. Banco tubular del economizador. | 36 |
| Figura 7. Calentador aire-humos. | 38 |
| Figura 8. Esquema de conexionado para limpieza química por el método de circulación del disolvente. | 43 |
| Figura 9. Esquema funcional de un filtro de mangas. Cortesía de INFESA S.R.L. | 45 |
| Figura 10. Esquema ciclo de potencia de la planta. | 59 |
| Figura 11. Esquema de flujos en la caldera. | 61 |
| Figura 12. Esquema de flujos en la turbina. | 63 |
| Figura 13. Esquema de flujos en el condensador. | 64 |
| Figura 14. Esquema de flujos en el desgasificador. | 65 |
| Figura 15. Esquema de flujos en el precalentador. | 66 |
| Figura 16. Diagrama T-s del ciclo. | 70 |
| | |
| Tabla 1. Composición general del alperujo y orujillo. | 25 |
| Tabla 2. Análisis químico de las cenizas del orujillo (%). (PF* Pérdida por calcinación; FUENTE: CedexMateriales) | 31 |
| Tabla 3. Valores de emisión para instalaciones de combustión medianas con potencia térmica igual o superior a 1MWe e inferior o igual a 5MWe. Fuente: BOE. | 47 |
| Tabla 4. Datos de partida al cálculo. | 55 |
| Tabla 5. Estados termodinámicos del ciclo Rankine | 69 |
| Tabla 6. Resultados caldera. | 71 |
| Tabla 7. Resultados Turbolternador. | 71 |
| Tabla 8. Resultados condensador. | 72 |
| Tabla 9. Resultado trabajos de las bombas. | 72 |
| Tabla 10. Rendimiento del ciclo. | 72 |
| Tabla 11. Resultado dimensionado almacenamiento del combustible. | 73 |
| Tabla 12. Cantidades producidas de productos y subproductos en almazara y extractora. | 73 |

1. INTRODUCCIÓN

La cosecha de la aceituna para la obtención de aceite de oliva se encuentra extendida a lo largo de la cuenca del Mediterráneo y España ocupa un puesto importante. Contamos con 2 millones y medio de hectáreas de olivar que nos permiten obtener la mitad de la producción de aceite de oliva de la Unión Europea y un 40% de la producción mundial. España es por tanto el país a nivel mundial con mayor producción y exportación de este recurso agrícola y le siguen países como Italia, Grecia, Túnez y Turquía entre otros. Estas cifras apuntalan a la industria del aceite como uno de los pilares del sector agrícola y de la alimentación y una de las mayores extensiones de cultivo en nuestro país.

La comunidad autónoma de Andalucía posee las tres quintas partes del olivar español. Produce el 30% del aceite de oliva del mundo y procesa 5.800.00 toneladas de aceituna de media al año, que pueden variar según la campaña, por lo que es la principal región de España generadora de los mejores productos de oliva.

Como consecuencia de la actividad de este sector se genera una cantidad elevada de subproductos que comprenden principalmente el hojín, alperujo, hueso de aceituna y el orujillo. Una campaña media puede generar unos 3.000.000 t/año de alperujo, que tras pasar por las extractoras dan lugar a 840.000 t/año de orujillo. En el caso del hueso de aceituna en una cantidad de 380.000 t/año.

Este proyecto tiene la finalidad de describir la valorización energética del orujillo seco y extractado como combustible sólido en plantas de biomasa para la generación eléctrica. Se describirá en el documento presente el proceso de obtención de este subproducto final de la industria oleica desde la recogida de la aceituna y extracción en la almazara, hasta su obtención en la industria extractora u orujera. Se describirán las dos alternativas existentes actualmente para su uso como combustible y la alternativa seleccionada. También se describirá el proceso de generación eléctrica mediante ciclo Rankine en la planta, describiendo el funcionamiento y características de cada equipo que interviene. Se efectuará un estudio energético global e individual de cada equipo y un dimensionamiento de la zona de almacenamiento del biocombustible. Finalmente, un estudio económico de viabilidad y la planificación de la ejecución de la planta cerrará el trabajo aportando una visión general de la industria de la biomasa procedente de la industria del aceite de oliva para la generación eléctrica en España.

2. CONTEXTO

La aceituna desde que se recolecta hasta que se obtiene el aceite de oliva sufre varias etapas en la almazara. Esta, es la industria encargada de producir el “oro líquido” en la cuenca del Mediterráneo. En la almazara la aceituna se recibe y se limpia antes de las labores de producción. El proceso de extracción comienza con la trituración de la aceituna y su posterior batido para aglutinar las pequeñas moléculas de aceite. Seguidamente una centrifugadora horizontal separa el sólido del líquido obteniendo así el aceite y un subproducto (residuo) denominado alperujo. El aceite, continua el proceso en unos tamices de filtración y se vuelve a centrifugar para eliminar el agua de vegetación del aceite. Finalmente, el aceite de oliva se almacena en grandes depósitos. Actualmente el proceso implantado en la mayoría de las almazaras es el de dos fases o ecológico. Este proceso posee mayor rendimiento que los demás y no genera subproductos medioambientalmente contaminantes. El alperujo es un residuo acuoso con un porcentaje de humedad entorno al 60% y está compuesto de la pulpa, hueso de aceituna, agua de vegetación y una pequeña cantidad de aceite.

Debido al gran volumen de producción de aceite de oliva en nuestro país también se generan grandes cantidades de alperujo que son necesarias gestionar, tratar y valorizar. Actualmente el destino del alperujo son las extractoras que se encargan de extraer parte de la cantidad de aceite que una poseen mediante un segunda centrifugación y procesos químicos obteniendo un aceite de segunda extracción o aceite de orujo. El orujo una vez secado aún posee varias alternativas de valorización como su uso en compostaje (fertilizante), alimentación animal(pienso) y como biocombustible para generación eléctrica bien como combustible sólido o como gas mediante gasificación. Pero el uso más extendido y con mayor revalorización a nivel de rentabilidad energética es el de combustible para generación eléctrica.

Este biocombustible se quema en una caldera para producir vapor sobrecalentado que se expandirá en una turbina accionando un alternador y generando electricidad. La planta será capaz de generar 5 MW eléctrico gracias al proceso cíclico de expansión- condensación del agua. Del total de la generación la planta autoconsumirá para su funcionamiento un 15 % y parte del restante se lo venderá a la red eléctrica española y a la propia extractora para el procesado del alperujo.

3. OBJETIVOS

Tres son los principales objetivos de este trabajo.

1. El primero de ellos es valorizar energéticamente un residuo contaminante. De esta manera somos capaces de rentabilizar el potencial calorífico que posee este subproducto agrícola, bien para la producción de electricidad o bien para generación de calor, y contribuir a una diversificación de fuentes renovables y una menor dependencia de las combustibles fósiles.
2. El segundo consiste en reducir el coste del tratamiento de eliminación del orujillo. Se han realizado diversos estudios sobre la viabilidad de diferentes usos del orujillo como fertilizante, alimentación de rumiantes extensivos, etc. Pero sin duda el más extendido es el de combustible para generación de electricidad. Además, las cenizas tras la combustión son apropiadas para fertilización por su contenido en K, Mg y Ca y una alternativa sostenible al cemento como material de construcción.
3. Y por último mejorar el medio ambiente. En la combustión de la biomasa se considera que las emisiones tienen un balance neutro de CO₂. Realmente sí que se produce CO₂, pero se considera que no contribuye al efecto invernadero ya que cantidad que se libera forma parte de la atmósfera actual, es el CO₂ que absorben y liberan continuamente las plantas y árboles para su crecimiento durante la fotosíntesis.

4. PROCESOS PRODUCTIVOS

La industria del aceite es muy importante en los países del Mediterráneo y España, a día de hoy, es el principal país productor y exportador a nivel mundial que destaca por su calidad y elevado potencial tecnológico y de suministro. A nivel nacional, el olivar es el segundo cultivo en extensión, después de los cereales, y representa uno de los principales sectores del sistema agroalimentario español. Está presente en 34 de las 50 provincias españolas y su superficie cultivada representa más del 25 % de la superficie olivarera mundial.

4.1 Almazara

La extracción del aceite de oliva se produce en las Almazaras (del árabe المعصرة, al-ma'ṣara, «la prensa»). Estos lugares o industrias están compuestas habitualmente por tres zonas de trabajo o producción. La primera es el patio de recepción, donde se recibe la aceituna, se lava, se pesa y se recogen muestras y se almacena en tolvas a la espera de su molturación. Esta zona de trabajo habitualmente es un lugar amplio, luminoso y con una cubierta para proteger a la aceituna de la lluvia. La segunda zona de trabajo es una nave cerrada donde se encuentran todos los equipos que intervienen en la extracción del aceite. Aquí la aceituna se muele, bate, centrifuga, se limpia de agua y finalmente se la somete a una decantación. La última y tercera zona de trabajo es la bodega, lugar en el que se almacena el aceite en depósitos de gran tamaño.

La composición aproximada, en valores medios, de una aceituna es la siguiente: aceite (18-28%), agua de vegetación (40-50%) y hueso y material vegetal (30-35%).

Actualmente España cuenta con más de 1.700 almazaras distribuidas por 13 Comunidades Autónomas. Andalucía recoge el mayor porcentaje de industria de la almazara, un 45%, y a su vez la provincia de Jaén representa el 40 % del total de esta comunidad autónoma. A dicha Comunidad Autónoma y provincia les corresponde respectivamente, el 77% y el 32% de la producción de aceite de oliva a nivel nacional.

El método o sistema de extracción del aceite ha ido evolucionando con el tiempo desde el método de extracción tradicional, pasando por el método de tres fases y finalizando por el de dos fases, que el sistema mayoritariamente utilizado hoy en día.

El método tradicional, empleado hasta los años setenta, se realizaba mediante un molino de piedra y el sistema de prensa. La aceituna se trituraba en los molinos de piedra y la pasta que se generaba se colocaba en finas capas sobre unos capachos que se apilaban unos encima de otros, sometiéndolos a presión y obteniendo así el aceite de oliva. El problema de este método es que era poco operativo, precisaba de mano de obra elevada, poseía un rendimiento horario bajo y las operaciones de limpieza del aceite eran difíciles de conseguir. Con el avance tecnológico y la aparición de maquinaria nueva capaz de extraer el aceite con mayor agilidad y facilidad, se empezó a utilizar el sistema en continuo. Este nuevo sistema extrae el aceite por la acción de la fuerza centrífuga ejercida en máquinas rotativas denominadas decanters. A este sistema se le conoce como de 3 fases porque son tres los productos que se obtienen tras la centrifugación: aceite de oliva, orujo (residuo seco) y alpechín (residuo líquido). Pero este proceso posee un gran inconveniente y es que se precisa de la adición de medio litro de agua por cada kilogramo de aceituna a procesar para fluidificar la pasta. El alpechín es la consecuencia de la adición de agua y se trata de un subproducto contaminante y perjudicial para el medioambiente y difícil de tratar. Por cada 100 kg de aceituna se obtiene 75 litros de alpechín. Debido a los inconvenientes que generaba este subproducto, a partir del año 1983 se reguló en España el tratamiento y la depuración de los subproductos de la almazara prohibiendo la descarga directa del alpechín en lugares públicos debido a su impacto medioambiental. Este hecho dio lugar a nuevas investigaciones en el sistema de depuración de este subproducto, pero debido a los costes elevados del tratamiento y algunas dificultades técnicas, se llegó al resultado de que no era sostenible. Fue entonces a primeros de la década de los noventa cuando se introdujo un nuevo sistema en las almazaras, sistemas de dos fases o ecológico, que ya no generaba alpechín. Este sistema es el mismo que el de tres fases, pero no requiere de tanta adición de agua y solo se generan dos productos tras la decantación: aceite de oliva y alperujo (orujo y agua de vegetación). Su implantación en la mayoría de las almazaras no viene dada solo por el ahorro de agua, sino que el decanter de dos fases es mucho más sencillo que el de tres fases lo que abarata el precio de adquisición, el rendimiento en aceite de dos fases es mayor, la capacidad de procesado es mayor, la calidad del aceite es algo superior y por tanto el coste de operación es menor. Sin embargo, la cantidad de aceite obtenida es algo menor en el sistema de dos fases, 200 litros de aceite frente a los 220 litros de las tres fases por cada tonelada de aceituna procesada. En cuanto a la cantidad de alperujo obtenido por tonelada de aceituna tratada ronda los 800 kg.

El proceso de dos fases en las almazaras es el siguiente:

- Recepción de la aceituna: La aceituna se recolecta a diario y se descargan mediante camiones en la tolva de recepción que se encuentra enterrada bajo tierra en el patio de la almazara. Esta tolva tiene aspecto de foso con barras en su parte superior, a nivel del suelo.
- Lavado de la aceituna: Una cinta transportadora conduce las aceitunas desde la tolva de almacenamiento hasta la limpiadora que se encargara de la limpieza y lavado de las impurezas como hojas, piedras y tallos. Primeramente y mediante una corriente de aire se eliminan las hojas y pequeños brotes. Posteriormente las aceitunas caen sobre una criba vibratoria que separa las aceitunas del resto de materiales que no tiene un tamaño similar. A continuación, las aceitunas se lavan en contacto con una caudal de agua declarada y descalcificada.
- Pesado, control y almacenaje: Una vez secas las aceitunas, son conducidas mediante una cinta transportadora hacia la báscula. El pesado se hace de manera continua. Las aceitunas van entrando en una tolva que posee la báscula y cuando esta detecta un peso previamente programado se descarga automáticamente.
- Transporte al molino o nave: Una vez pesadas las aceitunas, mediante una cinta transportadora, son conducidas a la tolva de almacenamiento a la espera de iniciar el proceso de extracción del aceite(molturación). La aceituna no debe permanecer más de 48 horas en esta zona ya que es el tiempo máximo conocido a partir del cual podría oxidarse y estropearse, perdiendo la calidad del aceite.
- Molienda o Molturación: Es la primera fase de la línea de extracción del aceite de oliva. Este proceso consiste en la rotura del fruto para obtener la fase oleosa. Se emplean molinos de martillos con cribas concéntricas y cabezas de aceros extraduros al tungsteno dispuestos en forma de hélice. Las cribas van de mayor a menor tamaño permitiendo el paso de material cada vez más fino. Los cabezales rompen los tejidos vegetales permitiendo la salida de gotas microscópicas de aceite que poco a poco se van adhiriendo a otras y formándose gotas más grandes.

- **Batido:** El proceso de batido tiene como finalidad la aglutinación al máximo de las partículas de aceite originadas en el proceso de molturación. La pasta se introduce en un tambor horizontal que dispone de unas palas en su interior que remueve la pasta para romper la emulsión aceite/agua provocando el fenómeno de coalescencia, por el cual pequeñas gotas de aceite se juntan dando lugar a gotas más grandes. Este proceso se ve favorecido con un aumento de la temperatura de la pasta, no más de 27 °C porque afectaría a la calidad del aceite. Esto se consigue gracias a una camisa interior por donde circula agua caliente. El proceso de no debe ser superior a 60 minutos. Por encima de este tiempo se sabe que se forman emulsiones y existe pérdida de polifenoles y aromas.

- **Decantación:** La decantación en dos fases se realiza en una decanter que separa el aceite del resto de componentes de la aceituna (orujo y agua de vegetación). El decanter es un rotor horizontal con forma de cilindro troncocónico, que en su interior contiene, con una pequeña holgura, un tornillo sin fin hueco. La separación se produce por la fuerza centrífuga y la diferencia de densidades. La parte más pesada, alperujo, se deposita en el diámetro mayor del cilindro y el aceite y el agua en el diámetro menor. El tornillo sin fin al girar a distinta velocidad arrastra la parte más pesada (alperujo) hacia un extremo del decanter por donde se evacua. El aceite se extrae por el otro extremo.

- **Transporte de alperujo:** El alperujo descargado del decanter se transporta por un tornillo sin fin hacia una tolva de almacenaje de este producto, situada en el exterior de la almazara. Una empresa autorizada se hará cargo de su transporte y tratamiento.

- **Vibofiltro:** El aceite obtenido en el decanter pasa por un tamiz vibratorio que retiene las partículas en suspensión. El aceite filtrado se transporta mediante bombas no emulsionantes hacia una centrifugadora vertical. El filtrado se realiza a 18 °C.

- **Centrifugado vertical:** El aceite contiene aun algunas impurezas que conviene eliminar para que no deterioren el aceite en su posterior almacenamiento. El centrifugado vertical se trata de una separación liquido-liquido mediante diferencia de densidades. Junto con el aceite se introduce una pequeña cantidad de agua a una temperatura no

superior a 30°C para no interferir en las propiedades del aceite. La fase acuosa y el aceite forman anillos distintos por tener densidades diferentes. El agua al ser más denso forma el anillo externo de la centrífuga y el aceite al ser menos denso el interior, y de esta manera se logran dos corrientes de salida del equipo.

- Almacenaje de aceite de oliva: El aceite de oliva limpio se almacena en la bodega de la almazara en depósitos de acero inoxidable cerrados para evitar el contacto del aceite con el agua o luz. La temperatura de almacenamiento debe mantenerse entre los 15 °C y 18°C. El tiempo de almacenaje debe ser como mínimo 45 días. Si el aceite tuviera aun impurezas estas se acumularían en el inferior del depósito por decantación y se purgarían. Todos los depósitos están conectados entre sí para permitir operaciones de carga, descarga y trasvase.

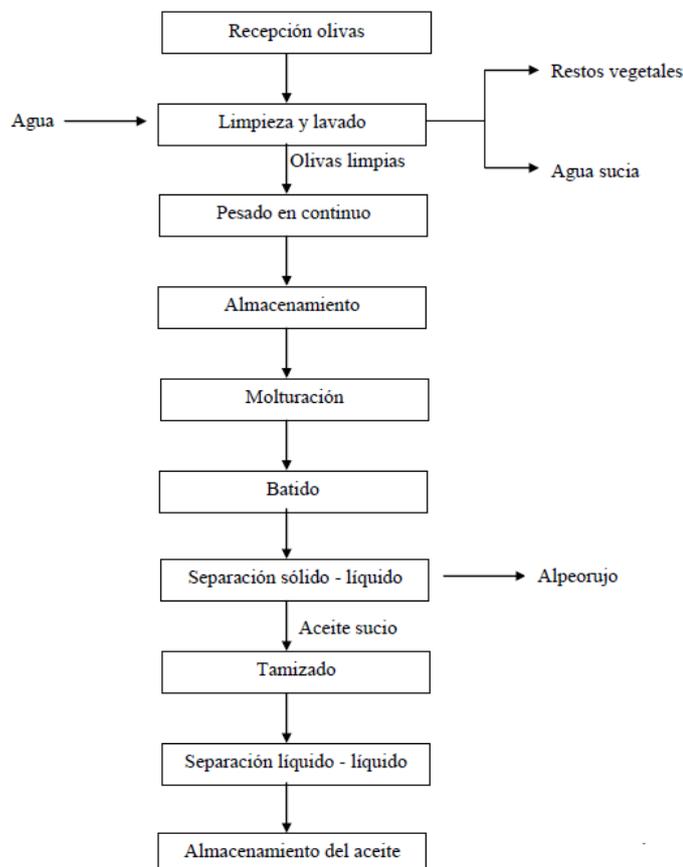


Figura 1. Diagrama de flujo de una almazara.

4.2 Extractora u Orujera

El alperujo está constituido por la pulpa, la piel, la almendra y el hueso de la aceituna y por una cantidad de agua de vegetación y aceite. Su contenido en aceite es del orden de un 3 a un 6%, su índice de humedad de un 65 a un 68% y una cantidad de hueso en torno al 7 a un 8%.

La necesidad de aumentar la rentabilidad del proceso de obtención del aceite de oliva hace que en la actualidad sea necesario recuperar el aceite que todavía queda en el alperujo mediante extracción con disolvente o centrifugación en grandes instalaciones industriales llamadas orujeras. En ellas no solo se produce aceite de orujo crudo, sino que dan lugar a productos como hueso y orujo seco y extractado (orujillo) con amplias utilidades, como es el caso de este proyecto, la combustión de orujillo en una caldera para generar electricidad mediante un Ciclo Rankine.

En una campaña se genera de media 3.000.000 t/año de alperujo, lo que nos da una idea de la importancia de la industria orujera para la revalorización del subproducto procedente de las almazaras. En España están operativas 63 extractoras que producen 56.000 t/año de aceite de orujo, de las cuales el 77% lo realiza por medios químicos (disolvente) y el 23% por medios físicos (centrifugación). El método más utilizado de extracción de aceite de orujo consiste en una combinación de centrifugación y extracción con hexano. El proceso es el siguiente:

- Recepción del alperujo: La materia prima se vierte y almacena en unas balsas estancas impermeabilizadas. Las balsas tienen el objetivo de reducir el alto contenido en humedad y homogeneizar el alperujo de distintas características y de esta manera el coste de secado sea menor. No es aconsejable un periodo largo de almacenamiento por los olores que se producen debido a la oxidación de la pasta acuosa. En algunos casos se suele extraer previamente el hueso contenido en el alperujo para su uso como biocombustible.
- Centrifugación de repaso: El alperujo se somete a una segunda extracción de aceite en centrifugadoras, al igual que en la almazara. Se extrae entre un 40% y 60% de su aceite, agotándolo hasta un 2-3.5% de contenido graso. El aceite obtenido se denomina aceite de orujo o de segunda extracción.

- **Secado:** El secado tras la centrifugadora permite detener la fermentación del orujo, pero su principal cometido es eliminar el alto contenido de agua en el alperujo para que la extracción mediante disolvente sea eficiente. El secadero es un cilindro giratorio de grandes dimensiones de tipo tromel con una pequeña inclinación que favorece el avance del alperujo desde la entrada hasta la salida. Dispone de un horno que mediante un tornillo sin fin lo alimenta de los propios productos obtenidos en la extractora (orujillo o hueso de aceituna) o un sistema de inyección de gas natural. Unos ventiladores inyectan aire para la combustión. Unas palas longitudinales provistas en el interior voltean continuamente el material que entra en contacto con los gases calientes de la combustión eliminando así su contenido en agua. Este proceso se realiza en dos tromeles en serie. El primero el aire a unos 500 °C reduce la humedad hasta un 30% y en el segundo, el aire a unos 80 °C lo reduce finalmente hasta un 8-10%. Los gases calientes abandonan el secadero a través de unos ventiladores que los impulsan hacia un sistema de depuración de gases para eliminar las partículas en suspensión.
- **Molienda y granulación:** Con el fin de conseguir el tamaño de partículas adecuado y para favorecer el proceso de extracción se granula.
- **Extracción con disolvente (lixiviación):** Unos conjuntos de tanques dispuestos en serie reciben la materia granulada. Una vez que el primer tanque está lleno de orujo seco se pone en contacto con una corriente de hexano y se deja un tiempo de reacción. El aceite reacciona con el hexano y se empieza a formar una mezcla (aceite + hexano). Este proceso se va repitiendo en cada uno de los tanques. Finalmente obtenemos un orujo lixiviado con un contenido de aceite del 0,5 % y la mezcla.
- **Destilación:** La mezcla se trata en un conjunto de torres de rectificación conectadas en serie donde se separan el aceite de orujo y el hexano, que se reutiliza en el proceso.
- **Desolventizado:** El orujo lixiviado aun contiene restos de hexano y es necesario tratarlo en una máquina desolventizadora-tostadora. Este equipo posee varios pisos, en cada uno de los cuales hay una paleta para agitación y compuertas no enfrentadas, camisa de vapor y entradas para vapor directo. El orujo recorre todos los pisos y así se evapora el hexano, que es conducido hacia el recuperador de disolvente. Finalmente

obtenemos orujo seco y extractado (orujillo).

- Eliminación de disolvente: El hexano residual que pudiera contener el aceite de orujo se elimina gracias a una corriente de vapor de agua. En esta etapa del proceso se consume una gran cantidad de energía. Pero el aceite de orujo obtenido aun no puede ser apto para el consumo humano, debe someterse a un refinado y mezclado con aceite de oliva virgen.

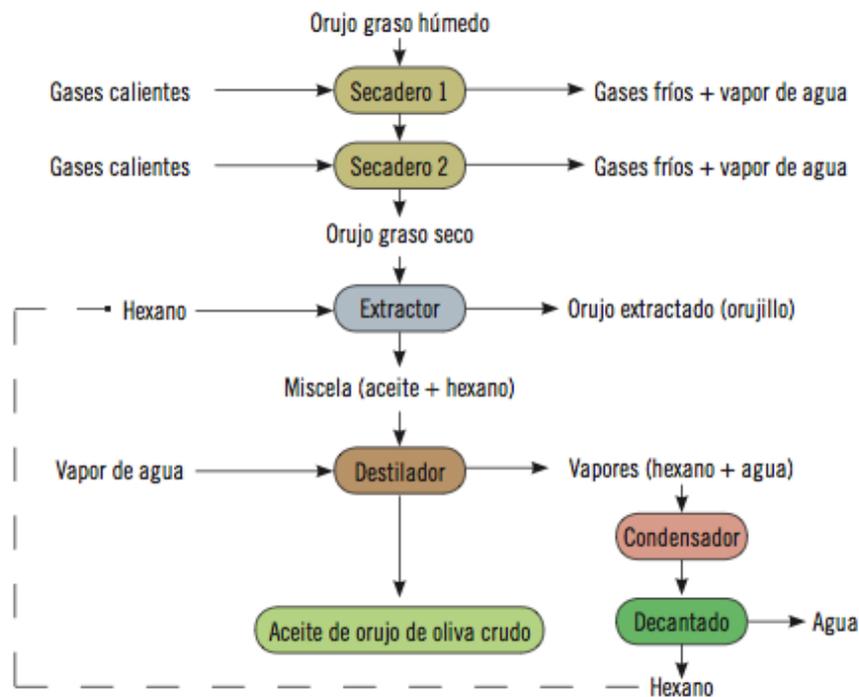


Figura 2. Diagrama de flujo de una extractora.

Las extractoras generalmente están situadas contiguas a la propia planta de generación eléctrica para que el proceso de extracción, almacenamiento y alimentación del orujillo se realice en continuo y se eviten gastos de transporte y gestión del residuo. Las extractoras necesitan de energía eléctrica para el accionamiento de toda su maquinaria y esta se la proporciona la propia planta eléctrica.

Para ver una visión general de los productos, subproductos y residuos en la industria de aceite de oliva consultar el ANEXO I. Las composiciones químicas y físicas del alperujo y del orujillo seco y extractado también se pueden consultar en el ANEXO I.

5. ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN

La biomasa es aquella materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. Las plantas transforman la energía radiante del sol en energía química a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como los árboles, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan (como el CO₂) en compuestos orgánicos, y parte de esta energía queda almacenada en forma de materia orgánica.

La biomasa es un combustible de origen biológico, con un coste económico inferior al de cualquier tipo de energía de origen fósil y que en función de su gestión puede llegar a ser respetuosa con el medio ambiente. Lo especialmente interesante e inteligente es la utilización de biomasa residual y los restos de excedentes agrícolas del entorno más próximo.

La valorización de la biomasa consiste en encontrar nuevas vías o métodos, para aprovechar el contenido energético de los residuos o subproductos. Podríamos, por tanto, definirla también como la manera de encontrar nuevas vías de comercialización de los recursos biomásicos mediante la adicción de valor. Existen diversos procesos de transformación de la biomasa en energía, pero nos centraremos únicamente en dos procesos termoquímicos: la gasificación y la combustión.

GASIFICACIÓN

Se trata de un conjunto de reacciones termoquímicas, que se producen en un ambiente pobre en oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados.

En el proceso, la celulosa se transforma en hidrocarburos más ligeros, incluso en monóxido de carbono e hidrógeno. Esta mezcla de gases llamada gas de síntesis o "syngas", tiene un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural, cuando se emplea aire como agente gasificante. El agente gasificante es un gas, o mezcla de ellos, que aporta calor para iniciar las reacciones, y oxígeno.

Atendiendo al tipo de gasificador existen dos tipos de tecnologías principales de gasificación:

- La de lecho móvil que, a su vez, se subdivide dependiendo del sentido relativo de las corrientes de combustible (biomasa) y agente gasificante. Cuando las corrientes son paralelas, el gasificador se denomina “downdraft” o de corrientes paralelas; cuando circulan en sentido opuesto, se denomina “updraft” o de contracorriente.
- La de lecho fluidizado, en la que el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible, hasta que las partículas de este se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del syngas.

Las etapas y reacciones de la gasificación, con independencia de que el lecho sea fluidizado o móvil, en sus variantes, la biomasa pasa por:

- Una primera etapa de calentamiento hasta 100°C, que provoca el secado de la biomasa por evaporación del agua contenida en la misma utilizando el calor de las reacciones de combustión. A medida que aumenta la temperatura, los compuestos extraíbles de bajo peso molecular inician el proceso de volatilización que continúa hasta que se alcanza una temperatura aproximada de 200 °C.
- La segunda etapa, que también absorbe calor, es la de pirolisis (ruptura por calor). Es un proceso de descomposición térmica, que ocurre entre 300°C - 500 °C, sin casi presencia de oxígeno en la que se rompen las moléculas grandes dando lugar a otras de cadena más corta. En esta etapa se desprenden los gases combustibles más volátiles, algunos de los cuales no se queman por la ausencia de oxígeno y se convierten en alquitranes. Además de los gases, se produce un residuo sólido de aspecto carbonoso conocido como residuo carbonoso, char o carbón vegetal. Entre los gases producidos, los más importantes son: vapor de agua, CO₂, H₂, CO e hidrocarburos.
- La tercera etapa es la oxidación de la fracción más pesada (carbonosa) de la biomasa al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua). Esta fase produce el calor necesario para llevar a cabo las reacciones que lo requieren, como el secado y la pirolisis, además de suministrar calor a las reacciones de reducción que son endotérmicas, para mantener la temperatura.

- La última etapa es la reducción. Se produce después de la pirolisis y las reacciones correspondientes se llevan a cabo en paralelo con la etapa de combustión, aunque el calor y los productos de la combustión (como el CO₂ y el H₂O) son requeridos en esta etapa. La reducción es la más compleja de todas las etapas, envuelve reacciones químicas entre HC, H₂O, CO₂, O₂ y H₂, así como entre los gases desprendidos. De todas estas reacciones, las de gasificación del residuo carbonoso producido son las más importantes.

La composición final del gas y su poder calorífico depende de varios factores como:

- La composición de la biomasa. A partir de un análisis elemental podemos conocer el poder calorífico de la biomasa y obtener una idea aproximada del poder calorífico del syngas. Un análisis inmediato da información sobre carbono fijo, volátiles, humedad y cenizas. Estos datos son importantes a la hora de elegir la tecnología de gasificación y el tiempo de residencia en el reactor, para reducir al máximo los inquemados carbonosos
- El contenido de humedad de la materia a gasificar debe estar comprendida entre un 10 y un 15 %. En general la humedad facilita la formación de H₂, pero disminuye la eficiencia térmica.
- La temperatura a la que se llevan a cabo las reacciones.
- La relación agente gasificante/biomasa.
- El tamaño y la densidad de la biomasa. Existe una limitación de densidad mínima de 200 a 250 kg/m³. Densidades menores crean problemas en el manejo de la biomasa y su gasificación.
- El tipo de tecnología utilizada

Atendiendo a las algunas de las propiedades del orujillo seco y extractado como su densidad (500-600 kg/m³) y porcentaje en humedad (10-15 %) podemos afirmar que cumple los requisitos mínimos y sería posible su gasificación.

El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo de la tecnología, el combustible y el agente gasificante que se utilice, en el rango de 70-80%. Mediante este proceso se pueden conseguir rendimientos eléctricos de hasta un 30-32% mediante el uso de

moto-generadores accionados por syngas, mientras que con un ciclo Rankine convencional simple las cifras rondan un 22% de rendimiento eléctrico.

COMBUSTION MEDIANTE CICLO RANKINE

Otra de las alternativas de valorización es la combustión directa del orujillo en una caldera y el aprovechamiento del calor desprendido de su quema para evaporar agua y posteriormente turbinar el vapor en un Ciclo Rankine.

La combustión es un proceso termoquímico en el que tienen lugar reacciones químicas de oxidación entre el combustible (biomasa) y el comburente (aire). La ecuación global de la reacción de combustión es la inversa de la de fotosíntesis. El proceso se realiza a altas temperaturas y se emplea una cantidad de aire por encima del necesario para efectuar la oxidación total del biocombustible.

La combustión de la biomasa transcurre con liberación de energía en forma de calor y los productos principales resultantes, son el dióxido de carbono, agua (en forma de vapor a la salida de equipo de combustión) y las sales minerales contenidas en la biomasa empleada como combustible, además de relativamente pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno y de azufre, así como de monóxido de carbono, partículas de carbono y otros productos orgánicos (hidrocarburos) resultantes de la combustión incompleta de la biomasa, denominados genéricamente "inquemados". Las sales minerales junto con otros inquemados en muy pequeñas cantidades constituyen las cenizas del proceso que, bajo determinadas condiciones, pueden ser, en general, restituidas al suelo como fertilizantes, como ocurre con el orujillo. El resto de los productos secundarios mencionados constituyen las emisiones gaseosas del proceso cuya minimización es necesaria a fin de disminuir el impacto ambiental producido por este proceso.

La caldera es el elemento principal para la combustión y existen diferentes tipos de tecnologías, caldera de parrillas y caldera de lecho fluido son algunas de las más conocidas y utilizadas. Para este proyecto sería recomendable el uso de la tecnología de parrillas, que a su vez dispone de diferentes tipos de parrillas como fijas, móviles, vibratorias, transportadora, basculante, de rodillos etc. Concretamente se escogerá la tecnología de parrillas móviles para la combustión del orujillo seco y extractado. Este tipo de calderas tienen

la ventaja de estar ampliamente probadas, bajos costes, poseen una alta capacidad horaria y admiten perfectamente una alta variación en la granulometría del combustible.

Están formada por dos zonas, una es el hogar y la otra el recuperador de calor. El hogar es la parte más baja de la caldera, donde se quema la biomasa, y está compuesta por la entrada, la salida de la biomasa y las parrillas. Estas últimas son de fundición especial procedente de aleaciones de acero inoxidable y son individuales para su fácil reemplazo ya que la biomasa fluye por ellas en estado incandescente y sufren mucho. Las parrillas están dispuestas en forma inclinada, a fin de facilitar la distribución de la biomasa e ir moviéndola hasta la salida y favorecer la evacuación de cenizas al recipiente de recogida de cenizas o cenicero.

El recuperador de calor es la zona superior de la caldera, que es por donde circulan los humos de escape y donde se sitúan los tubos por donde circula el agua del ciclo Rankine. Esta zona debe estar alejada del hogar debido a que parte de la biomasa incandescente puede solidificar en los tubos más cercanos y su limpieza es difícil. También posee una bóveda radiante compuesta por ladrillos refractarios para optimizar las corrientes de humos. Todas las paredes internas de la caldera suelen ser de material refractario para evitar el escape del calor.

El orujillo es conducido hasta la caldera por una cinta transportadora y se alimenta a la caldera mediante un tornillo cuya velocidad regula el flujo de combustible o bien mediante una tolva de almacenamiento. Durante el proceso de quemado el orujillo se va moviendo en sentido horizontal-descendente por las parrillas y pasa por diferentes etapas.

Inicialmente se produce el secado del orujillo, eliminando la cantidad de agua contenida en él. A partir de 150°C comienza la reacción de forma lenta y gradual hasta 250°C. Por encima de 275°C comienza un proceso exotérmico en el que se liberan los volátiles que arden como combustible gaseoso hasta 900°C. Estos volátiles poseen una gran cantidad de energía y es por eso que a cierta altura se inyecta aire secundario, bien para exista un exceso de aire, en torno al 40 % y se produzca una combustión completa y para que las cenizas no se depositen en los tubos del sobrecalentador produciéndose la escoriación. La biomasa avanza por la parrilla y por los huecos que existe en ella se inyecta aire que actúa como comburente y a su vez refrigera las parrillas. El aspecto del orujillo mientras avanza es de brasa o magma, ya que de estado sólido tiene que pasar ha estado gaseoso, por lo que debe

de pasar por un estado de líquido incandescente, y el sólido carbonoso que queda finalmente arde lentamente (5-10 minutos). Las cenizas producidas son recogidas mediante unos embudos situados debajo de las parrillas y por los filtros del economizador. Los gases de combustión dejan el hogar y pasan por la sección de convección para ceder calor al agua de circulación. Finalmente, estos gases avanzan por un economizador, que aprovecha el calor que aún tiene los gases de salida para otros usos y bajar su temperatura hasta los 100°C. A la salida del economizador es habitual que haya un intercambiador aire-aire para que los humos no descienda por debajo de los 100°C y se produzca una condensación del agua de los humos y al ser acida pueda corroer la chimenea.

El empleo de este tipo de caldera para la generación de electricidad mediante ciclo Rankine ofrece rendimientos eléctricos del 30%, algo más que si utilizáramos la gasificación como alternativa de valorización. Es por ello que se optara por la combustión como proceso de transformación del orujillo para añadirle un valor energético mayor.

6. ALTERNATIVA SELECCIONADA

La gasificación se lleva cabo a través de una serie de reacciones químicas complejas que tienen como objetivo la transformación de biomasa en un gas combustible de bajo poder calorífico. La composición del gas combustible variara según la tecnología utilizada a gasificar, el agente gasificante y la relación gasificante/biomasa. Estos factores también intervienen en el rendimiento del proceso. Se requiere de un gran número de equipos tanto para la transformación del gas como para su posterior acondicionamiento, necesario para su utilización en una caldera. Es por ello que este tipo de tecnología requiere de plantas con alto coste de inversión y un aprovisionamiento de biomasa muy homogéneo.

Sin embargo, la combustión directa ofrece un mayor control sobre el proceso de generación de calor y continuidad, ya que existen menos factores que alteren su normal funcionamiento. No se generan alquitranes como ocurre en la gasificación y se necesita de una menor cantidad de equipos. Se trata de una tecnología con una gran experiencia en el mercado de la generación eléctrica. Al igual que en la gasificación es necesaria una gran inversión en la planta, pero ofrece rendimientos eléctricos mayores, del orden del 30%. Finalmente se optará por la combustión como proceso de transformación del orujillo para añadirle un valor energético mayor.

7. GESTIÓN DEL RESIDUO

En este apartado se detallan todos los procesos que ocurren en la planta extractora desde que se recibe el alperujo hasta que se obtiene el orujillo seco y extractado. La planta extractora está situada en la misma planta, contigua a la central térmica, de manera que la extracción del alperujo sea un proceso continuo y en línea con el patio de almacenamiento de orujillo. Aun cuando la central térmica se encuentre en parada la extractora seguirá en funcionamiento.

1. Almacenamiento de alperujo en almazara: El alperujo obtenido en el proceso de extracción del aceite en la almazara es conducido hacia unas tolvas de almacenamiento para que a continuación sea vertido en camiones cisterna acreditados para su uso. Dichos camiones transportaran el material hacia la zona de almacenamiento situadas en la planta extractora.
2. Almacenamiento en la planta extractora: Pueden emplearse dos tipos. El primero de ellos es un depósito circular metálico. El camión descarga el alperujo en la parte superior a través de una raqueta y una tubería que cae al depósito. El segundo, son balsas de almacenamiento con suelo de hormigón y están perfectamente impermeabilizadas para prevenir la contaminación del suelo y las aguas subterráneas. La balsa deberá tener una solera impermeable compuesta de un sistema de antipunzonamiento y sobre él una lámina de polietileno de alta densidad de 1,5 mm. Para las paredes se seguirá el mismo procedimiento y será necesario que cuenten con un resguardo de seguridad ante pluviometrías altas. Toda la balsa tiene una pendiente hacia una arquea donde se sitúa el sistema de impulsión para su conducción hacia la planta extractora.
3. Transporte: El sistema de transporte de alperujo hacia los secaderos está formado por un tornillo sin fin que capta el material y lo conduce hacia la cinta transportadora y finalmente hacia unas tolvas. El transporte en las etapas intermedias de extracción y secado se emplean cintas transportadoras y tolvas. Será conveniente realizar la pesada del alperujo para tener un control del volumen que se está manejando y un análisis periódico para verificar que las características estén dentro de los límites establecidos para la planta y sus equipos.
4. Planta de deshuesado: Este proceso se realiza previamente a las operaciones de extracción para eliminar el hueso de aceituna del alperujo. Se trata de un combustible

con un PCI del orden 3.900 Kcal/Kg, un índice de humedad alrededor del 10% y un bajo porcentaje de ceniza. Se destina para su venta comercial, el sector de la industria, especialmente el agroalimentario que consume casi dos tercios de su producción.

5. Aceite de repaso: Se trata de una etapa previa al secado donde se obtiene orujo de segunda extracción o de repaso. Este proceso puede realizarse o no dependiendo de la calidad de alperujo procedente de las almazaras y de su contenido en aceite. El equipo mínimo necesario constara de:
 - Batidora
 - Centrifugadora horizontal (decanter) de dos fases.
6. Secaderos: Se emplearán secaderos tipo tromel para disminuir la humedad desde 60% hasta el 10%.
 - Tolva para la inyección de producto.
 - Tornillo sin fin para alimentar al secador.
 - Secador tipo tromel, se suelen colocar en serie para aumentar su efectividad.
 - Aspirador para recoger los gases y particular en suspensión.
 - Sistema de depuración de gases (ciclón).
 - Torres o chimeneas.
7. Granuladora: Granula el orujo seco para agilizar el proceso de extracción con hexano.
8. Extractor: El proceso de extracción se realiza en la planta extractora empleando un sistema de contacto múltiple por enriquecimiento progresivo y se compone de 5 fases:
 - Extracción con hexano (lixiviación).
 - Desolventización del orujo lixiviado.
 - Recuperación de disolvente en el orujo mediante inyección de vapor.
 - Destilación, evaporación del disolvente de la miscela (aceite + hexano). En esta etapa se obtiene por separado el aceite de orujo y el hexano.
 - Condensación de los vapores de agua y hexano.

El hexano se reutiliza en el proceso y el aceite de orujo se almacena en tanques. El orujillo seco y extractado se transporta hacia un almacén general. Contiguo a este se encuentra el almacén nodriza cubierto, con piso móvil, provisto del sistema de alimentación a la caldera y ventilado. De esta manera mantenemos la humedad del orujillo dentro del rango aceptable para su combustión (< 15%). Estará ventilado para evitar la posible auto-ignición del orujillo

debido a las temperaturas (60-70°C) que se puedan alcanzar dentro de la pila de combustible. Debido a la temperatura los volátiles se desprenden lentamente, destilando y disminuyendo el poder calorífico del producto.

Para ver el proceso de gestión del alperujo en las extractoras consultar las imágenes del ANEXO II.

A continuación, se muestra la composición general del alperujo y el orujillo.

Tabla 1. Composición general del alperujo y orujillo.

| Parámetros | <i>Alperujo</i> |
|--------------------|-----------------|
| Humedad (%) | 60-68 |
| Aceite (%) | 3-6 |
| Hueso (%) | 7-8 |
| | <i>Orujillo</i> |
| Humedad (% b.h.) | 10-14 |
| Cenizas (% b.h.) | 5-7 |
| Volátiles (% b.s.) | 72-73 |

Nota b.s.=base seca, b.h.= base húmeda; para ver la composición detallada del alperujo y orujillo ir a ANEXO I.

8. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

En el siguiente apartado se va a proceder a describir cada una de las partes que componen la planta de biomasa proporcionando una breve descripción del funcionamiento, diseño y características principales de cada equipo. Este tipo de plantas disponen de tres zonas diferenciadas las cuales son la zona destinada al almacenamiento del combustible, en este caso de orujillo de aceituna seco y extractado, la isla de potencia y por último una zona destinada a oficinas y edificios auxiliares. La isla de potencia engloba a todos los equipos que intervienen directa e indirectamente en el proceso de la generación eléctrica que son la caldera, economizador, calentador de aire, sistema de extracción y tratamiento de humos, turbo-alternador, condensador, desgasificador, precalentador de alta presión, bombas de alimentación a los distintos equipos, etc...

Las plantas de biomasa son capaces de producir electricidad mediante el accionamiento de una turbina cuyo eje se encuentra acoplado a un alternador que genera electricidad gracias al campo magnético que se produce debido al movimiento giratorio del eje del alternador. El causante de este giro es el vapor que entra a presiones y temperaturas altas en la turbina y tras su paso a través de las diferentes etapas de esta se expande. Es decir, que en la turbina tiene lugar la transferencia de energía termodinámica que lleva consigo el vapor en energía mecánica transferida a la turbina en forma de giro de su eje. El vapor se forma en la caldera debido al proceso de transferencia de calor del combustible al agua mediante la combustión. Una vez que el vapor sale de la turbina ingresa en un condensador para pasar de estado vapor-húmedo a la salida de la turbina a líquido saturado y posteriormente tras varias etapas en distintos equipos, que se mencionaran más adelante, se calienta nuevamente, hasta un punto cercano al de saturación a la presión de la caldera para que de nuevo se repita el proceso. Este ciclo se conoce como Ciclo Rankine y es el más común en plantas de generación eléctrica y tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo lo que se denomina un ciclo de potencia. Utiliza el agua como fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa.

La planta a estudio será capaz de procesar 40.000 toneladas al año de orujillo de aceituna seco y extractado para alcanzar un valor de 5 MWe de potencia instalada y generar anualmente 40GWh de energía eléctrica.

8.1 CALDERA

La caldera es uno de los elementos principales de la planta cuyo objetivo no es más que producir vapor. Existen una gran variedad de calderas y podemos clasificarlas según una amplia variedad de características, pero vamos a centrarnos únicamente en la caldera instalada para esta planta. Se trata de una caldera acuotubular. Esto quiere decir que el agua circula por el interior de los tubos y los gases lo hacen por el exterior en sentido perpendicular a la circulación del agua facilitando una mayor transferencia de calor. Las calderas acuotubulares son idóneas para la producción de vapor sobrecalentado a altas presiones como es el caso de estudio.

La caldera está diseñada para generar vapor sobrecalentado a una presión de 60 bares y una temperatura 450 °C. Está totalmente automatizada de tal manera que facilita un funcionamiento óptimo de la combustión.

El diseño de la caldera y su fabricación se ha regido únicamente para que el combustible quemado en su interior sea orujillo de aceituna seo y extractado. Es muy importante conocer el tipo de combustible a emplear ya que esto determinara las características de la caldera debido a que cada combustible es distinto y el proceso de combustión puede variar significativamente entre unos y otros.

La caldera es fácilmente identificable a simple vista en una planta eléctrica ya que su tamaño excede a cualquier otro equipo. Al referirnos a la caldera nos referimos al conjunto de hogar, sobrecalentador y evaporador. Sin embargo, los humos de la combustión intervienen en otros equipos en su camino a la atmosfera, que son el economizador, calentador de aire y el filtro de mangas. A continuación, se detallarán los distintos elementos que la componen.

8.1.1 HOGAR

El hogar es la zona destinada a la combustión del orujillo de aceituna. Se trata de la zona más caliente de la caldera donde pueden llegarse a alcanzar temperaturas superiores a los 1000°C y es vital el correcto diseño de la misma ya que el comportamiento de la combustión en su interior determinara el rendimiento del proceso de producción de vapor.

El hogar típico para este tipo de caldera tiene la siguiente configuración:

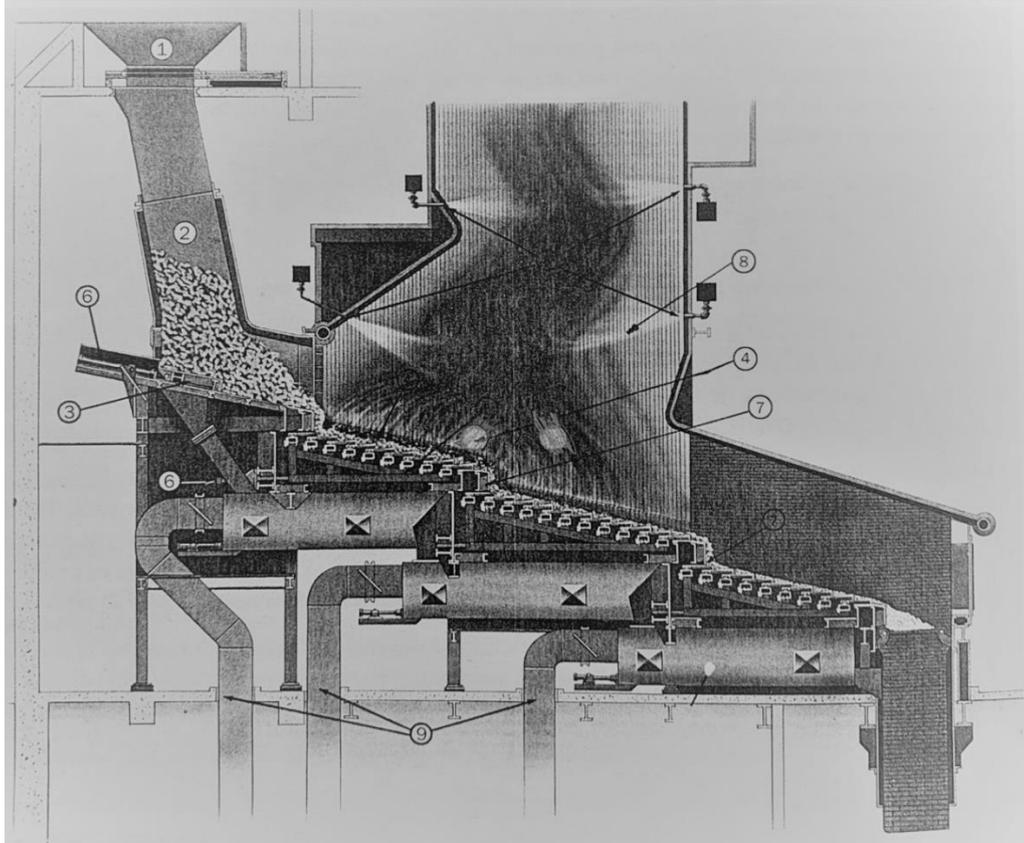


Figura 3. Caldera de parrillas móviles de biomasa.

El orujillo de aceituna seco y extractado se introduce a temperatura ambiente por la tolva (1), que se encuentra extendida en todo el ancho de la caldera a través de la garganta (2). Dispone de un conjunto de empujadores (3), accionados por cilindros hidráulicos (6), que empujan al combustible a entrar y caer sobre la primera línea de parrillas. Las parrillas (4) poseen una inclinación descendente y tienen partes fijas y partes móviles. Esta es la configuración típica para el orujillo de aceituna. La inclinación descendente y el movimiento relativo entre las parrillas permiten y aseguran que el combustible se queme de manera homogénea y durante el tiempo necesario para su completa combustión y además desplazan y guían a la biomasa a su paso por la parrilla, en forma de magma incandescente, hasta el final del hogar donde se recogen el material inquemado y las cenizas.

En este sistema las parrillas están sin refrigerar y se hallan expuestas al calor radiante del hogar, por ello son de material de fundición de acero inoxidable con aleaciones de cromo-níquel para soportar las altas temperaturas de operación, alrededor de 900-1.000 °C. Además, son piezas unitarias que facilitan su montaje y repuesto en caso de avería o mantenimiento.

Las diferentes secciones de las parrillas están separadas por caídas (7) situadas de forma que puedan romper y reorientar las compactaciones posibles de combustible. El aire comburente primario (9) es introducido por la parte inferior de la parrilla, excepto la parte de aire destinado a crear turbulencias (8), que se introduce por toberas situadas en las paredes frontal y trasera. A este aire que se introduce por encima de la llama de fuego se le denomina también aire secundario y cumple a parte de lo mencionado, un excedente de aire para asegurar una combustión completa de partículas inquemadas y volátiles que avanzan con los gases. Las turbulencias que se generan ayudan a que los gases se mezclen de manera que la combustión sea más eficiente y homogénea y por último que las posibles partículas que quedan sin quemar no se adhieran en los primeros tubos de la zona de sobrecalentamiento y se formen incrustaciones que disminuyen la transferencia de calor. A la deposición de ceniza fundida en los tubos a consecuencia de la diferencia de temperatura de los gases y la superficie del tubo se denomina escoriación. Para evitar este hecho indeseado y perjudicial para el correcto funcionamiento de la caldera, los primeros tubos deben situarse a una altura tal que no haya riesgo de deposición de cenizas. La altura mínima recomendada para estos hogares es de 1,5-2 m por encima de la llama de fuego. El aire primario ha sido previamente precalentado en un intercambiador de gas-aire que aprovecha el calor que aun poseen los humos antes de ser emitidos a la atmosfera, siempre y cuando el aire exterior este por debajo de los 15°C. Para temperaturas inferiores el aire frio retarda la combustión de manera significativa.

Las paredes del hogar están fabricadas de ladrillo refractario cerámico construidos con óxidos de alto punto de fusión que son capaces de soportar temperaturas por encima de los 1.650 °C y una segunda capa de aislante que evitar la fuga de calor.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 3. el hogar en su parte alta tiene forma de embudo, es decir que dispone en sus laterales dos techos inclinados (bóveda) que ejercen la función de definición de la zona de combustión, dirigir los gases hacia la zona de intercambio de calor y que se produzca un estrechamiento cerca del punto de inyección de aire secundario generándose mayor turbulencia mejorando así la mezcla de aire y combustible para una

combustión completa y de protección contra la radiación de las paredes del hogar hacia los primeros tubos del sobrecalentador .

La combustión se inicia gracias a un sistema de ignición. Una vez que el sistema ha alcanzado una temperatura adecuada el sistema es capaz de sustentarse por sí solo. Para evitar la posible combustión de la biomasa a la espera de entrar en el hogar, la caldera esta provista de un sistema de contrafuego e inyección de agua.

El orujillo, en su avance por el hogar sufre las siguientes etapas:

- Fase 1: Calentamiento del combustible y secado. Evaporación del agua contenida en el combustible; Temperatura: <150 °C.
- Fase 2: Pirolisis: liberación de material volátil; Temperatura: 150-230 °C
- Fase 3: Gasificación del combustible seco; Temperatura: 230-500 °C.
- Fase 4: Gasificación del carbón sólido. Temperatura. 500-700°C
- Fase 4: Oxidación de los gases combustibles; Temperatura: 700-1.000°C.

Estas etapas están más o menos solapas y, a nivel global, tienen lugar simultáneamente. Las variables que afectan al buen funcionamiento de este proceso son:

- 1. Proporción comburente/combustible.** Un defecto de oxígeno implica que la combustión sea incompleta y se forme carbón y monóxido de carbono, gas altamente contaminante que obligaría a instalar equipos descontaminantes. Un exceso de aire asegura una combustión completa pero la temperatura de los gases disminuiría. Un buen control del exceso del aire en la combustión ayuda a resolver los problemas de formación de SO_3 y en consecuencia de ácido sulfúrico y la formación de óxidos de nitrógeno: NO_x .
- 2. Temperatura de combustión.** Valores normales se encuentran en el rango de 600-1000 °C.
- 3. Características del combustible.** La densidad y la granulometría (tamaño) del combustible influye en la duración del proceso y en el tamaño de los equipos. La humedad es aspecto crucial en la combustión ya que a mayor grado de humedad mayor cantidad calorífica se precisa para evaporar la cantidad de agua contenida

en la biomasa y mayor retardo de la combustión. Se aconseja por tanto que el grado de humedad no supere el 15%.

Todo el material inquemado y las cenizas se recogen al final de las parrillas en un tanque de enfriamiento rápido lleno de agua y se conducen mediante un transportador automático hacia un cenicero común a todas las salidas de ceniza. Más adelante se detallarán las otras salidas de ceniza. Un gestor autorizado se encarga de su recogida, transporte y reutilización.

Problemática de las cenizas en la caldera

En la combustión de biomasa se generan dos tipos de cenizas. La ceniza de fondo comprende la fracción gruesa (0-3 cm) de ceniza producida en la parrilla y en el hogar. La ceniza volante, sin embargo, es la fracción más fina de ceniza que es arrastrada por los gases de combustión y que se recoge y precipita en los filtros. Aproximadamente el 70 % de las partículas que componen la ceniza volante tiene un tamaño inferior a 75 μm . Las partículas de mayor tamaño (> 1mm) proceden del material inquemado.

Tabla 2. Análisis químico de las cenizas del orujillo (%). (PF* Pérdida por calcinación; FUENTE: CedexMateriales)

| Orujillo | Cenizas de fondo | Cenizas volantes |
|--------------------------------|------------------|------------------|
| PF* | 0.55 | 9.9 |
| SiO ₂ | 44 | 21.7 |
| Cl | - | 3.8 |
| SO ₃ | - | 1.4 |
| Al ₂ O ₃ | 12.1 | 5.7 |
| Fe ₂ O ₃ | 9.0 | 3.3 |
| P ₂ O ₅ | 0.97 | 4.4 |
| CaO | 11.0 | 17 |
| MgO | 7.0 | 6.6 |
| (Na,K) ₂ O | 13.6 | 21.1 |

La composición de la ceniza del orujillo está dominada por SiO_2 y CaO , y en menor medida por óxidos de Mg, Al, K, P. Tiene un alto contenido en minerales, en partículas de cloro y potasio, y en cenizas con bajo punto de fusión y alto potencial corrosivo.

Una de las particularidades más importantes de la ceniza es su comportamiento a temperaturas elevadas y como esto afecta a su comportamiento de fusión. Los mecanismos de fusión y aglomeración de ceniza son un factor importante en el diseño de la caldera para determinar la propensidad del combustible a formar depósitos de escoria. El comportamiento de las cenizas es un fenómeno muy complejo y depende de una gran cantidad de factores, pero debido a la experiencia y a investigaciones científicas se ha demostrado que el Cloro tiene efecto catalítico que conlleva a una disociación de los materiales de acero de tuberías de los intercambiadores de calor, aun cuando la temperatura de los tubos es baja (100 a 150 °C). Este problema se acentúa cuando la relación molar Cl: S es mayor a 2. Si las temperaturas del metal exceden los 500 °C el ritmo de corrosión se eleva y pueden coexistir diversas reacciones entre el metal y óxidos de metales con especies gaseosas de cloro y reacciones de sales de metales alcalinos (K, Na). La experiencia dice que la corrosión más severa está asociada con depósitos de ceniza que contienen cloruros de metales alcalinos en superficies de sobrecalentadores.

Los cloruros reaccionan con SO_2 Y SO_3 en los gases para formar sulfatos con la subsecuente generación de cloro gaseoso, que a su vez puede reaccionar parcialmente con el oxígeno disponible o directamente con el hierro en los tubos para formar FeCl_2 . Estos nuevos cloruros pueden reaccionar con oxígeno y regenerar el cloro gaseoso, sosteniendo o incluso acelerando el ritmo de corrosión. Por ello la corrosión en presencia de Cl se denomina oxidación activa.

La formación de depósitos de cenizas en superficies de intercambiadores de calor ocurre por conformación de óxidos de metales alcalino y en un rango de temperaturas de 800-1000 °C. Es un proceso lento que transcurre a lo largo de los días. Por ello los gases no deben sobrepasar los 1000 °C para evitar la deposición y aglomeración de ceniza fundida sobre dichas superficies.

Entre los problemas asociados a la deposición de ceniza durante la operación de los equipos, los más ocurrentes son los siguientes:

- Aglomeración de partículas de cenizas en las parrillas del hogar. Esto provoca la

obstrucción de los agujeros de entrada de aire primario y la estabilidad del proceso de combustión.

- Formación de depósitos de ceniza fundida parcial o totalmente en las zonas de intercambio de calor, lo cual reduce la transferencia de calor, aumentando la temperatura de los gases y bajando el rendimiento de la caldera.
- Corrosión y erosión de los metales expuesto a los gases (intercambiadores de calor, sobrecalentador... etc.).

Para evitar la parada de la caldera para operaciones de limpieza y posibles daños en su estructura sería necesario tomar medidas preventivas y correctivas tales como control de la temperatura de vapor, diseño de la caldera a un nivel en el que el ritmo de corrosión sea aceptable, selección de aleaciones más resistentes a la corrosión para la zona del sobrecalentador y control de la temperatura de los gases a lo largo de todo el proceso. El análisis químico elemental de las cenizas ayudara a predeterminar su comportamiento durante el proceso.

8.1.2 ECONOMIZADOR

Los economizadores son intercambiadores de calor que aprovechan la energía que aun contienen los humos en su trayecto hacia la atmosfera para precalentar el agua de alimentación a la caldera. Tal y como se puede deducir de su nombre, estos equipos permiten obtener una alta eficiencia de la caldera y aumentar el rendimiento de la planta gracias al aprovechamiento energético de los gases de salida. Su uso reduce el consumo de combustible por unidad de vapor producido y minimiza la posibilidad de que se presenten choques térmicos y grandes fluctuaciones en la temperatura de alimentación de la caldera. Actualmente están presentes en todo tipo de plantas industriales y procesos productivos y su uso está muy extendido.

El economizador suele ser la última superficie termo-intercambiadora refrigerada por agua, que se encuentra aguas arriba, en el lado de humos, del calentador de aire.

Los economizadores están compuestos por partes sometidas a presión y por partes no sometidas a presión. Las partes a presión son todas aquellas que están en contacto directo

con el agua más unas pocas partes no a presión que estén soldadas a las de presión. Las partes no a presión las engloban los materiales que sirven de envolvente y de refuerzo del economizador. La gran mayoría de estos equipos tiene una forma exterior de caja. La envolvente es siempre de chapa acero y se le conoce comúnmente como “casing”. A lo largo del cerramiento existen huecos, llamados bocas de hombre, que son necesario para:

- Realizar soldaduras durante la construcción en el lugar de emplazamiento.
- Facilitar los trabajos de mantenimiento en cada una de las diferentes ramas tubulares individuales.
- Disponer del espacio requerido por los sopladores durante el servicio.

Las partes a presión las componen el banco tubular, los colectores y dos tuberías o conexiones situadas en los mismos colectores. El economizador dispone de dos colectores, uno de entrada y otra de salida dispuestos en la parte superior e inferior del equipo. El de entrada recibe el agua de alimentación destinada a precalentar y la distribuye de manera uniforme por cada columna de tubos. El colector de salida recoge el agua ya calentada y lo envía a la caldera. A cada colector hay una tubería soldada que sirve para drenar y ventear respectivamente. Estas conexiones son necesarias para las operaciones de mantenimiento, limpieza y puesta en marcha.

Los colectores son tuberías de gran diámetro selladas por uno de sus extremos y el otro abierto (conexión tubo-brida) por donde recibe o expulsa el agua. Deben estar dimensionados para asegurar que todas las columnas de tubos reciben la misma cantidad de agua a precalentar.

El banco tubular está compuesto por tubos lisos y codos que sirven de unión entre las filas horizontales de tubos. Al conjunto de las uniones en serie de tubo-codo-tubo se denomina serpentín. Para un economizador, el diseño más común y fiable es el que incorpora tubos desnudos (superficie exterior lisa), en alineación regular y con flujos cruzados. Esta configuración del banco tubular minimiza la posibilidad de erosión y obturación provocada por el ambiente sucio y erosivo causado por la ceniza en polvo de los humos. También asegura un buen paso de los humos por el banco tubular generándose una pérdida de carga mínima y una mayor transferencia de calor.

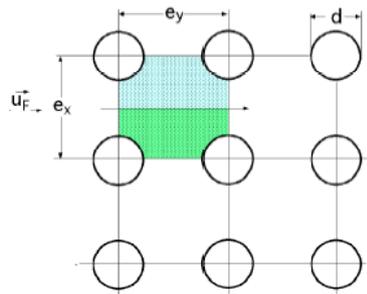


Figura 4. Disposición de los tubos lisos en alineación regular para un economizador.

Los serpentines están dispuestos por columnas y uniformemente espaciados unos de otros. El número de columnas y filas del banco tubular al igual que las características de los tubos y colectores (diámetro, material y espesores) vendrá definido por el estudio mecánico y termodinámico del equipo atendiendo a las necesidades del proceso. Cada uno de los extremos de cada serpentín se une a los respectivos colectores cerrando así el camino del agua en el equipo.

A cada lado del banco tubular y perpendicularmente a los tubos existen dos chapas de acero de tamaño un poco más grande que el banco tubular que sirven de cerramiento dejando los codos fuera de la zona de transferencia de calor, es decir del contacto con los gases. Estas chapas tienen agujeros practicados en toda su extensión que se corresponden con las disposiciones de los tubos en el economizador. En el proceso de fabricación del economizador los tubos se colocan horizontalmente apoyados entre estas dos chapas y a continuación se unen los codos. A estas chapas divisoras se les denomina deflectores. Esta restricción del paso de los gases por los codos se realiza porque la circulación de los humos a través de estos provoca:

- Una disminución de la transferencia de calor en las secciones rectas del banco tubular
- Una mayor erosión en los codos cuando se queman combustibles altos en cenizas

La transferencia de calor se produce desde el lado de los gases hacia el agua en forma de convección tanto por el lado de los gases como por el lado del agua más conducción

a través de la superficie de los tubos. El economizador instalado en planta está diseñado únicamente para precalentar el agua de alimentación de la caldera sin llegar a producirse evaporación en el proceso.

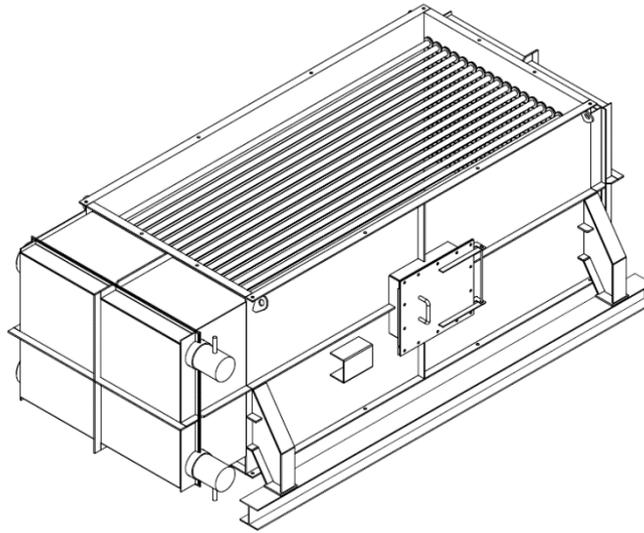


Figura 5. Envoltente "Casing" típico de un economizador.

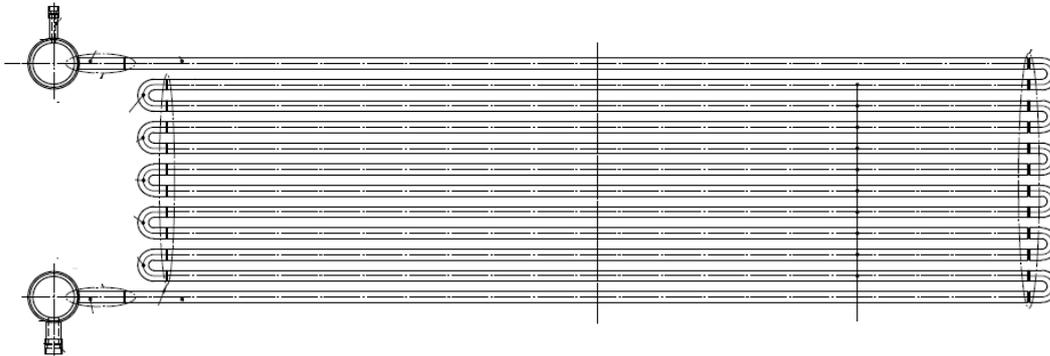


Figura 6. Banco tubular del economizador.

8.1.3 CALENTADORES AIRE-GAS

Al igual que los economizadores los calentadores de aire aprovechan el calor sensible de los gases de salida para aumentar la temperatura del aire de combustión (aire comburente), entrada a la caldera, que mejora el proceso de combustión y lo estabiliza. De esta manera se evitan gradientes altos de temperatura y se reduce el consumo de combustible. Los calentadores de aire están ubicados detrás de la caldera, aguas debajo de la misma, (en el flujo de humos), en donde reciben los humos calientes procedentes del economizador y el aire procedente de un ventilador de tiro forzado.

En cuanto a sus características, para plantas que queman biomasa, son muy similares a los economizadores y se les denomina calentadores de aire recuperativos porque el calor se transfiere a través de una superficie de intercambio térmico, que garantiza la separación de los flujos de humos y aire que llegan al calentador. Esta superficie está formada por un conjunto de tubos de acero. Se trata por tanto de un haz tubular en el que la energía térmica se transfiere desde los humos calientes que circulan por el interior de los tubos, al aire que circula por su exterior.

La unidad consta de tubos rectos soldados verticalmente a placas tubulares, en el interior de una carcasa de acero que sirve de cerramiento para el aire que circula por el exterior de los tubos, y que contiene las aberturas de entrada y salida del aire y de los humos. En el calentador tubular vertical de la Figura 7, los tubos se soportan desde la placa tubular superior, y se apoyan en la placa tubular inferior. En cualquier caso, una de las placas tubulares debe ser flotante, para que se pueda mover libremente por la acción de las dilataciones de los tubos.

Para garantizar la estanqueidad (ausencia de fugas de cualquier clase) y en particular las de un fluido al otro (aire hacia humo), es indispensable colocar entre la placa flotante y la carcasa del calentador, una junta de expansión estanca, que es la carcasa de cerramiento. La disposición tubular puede ser en línea o al tresbolillo, siendo esta última la más eficiente. La configuración de flujos normal es en contracorriente, con circulación vertical descendente de humos por el interior de los tubos, y circulación horizontal ascendente del aire por uno o más pasos por el exterior de los tubos.

Para controlar la corrosión en el lado frío del calentador y el ensuciamiento por ceniza volante en polvo, los diseños incluyen un by-pass de aire frío o una recirculación de aire caliente.

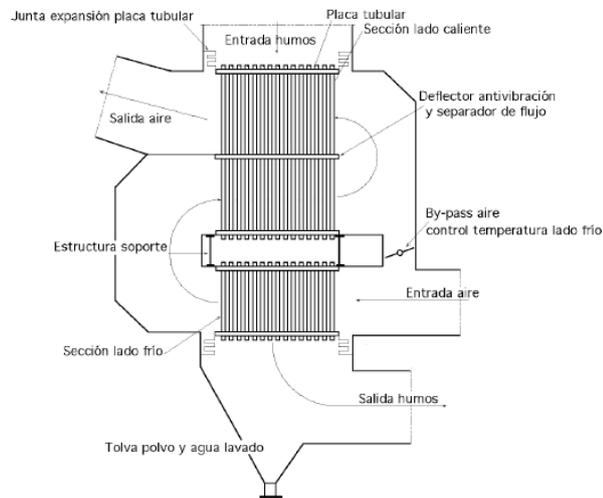


Figura 7. Calentador aire-humos.

8.1.4 EVAPORADOR Y SOBRECALENTADOR

El agua condensada a la salida del condensador que se encuentra en estado líquido saturado no ingresa directamente a la caldera, sino que sufre varias etapas de desgasificación y precalentamiento que son necesarias para asegurar una buena calidad del agua de alimentación y para aumentar la entalpía del agua que mejora la eficiencia de la caldera disminuyendo el consumo de combustible respectivamente. El agua precalentada y desgasificada ingresa en el economizador para absorber parte de la energía sensible de los gases de salida aumentando su entalpía. Una vez que el agua abandona el economizador entra al banco tubular de la caldera donde se producirá vapor sobrecalentado. Este proceso ocurre en dos etapas y en dos bancos distintos, el evaporador y el sobrecalentador. En el evaporador se produce la evaporación del agua a la presión de operación de la caldera, 60 bar, y en el sobrecalentador se genera el grado de sobrecalentamiento del vapor seco para el cual está diseñado.

Los gases de combustión avanzan en sentido ascendente y verticalmente desde el hogar y se topan con la bóveda que los dirige a la zona de convección. Esta bóveda

está dispuesta en la parte superior de la caldera y significa el inicio del cambio de dirección de los humos que pasan a avanzar horizontalmente introduciéndose en el banco tubular o zona de convección que lo conforman el sobrecalentador, banco de caldera (evaporador), economizador y calentador de aire. Se denomina zona de convección porque la transferencia de calor desde el lado de los humos hacia el agua se produce mediante la convección de manera mayoritaria. Los primeros tubos del sobrecalentador reciben calor en forma de radiación de las paredes del hogar, pero en menor medida y se encuentran protegidos por la bóveda para no alcanzar temperaturas demasiado altas y perjudiciales para los materiales de los tubos. El sobrecalentador y el evaporador, por tanto, están situados horizontalmente en la parte más superior de la caldera en la zona donde se produce el cambio de dirección de los humos(ascendente-descendente).

El sobrecalentador está compuesto por tubos verticales lo suficientemente espaciados para no obstruir el paso de los humos. Estos tubos deben soportar altas temperaturas y deben ser resistentes a las tensiones térmicas que se originan en el material. Para el diseño de calderas industriales se debe seguir el código ASME (American Society of Mechanical Engineers) que establece las reglas y requerimientos que deben emplearse tanto para la fabricación de la caldera como la selección de los materiales apropiados para cada caso. El tamaño de sobrecalentador (longitud total de tubos) está diseñado para recibir vapor saturado a la temperatura de saturación a 60 bar, 275,6°C, y generar un sobrecalentamiento de 174,4 °C con destino a la turbina. Seguidamente se encuentra instalado el banco de la caldera o evaporador. Tiene un aspecto similar al banco del sobrecalentador, pero contiene un mayor número de los tubos verticales y dispone de dos depósitos, uno en la parte superior y otro en la parte inferior denominados calderines.

Los calderines actúan como acumuladores y receptores del agua de alimentación. Ambos calderines esta conectados por dos familias de tubos verticales. La primera hilera o tubos de subida y la segunda hilera o tubos de bajada. Se denominan así por el sentido del agua en su interior. En el evaporador la circulación del agua es natural, en sentido de las agujas del reloj, como consecuencia de la diferencia de densidades entre las ramas calientes y frías del circuito. En los tubos de bajada el agua encuentra a la temperatura de vaporización o algo menos. Los tubos de subida arrastran una mezcla de vapor y agua debido a que están en la zona de mayor calor, primeras hileras de tubos. La densidad menor de la mezcla dentro de los tubos de ascenso proporciona la presión motriz que mantiene la circulación. En el calderín superior es donde se produce la separación agua- vapor con la

finalidad de alimentar el sobrecalentador con vapor seco saturado y recircular el agua al circuito.

El agua de alimentación a la caldera a pesar de haber sido tratada para cumplir con los requisitos que establece la norma UNE 9.075, a la que se hará referencia en el apartado siguiente, el agua contiene pequeñas cantidades de sales minerales que con el paso del tiempo se acumulan en los calderines. Para evitar que dichos sólidos sean arrastrados con el vapor y formen incrustaciones en el interior de los turbos y corroan los alabes de la turbina es necesario realizar purgas para disminuir su concentración. Un conductímetro instalado en la salida de purgas detecta si se supera el límite de conductividad establecido y envía una señal de apertura de la válvula de purgas para regular la concentración.

Atemperación: La atemperación es una regulación y limitación temporal del vapor a la salida del sobrecalentador que permite reducir y corregir las desviaciones de temperatura durante los transitorios. Esto se consigue mediante la dilución del vapor a alta temperatura en agua atomizada a baja temperatura. Es importante que el agua atomizada sea de la más alta pureza, porque los sólidos arrastrados por el agua pasan al vapor provocando depósitos en los tubos del sobrecalentador, en la tubería y en los álabes de la turbina. La concentración de sólidos en el agua atomizada por el atemperador no debe superar 2,5 ppm. Estos dispositivos se instalan a la salida de los tubos del sobrecalentador.

Para ver la disposición general de la caldera tipo en plantas de biomasa con parrillas móviles, el esquema del evaporador y atemperadores del sobrecalentador ir a ANEXO III y ANEXO IV.

8.1.5 ALIMENTACIÓN Y TRATAMIENTO DEL AGUA

La planta dispone de agua de río como suministro de agua de alimentación a la caldera y como agua de refrigeración en el condensador. El agua en su estado natural, agua bruta, no es pura y contiene siempre impurezas en concentraciones muy variables. Dichas impurezas se encuentran en solución y/o suspensión que obliga a realizar un tratamiento del agua para que su uso en calderas sea permitido. La norma UNE 9.705 marca las características que debe cumplir el agua de alimentación en calderas acuotubulares. Consultar tabla de características en el ANEXO V.

Podemos desglosar el tratamiento del agua en dos grupos:

- Pretratamiento de agua
- Desmineralización

El pretratamiento del agua está compuesto por las siguientes fases:

- Desinfección
- Clarificación
- Filtración

La desinfección permite eliminar material orgánico, virus, bacterias y algunos metales como el hierro y el manganeso que estén presentes en el agua. El método más empleado es la cloración que consiste en emplear cloro ya que este se introduce en las células de los microorganismos y los destruye y además contribuye a la eliminación de metales como el manganeso y el hierro por oxidación.

La clarificación elimina las partículas en suspensión mediante la coagulación (floculación), decantación y filtración. La coagulación consiste en la neutralización de las cargas eléctricas que recubren las partículas sólidas de tal manera que estas pueden unirse entre sí. Esta neutralización se consigue con la adición de coagulantes como sulfato de aluminio, $Al_2(SO_4)_3$, Sulfato férrico, $Fe_2(SO_4)_3$ o Cloruro Férrico, Fe_2Cl_3 . Los iones positivos Al^{+++} y Fe^{+++} tiene la capacidad de formar precipitados muy voluminosos y una vez neutralizadas las cargas aglomeran las pequeñas partículas hasta formar "floculos" lo bastante gruesos para sedimentar con rapidez. La decantación consiste en la sedimentación de los sólidos en suspensión en forma de lodos y su separación del agua. En este proceso se emplea un floculador-decantador dinámico sin rasquetas de fondo. Su esquema se puede observar en el ANEXO VI. Finalmente, la última etapa de la clarificación es la filtración que elimina las partículas que aún quedan en el agua mediante la acción de lecho filtrante. El agua ingresa en un equipo a presión que dispone de un lecho de arena y antracita donde se produce el lavado.

La desmineralización se produce mediante un intercambio iónico por el cual los iones disueltos no deseados son intercambiados, eliminados por adsorción sobre un material sólido, por otros iones con una carga similar proporcionado por el sólido. El proceso de intercambio tiene lugar entre un sólido (resina) y el agua. La resina es un material granular insoluble formado por esferas, tiene aspecto de esponja inflada por el agua.

8.1.6 LIMPIEZA DE SUPERFICIES DE INTERCAMBIO

A la hora de diseñar y calcular las superficies de intercambio de una caldera y de los equipos de recuperación de calor de los gases de salida, tanto para el economizador como para el calentador de aire se suponen que dichas superficies, tanto exteriormente como interiormente se mantendrán limpias a lo largo de su vida útil. En la realidad esto no es así y se suelen producir deposiciones a los dos lados de las superficies de intercambio, mayoritariamente tubos, que afectan de manera global al coeficiente total de transferencia de calor disminuyéndolo de tal manera que la temperatura de los gases de salida aumenta y estaríamos desaprovechando energía expulsándola a la atmosfera.

En el exterior de los tubos de la caldera, economizador y calentador de aire se producen depósitos de hollines, que no son más que partículas de ceniza que viajan con los gases de salida que al entrar en contacto con una superficie más fría, en este caso los tubos de intercambio de calor, se solidifican generándose una película. A pesar de que el espesor de esta película es pequeño su impacto en el coeficiente de transmisión global es notable tal y como se puede comprobar en la ecuación global de transferencia de calor.

En el caso del interior de los tubos se generan incrustaciones la inadecuada calidad del agua debido al efecto cíclico del agua en este tipo de planta. Es vital que se realicen periódicamente revisiones de la calidad del agua y de su tratamiento para asegurar que este efecto tenga el impacto menos negativo posible.

Para lograr que las superficies exteriores e interiores de los tubos estén limpias la planta dispone de sistemas de limpieza para evitar las deposiciones e incrustaciones.

La forma más común de limpiar el exterior de los tubos es mediante sopladores de vapor que lanzan chorros de vapor de alta energía que chocan contra la superficie de los tubos y arrastran los hollines depositados. El vapor y los hollines son arrastrados con la corriente de gases. En el caso de que mediante los sopladores no se haya conseguido eliminar las incrustaciones se emplea vapor de amoníaco. Este método es conocido como HUTTER y al mismo tiempo que protege contra la corrosión de los tubos y retrasa la formación de nuevas incrustaciones consigue eliminar hasta las deposiciones más duras. El método consiste en la hidratación de las incrustaciones empleando vapor de agua y vapor de amoníaco. El primero hidrata las incrustaciones aumentándolas de volumen para que se resquebrajen y se facilite

su eliminación y el segundo favorece la penetración del primero y neutraliza al ácido sulfúrico presente en las incrustaciones. Una vez eliminadas las incrustaciones se recubren los tubos con una capa fina de grafito que elimina la futura corrosión y permite eliminar de manera más sencilla las futuras incrustaciones ya que esta vez se depositan sobre la propia capa de grafito y no directamente sobre la superficie del tubo. Todo este proceso se realiza con la caldera fría y circulando a su vez agua fría por el interior de los tubos para asegurar la condensación de los vapores empleados en las incrustaciones. Posteriormente y finalizado el proceso de limpieza se hace circular agua caliente por el interior de los tubos para su secado.

Para el caso de la limpieza del interior de los tubos la práctica más extendida y eficaz es una limpieza química que consiste en la circulación de disolvente mezclado en el agua. Además, se añade un inhibidor para catalizar negativamente posibles reacciones de carácter perjudicial entre la mezcla, los tubos y las incrustaciones. La selección del disolvente y del inhibidor se debe realizar tras un análisis previo del tipo de incrustaciones presente para garantizar la efectividad del proceso. Durante la limpieza no se aplica calor bajo ningún concepto y se aísla la zona de limpieza del resto. Todos los aparatos de medición se desconectan por su seguridad. Una vez finalizado el proceso se enjuaga con agua corriente los tubos para arrastrar las sales solubles y las partículas desprendidas. Los gases y vapores formados durante la limpieza se drenan y se vuelven a lavar de nuevo los tubos con agua hirviendo que contenga sosa en disolución para neutralizar el ácido remanente y liberar el hidrogeno del metal. Finalmente se termina el proceso lavando los tubos con agua corriente.

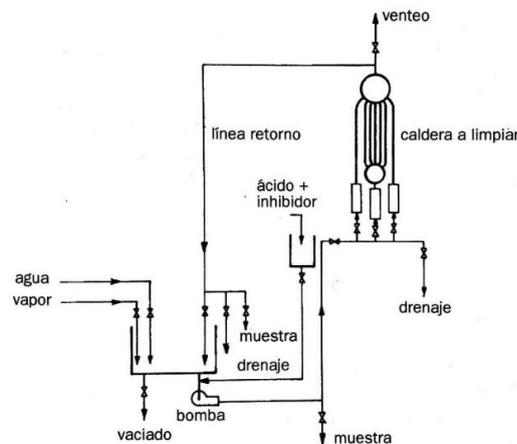


Figura 8. Esquema de conexionado para limpieza química por el método de circulación del disolvente.

8.1.7 FILTRO DE MANGAS

El caudal de gases procedente de los recuperadores de calor entra en un equipo denominado filtro de mangas que se encarga de eliminar las partículas que están presentes en los humos. Este equipo es necesario bien para la captación y depuración de partículas cumpliendo así problemas de contaminación y acondicionando los humos a las características aceptables para su emisión y bien para aumentar el rendimiento de la planta.

El filtro de mangas es el representante de la separación solido-gas de la planta. Su funcionamiento consiste básicamente en hacer pasar la corriente de gas a través de unas telas en forma de mangas, de ahí su nombre, que atrapan las pequeñas partículas presentes en los humos. El tipo más empleado de mangas es una fibra tipo Aramidas que se comercializa bajo el nombre Nómex y son capaces de soportar temperaturas en continuo de hasta 200 °C. El medio filtrante, el tejido, produce el efecto filtrante pero su principal cometido es el de ejercer de soporte a la capa de polvo que se acumula sobre él, la cual se denomina comúnmente como "torta". Esta capa de polvo es la responsable de la alta eficacia de filtración de las partículas de pequeño tamaño. Los filtros de mangas presentan altos rendimientos de depuración para partículas muy finas llegando incluso a valores de rendimiento superiores al 99,9%.

A medida que los gases atraviesan las mangas y la capa de partículas atrapadas se hace más grande la pérdida de carga a través del mismo va aumentando y llegará el momento el que ventilador encargado de forzar el paso de los gases se encuentre en su límite de operación y será necesaria la limpieza de las mangas. El equipo está constituido por módulos de mangas en filas. Cada módulo es estanco y separado del resto para que en la fase de limpieza o mantenimiento no sea necesaria la parada completa del equipo. El aire entra por la parte inferior del equipo a través de una placa con orificios. La orientación de los orificios en la placa se corresponde con la misma disposición de los filtros. Una vez que el gas entra en la zona de filtración los hace a través de la tela desde fuera hacia dentro y el polvo queda atrapado en la parte exterior de la manga. Es gas limpio asciende por el interior de las mangas y sale por los orificios de salida practicados en la placa superior que coinciden a su vez con el diámetro de las mangas. Un ventilador situado a la salida de gas limpio actúa como inductor del paso de los gases por el filtro de mangas y como impulsor de estos hacia la chimenea. Para que durante la filtración las mangas no se doblen sobre si mismas e impidan el paso del

aire estas están sujetas tanto por la parte superior a la placa de salida y reforzada por una armadura metálica.

Para la limpieza de las mangas el equipo dispone de tuberías de aire comprimido por cada fila de mangas, con los orificios de salida apuntando a la zona de evacuación de gas limpio (filtrado). También dispone de un mecanismo de vibración a través de varios motores que sirven de soporte para una aseguración de limpieza completa de los filtros. La abertura expulsa chorros de aire directamente sobre las magas a través de una válvula de abertura y cierre rápida. El chorro de aire recorre el filtro en sentido contrario al que lo hace el gas “sucio”. Gracias al efecto pulsante de chorro de aire comprimido y que su sentido sea contrario al gas a limpiar hace que la limpieza sea en continuo, es decir que la filtración no se detiene durante el proceso de limpieza ya que el efecto del aire comprimido impide que los humos sean filtrados en las mangas que se estén limpiando. Este proceso dura décimas de segundo. La limpieza se realiza por filas siendo normalmente limpiadas al mismo tiempo el 10% de las mangas totales del equipo.

La torta despegada de los filtros se recoge en unas tolvas situadas en la parte más inferior del equipo.

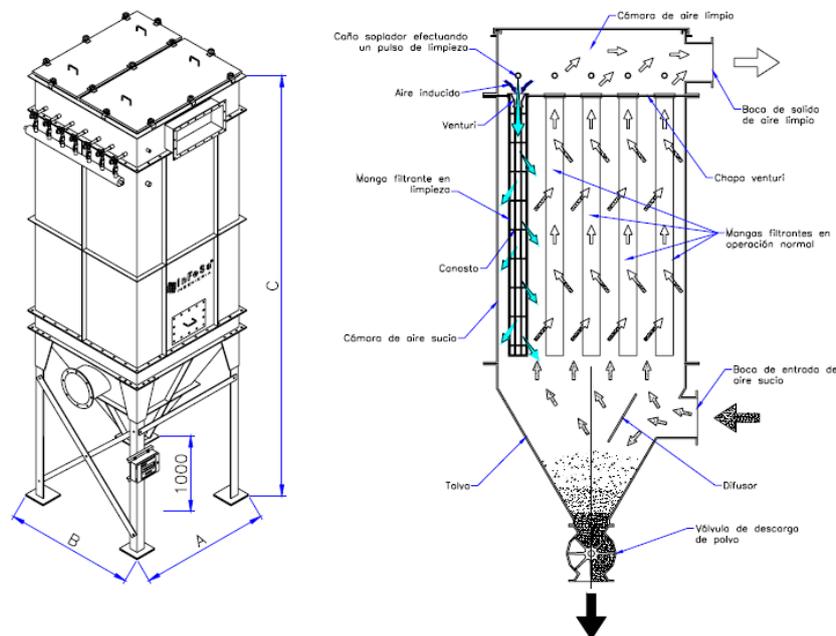


Figura 9. Esquema funcional de un filtro de mangas. Cortesía de INFESA S.R.L.

8.1.8 CHIMENEA

La chimenea es el último elemento presente en el circuito de gases y su función no es más que producir el tiro suficiente para la descarga de los humos de combustión y su dispersión en la atmosfera que rodea a la planta.

El diseño de la chimenea está regido por el tipo de combustible empleado, caudal de gases, problemática de corrosión por rocío ácido, el tiro y la dispersión de los gases. El tiro necesario para la evacuación de los gases depende de la altura y de la diferencia de temperaturas entre los gases y la temperatura exterior. La chimenea también debe cumplir las exigencias de la reglamentación sobre la dispersión de contaminantes en la atmosfera. En este último aspecto intervienen factores como la propia altura de la chimenea que asegure una dispersión adecuada, tipo de climatología de la zona, concentración de chimeneas en el entorno, proximidad de zonas residenciales y otros factores socioeconómicos.

Al ser el último equipo en el circuito de los humos de combustión existe la problemática de que estos se enfríen, especialmente en la zona de contacto con la superficie, alcanzado una temperatura por debajo de la formación de rocío ácido produciéndose corrosión. Para evitar este hecho indeseado la chimenea esta provista en sus paredes interiores por una protección antiácida y recubierta externamente por aislante a fin de evitar pérdidas de calor durante el ascenso de los gases por la pared de la chimenea evitando así que se alcancen temperaturas inferiores a las de formación de rocío ácido.

La planta dispone de una chimenea de 30 m de altura. En su parte más baja está provista de un ventilador inducido que impulsa los gases procedentes de filtro de mangas hacia el inicio de la propia chimenea. Exteriormente tiene instalada escaleras hasta aproximadamente un tercio de su altura, donde se encuentra una plataforma, para permitir la subida de operarios hasta la zona donde se ubica una sonda de medición continua de los humos. Esta sonda envía la siguiente información al panel de control global de la planta:

- Caudal de humos
- Temperatura de humos
- % O₂
- % CO₂

- CO en ppm
- Partículas en ppm

Es muy importante conocer estos valores porque son indicadores del rendimiento de la caldera y ofrecen al instante un aviso de si el proceso está o no dentro de los valores aceptables y actuar sobre las variables de la caldera.

Actualmente el Real Decreto 1042/2017, de 22 de diciembre, sobre la limitación de las emisiones la atmosfera de determinados agentes contaminantes de instalaciones de combustión medianas establece unos límites de emisión para el dióxido de azufre(SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y partículas. Para el monóxido de carbono no establece ningún valor límite, pero obliga a realizar una medición periódica para controlar su emisión a la atmosfera.

La planta a estudio posee una potencia de 5 MW por lo que los límites de emisiones que debe cumplir son los siguientes valores:

Tabla 3. Valores de emisión para instalaciones de combustión medianas con potencia térmica igual o superior a 1MWe e inferior o igual a 5MWe. Fuente: BOE.

| Contaminante | Biomasa sólida | Otros combustibles sólidos | Gasóleo | Combustibles líquidos distintos del gasóleo | Gas natural | Combustibles gaseosos distintos del gas natural |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------|---------|---------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------|
| SO ₂ | 200 ⁽¹⁾ ⁽²⁾ | 1100 | – | 350 | – | 200 ⁽³⁾ |
| NO _x | 650 | 650 | 200 | 650 | 250 | 250 |
| Partículas | 50 | 50 | – | 50 | – | – |

⁽¹⁾ El valor no se aplica en el caso de instalaciones que quemen exclusivamente biomasa sólida leñosa.

⁽²⁾ 300 mg/Nm³ en el caso de instalaciones que quemen paja.

⁽³⁾ 400 mg/Nm³ en el caso de gases de bajo poder calorífico procedentes de hornos de coque (industria siderúrgica).

8.2 TURBOALTERNADOR

El turboalternador es el nombre que se le da al conjunto de turbina más alternador que convierte la energía térmica de vapor en energía mecánica, en la turbina, y la energía mecánica en energía eléctrica en el alternador.

La planta dispone de una turbina de acción multietapa diseñada para expandir vapor sobrecalentado a 60 bar hasta la presión de operación del condensador, 0.1 bares. Durante la expansión escalonada se producen dos extracciones (“sangrados”) intermedias que envían vapor a presiones de 12 bar y 3 bar al precalentador y desgasificador respectivamente. La turbina se compone principalmente de tres partes: el cuerpo del rotor, que contiene las coronas giratorias de alabes, la carcasa, conteniendo las coronas fijas de toberas, y los alabes. La carcasa se divide en dos partes: la parte inferior, unida a la bancada y la parte superior, desmontable para el acceso al rotor. Ambas contienen las coronas fijas de toberas o alabes fijos. Normalmente se encuentra recubierta por una manta aislante que disminuye la radiación de calor al exterior, evitando que el vapor se enfríe y pierda energía disminuyendo el rendimiento de la turbina. El rotor de una turbina de acción es de acero fundido con ciertas cantidades de Níquel o cromo para darle tenacidad al rotor, y es de diámetro aproximadamente uniforme. Normalmente las ruedas donde se colocan los alabes se acoplan en caliente al rotor. Los alabes fijos y móviles se colocan en ranuras alrededor del rotor y carcasa. Además, tiene una serie de elementos estructurales, mecánicos y auxiliares, como son cojinetes, válvulas de regulación, sistema de lubricación, sistema de refrigeración, virador, sistema de control, sistema de extracción de vahos, de aceite de control y sistema de sellado del vapor.

El vapor se inyecta a través de unas toberas que transforma la energía térmica del vapor puesta a su disposición en energía cinética. A continuación, el vapor dotado de velocidad se le hace seguir una determinada trayectoria, (entre alabes), de forma que su velocidad absoluta disminuya transformando la energía cinética en mecánica.

El alternador o generadores de corriente alterna son máquinas que transforman la energía mecánica en eléctrica gracias a la Ley de Faraday. El alternador está compuesto por dos partes: el estator (inducido) y el rotor (inductor). El estator es la parte fija exterior formada por una carcasa metálica y que sirve de soporte. En su interior se encuentra el núcleo inducido donde se alojan los conductores del enrollamiento inducido. El rotor es la parte móvil que gira

dentro del estator. El movimiento del rotor genera una fuerza electromotriz en el devanado del estator por inducción electromagnética. El alternador girara a velocidad constante, velocidad de sincronismo, depende de la frecuencia de la red, en nuestro país, 50 Hz, y del número de polos de la máquina. Como la turbina y el alternador giran a velocidades diferentes, es necesario el acoplamiento mediante un reductor de velocidades. La tensión alterna trifásica generada se envía a la red pública a través de una pequeña subestación situada en la planta que mediante transformadores de subida aumenta la tensión hasta la fijada por la Red Eléctrica de España para el transporte.

8.3 CONDENSADOR

El condensador es el equipo encargado de evacuar el calor de ultima extracción de vapor de la turbina a presión constante. La extracción de calor se realiza mediante agua de rio. El condensador es como una caja de grandes dimensiones herméticamente cerrada y en su interior se encuentra lleno de vapor-húmedo. La transmisión de calor se efectúa a través de un serpentín de tubos por cuales circula en su interior agua de refrigeración (agua de rio). El vapor al entrar en contacto con los tubos fríos condensa. El condensado sale del equipo como liquido saturado a la presión de operación del condensador, 0.1 bar.

El equipo está diseñado, diámetro de tubos y longitud total, de tal manera que no se produzca una expulsión de agua calentada al rio de más de 24°C debido a restricciones medioambientales.

Durante el proceso de condensación se produce vacío en el interior del equipo por razones termodinámicas. El agua condensada ocupa un volumen muchísimo menor que el vapor (unas 2.500 veces menor) por lo que el resto es vacío, presión menor que la atmosférica. Sin embargo y de forma inevitable dentro del condensador queda vapor húmedo sin condensar(burbujas) y también bolsas de aire que aún no han sido eliminadas por el desgasificador. Estas burbujas más las bolsas de aire produce un cierto aumento de presión ene l condensador que es indeseable (lo que se busca es que la presión sea lo más baja posible porque de esta manera aumenta el rendimiento del ciclo); para eliminar estas bolsas de gases se instalan eyectores de vacío los cuales de forma forzada ayudan a eliminar estas bolsas de gases.

8.4 DESGASIFICADOR

La presencia de gases no condensables como el oxígeno O_2 y el dióxido de carbono CO_2 en el circuito agua-vapor genera corrosión y picaduras en la caldera y accesorios. La presencia de gases no condensables en el circuito del agua se debe a que existen una multitud de juntas y de puntos por donde puede colarse aire en el torrente de agua. El vapor circula a bastante velocidad por las tuberías y en las juntas (válvulas, purgadores, poros...) se crea una depresión en el exterior por efecto Venturi que facilita la entrada de aire al torrente de agua. Si no se extrae este aire la burbuja de aire va aumentando, creando problemas como:

- Cavitación en bombas.
- Golpes de ariete (válvulas, codos).
- Oxidación en tuberías.
- Ruido.

Por lo tanto, el desgasificador es un elemento imprescindible en cualquier ciclo de vapor. El equipo debe cumplir con los siguientes requisitos:

1. Eliminación de gases no condensables (CO_2 , O_2) aprovechando la solubilidad inversa de los gases a alta temperatura.
2. Precalentar el agua de alimentación con vapor de la propia instalación.
3. Acumular agua para alimentar las bombas de alta presión.
4. Evitar la cavitación proporcionando la presión hidrostática necesaria (NPSH).

La desgasificación térmica se basa en tres principios fundamentales: la Ley de Henry, la Ley de Dalton y el concepto de solubilidad que establecen que la concentración de un gas disuelto es proporcional a la presión del gas en equilibrio con la solución, que la presión total de la mezcla de gases es igual a la suma de sus presiones parciales y que la solubilidad de un gas en un líquido decrece con el aumento de la temperatura respectivamente. Si el líquido se encuentra a su temperatura de saturación, la solubilidad de un gas en él es nula, aunque se le deberá proporcionar la agitación adecuada. Este es el mecanismo de actuación de un desgasificador térmico. El desgasificador calentará el agua de alimentación hasta los $105\text{ }^\circ\text{C}$, temperatura en la que el agua no dispone de gases en disolución.

El desgasificador está compuesto por dos depósitos. Uno inferior, de acero y de gran tamaño donde se almacena el agua y se precalienta. Este tanque aloja en su parte inferior la salida de agua de alimentación a las bombas y generalmente una entrada de vapor hacia un tubo horizontal situado en la mitad inferior del depósito. El tubo horizontal tiene orificios practicados en toda su longitud que permiten la salida del vapor hacia el agua para precalentarla (borboteo del vapor). También dispone de una tubuladura vertical interior (válvula drenaje) con la altura máxima permitida de operación del equipo que una vez superada se evacua por esta drenando el exceso de agua. El equipo consta también de válvula de seguridad, válvula rompedora de vacío, válvula de venteo, termostato y conexión manómetro y termómetro.

El depósito superior o cabeza desgasificadora, de acero inoxidable, es de menor tamaño y es donde ocurre la desgasificación térmica. El agua condensada entra por la parte superior a través de varias válvulas de pulverización que la distribuyen en películas muy delgadas. Por la zona inferior de la cabeza se inyecta vapor de extracción de la turbina y al entrar en contracorriente con el agua pulverizada esta se calienta rápidamente hasta 1°C de acercamiento a la temperatura del vapor, con lo cual más del 95% de los gases no condensables son eliminados. Cerca del 1% del vapor sale conjuntamente con los gases no condensables hacia la atmósfera.

La cabeza y el tanque están unidos mediante una conexión tubo brida.

Mediante este sistema de desgasificación se consiguen concentraciones de oxígeno en el agua muy inferiores a 0.02 mg/l (ppm) siendo este valor el límite impuesto por la norma UNE 9.075.

Estos equipos se construyen bajo los requisitos dictados por la Presión Directiva de Equipos PED 2014/68/UE.

Para ver la disposición general del equipo y el sentido de los flujos de entrada y salida ir a ANEXO VII.

8.5 PRECALENTADOR DE ALTA PRESIÓN

Los precalentadores tienen la función de calentar gradualmente el agua condensada hasta la entrada a la caldera. Existen dos tipos de precalentadores, los de superficie, en los que no hay mezcla del fluido a calentar y el fluido que caliente, y mezcladores de mezcla que si se produce la mezcla completa de los fluidos. La planta tiene instalados 5MWe de potencia eléctrica y por tanto solo precisa de un precalentador de superficie de alta presión entre el desgasificador y la caldera.

Este equipo es un intercambiador de calor horizontal de tubos y carcasa tipo tipo CFU, con forma de cilindro. Estos equipos se diseñan bajo las reglas de TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association) y su identificación se establece bajo tres letras, que se corresponden con el tipo de cada una de las partes que lo componen. La primera letra hace referencia al tipo de cabeza de distribución, la segunda a la carcasa y la tercera al tipo de fondo.

La cabeza de distribución es la encargada de recibir el agua desgasificada y distribuirla uniformemente por los tubos y una vez precalentada la expulsa del equipo. Los tubos en forma de U están fuertemente soldados a una placa tubular de gran espesor con orificios practicados en toda su superficie. La distribución y configuración de los orificios se corresponde con la de los tubos. Los tubos pueden tener disposición triangular, triangular rotado, cuadrado y cuadrado rotado. Dentro de la cabeza de distribución se encuentra en su mitad una placa divisora del flujo que aísla la entrada de la salida y divide los tubos en dos mitades, mitad inferior es la encargada de recibir el agua a precalentar y la mitad superior es la encargada de expulsar el agua precalentada. La carcasa es cilíndrica con entrada y salida de vapor en la misma vertical. Dispone de una placa divisora longitudinal que dirige al vapor en su trayectoria por los tubos realizando un camino en U al igual que la disposición de los tubos. A cada cierta longitud de tubo se encuentra instalado baffles, que no son más que chapas dispuestas verticalmente para que el flujo de vapor en su camino vea reducida su velocidad y se generen turbulencias permitiendo una mayor transferencia de calor. El intercambio de calor se realiza en contracorriente. El agua desgasificada aumenta su temperatura gracias a la cesión del calor latente del vapor de extracción de la caldera. El vapor se condensa y sale como liquido saturado. El fondo del equipo cierra y sella todo el conjunto. Tiene forma de superficie esférica.

Para ver un esquema general del equipo ir al ANEXO VIII.

8.6 ALMACENAMIENTO ORUJILLO

El orujillo seco y extractado se almacena en un patio exterior a la intemperie en montones de aproximadamente 4 metros de altura. Cerca de la zona de alimentación de orujillo un almacén de apoyo abierto, con cubierta y piso móvil, denominado comúnmente como almacén nodriza o de diario, sirve de almacenaje previo de alimentación a la caldera. El almacén de apoyo esta siempre provisto de combustible y una cinta transportadora envía el combustible a un silo cerrado. La cinta transportadora esta provista de una criba y un imán. La criba elimina posibles piedras que puedan estar en el combustible y el imán elimina los metales. La cinta transportadora no opera de manera continua, sino que trabaja a intervalos asegurando el llenado del silo que alimenta la caldera. En la parte inferior del silo hay varios dosificadores volumétricos y empujadores accionados por cilindros hidráulicos que alimenta de combustible el hogar. Este proceso está controlado automáticamente inyectando la cantidad necesaria y suficiente para la combustión y régimen de trabajo.

8.7 OFICINAS, LABORATORIOS Y SCADA

La planta dispone de un edificio donde se alojan los siguientes servicios

- Oficinas.
- Despachos.
- Servicios sanitarios.
- Un pequeño laboratorio para control de muestras de agua y combustible.
- Almacén de repuesto y mantenimiento.
- Armarios eléctricos y sistemas de medida.
- Panel de control.

Toda la planta esta supervisada por un sistema SCADA que permite controlar y supervisar a distancia cada uno de los procesos que ocurren en la planta. Facilita la información en tiempo real de dispositivos de campo (sensores y actuadores) y controla el proceso automáticamente. Provee de toda la información que se genera en el proceso productivo (supervisión, control calidad, control de producción, almacenamiento de datos, etc.) y permite su gestión e intervención.

9 DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA

En este apartado se va a proceder a realizar los cálculos energéticos de la planta y de cada equipo tratándolos individualmente y estableciendo las ecuaciones correspondientes para su resolución. Para la ejecución y desarrollo de estos cálculos se ha empleado una herramienta de software conocida con el nombre Engineering Equation Solver (EES).

En primer lugar, se ha elaborado un diagrama de la planta, identificando cada equipo y las corrientes de salida y entrada que intervienen en cada proceso. Seguido se han recogido todos los datos conocidos previos al cálculo y que de aquí en adelante se denominaran "Datos de partida". A continuación, se han definido mediante las variables termodinámicas T (temperatura, °C), P (presión, bar), H (entalpía, kJ/kg), S (entropía, kJ/kg·K), X (título, -) y V (volumen específico, m³/kg) cada uno de los estados. Muchas de estas variables son desconocidas al principio del cálculo, pero se procede a la formulación de las ecuaciones de balance de masa y energía de cada equipo considerándolos como volúmenes de control y sistemas abiertos para cerrar el cálculo y teniendo así las mismas incógnitas que ecuaciones que permitirán la resolución global de la planta quedando todas las incógnitas resueltas. También se establecen otras ecuaciones como la potencia de las bombas, potencia en cada equipo, rendimiento global del ciclo y las ecuaciones para el dimensionamiento del patio de orujillo para su almacenamiento.

Las ecuaciones planteadas y los resultados obtenidos con el programa EES se pueden consultar en el ANEXO IX.

9.1 DATOS DE PARTIDA.

La siguiente tabla recoge todas las variables conocidas de la planta previa al cálculo.

Tabla 4. Datos de partida al cálculo.

| Variable | Valor | Unidad |
|-------------------|--------|-------------------|
| η_{cal} | 0,86 | - |
| η_{iso1} | 0,63 | - |
| η_{iso2} | 0,75 | - |
| η_{iso3} | 0,78 | - |
| η_{mec} | 0,9 | - |
| η_{alt} | 0,97 | - |
| Γ_{aux} | 0,85 | - |
| η_b | 0,6 | - |
| We | 5.000 | kW |
| L | 8.000 | h |
| PCI | 15.435 | kJ/Kg |
| $\rho_{orujillo}$ | 550 | kg/m ³ |
| Ha | 10.000 | m ² |
| h | 4 | m |
| σ_{patio} | 1,2 | - |
| P1,P12 | 60 | bar |
| P2,P10,P11 | 12 | bar |
| P4,P8,P9 | 3 | bar |
| P6,P7 | 0,1 | bar |
| T1 | 450 | °C |
| T9 | 105 | °C |
| T11 | 180 | °C |
| P13,P14 | 1,013 | bar |
| T13 | 17 | °C |
| T14 | 24 | °C |
| x7 | 0 | - |

Se procede a la descripción de cada una de las variables de partida recogidas en la tabla anterior:

- η_{cal} : Rendimiento de la caldera.
- η_{iso1} : Rendimiento isoentropico de la 1º extracción de la turbina.
- η_{iso2} : Rendimiento isoentropico de la 2º extracción de la turbina.
- η_{iso3} : Rendimiento isoentropico de la última extracción de la turbina.
- η_{mec} : Rendimiento mecánico acoplamiento turbina-alternador.
- η_{alt} : Rendimiento del alternador.
- Γ_{aux} : Factor de autoconsumo de equipos auxiliares (15 % autoconsumo).
- η_b : Rendimiento de las bombas.
- **We**: Potencia eléctrica instalada.
- **L**: Disponibilidad de la planta.
- **PCI**: Poder calorífico inferior del combustible.
- $\rho_{orujillo}$: Densidad del combustible.
- **Ha**: Valor en m² de una hectárea.
- **h**: Altura de los montones del combustible en el patio.
- **σ_{patio}** : Coeficiente de sobredimensionamiento del patio.
- **P1, P12**: Presión de trabajo de la caldera.
- **P2, P10, P11**: Presión de trabajo del precalentador y 1º extracción de vapor de la turbina.
- **P4, P8, P9**: Presión de trabajo del desgasificador y 2º extracción de vapor de la turbina.
- **P6, P7**: Presión de trabajo del condensador y última extracción de vapor de la turbina.
- **T1**: Temperatura del vapor sobrecalentado a la salida de la caldera.
- **T9**: Temperatura del agua de alimentación desgasificada.
- **T11**: Temperatura del agua de alimentación precalentada.
- **P13, P14**: Presión del agua de refrigeración.
- **T13**: Temperatura de entrada del agua de refrigeración al condensador.
- **T14**: Temperatura de salida del agua de refrigeración al condensador.
- **x7**: Título a la salida del condensador.

9.2 ESTADOS TERMODINAMICOS DEL CICLO RANKINE.

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico ampliamente utilizado en centrales térmicas de vapor y tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyen lo que se denomina un ciclo de potencia. Utiliza el agua como fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa. Una caldera genera vapor sobrecalentado mediante la transferencia en forma de calor sensible de los gases de combustión hacia el agua. El vapor sobrecalentado se expande en una turbina hasta la presión de condensación. A lo largo de la expansión en la turbina se produce dos extracciones intermedias de vapor con destino a alimentar el desgasificador y el precalentador para desgasificar el agua y precalentarla respectivamente. La expansión a través de los alabes de la turbina genera el movimiento del eje de la turbina que se encuentra acoplado aun alternador-generator que produce electricidad. En el condensador el vapor húmedo cede su energía al agua de refrigeración. A continuación, un desgasificador elimina los gases disueltos en el agua. El precalentador precalienta el agua de alimentación ya desgasificada que ingresa de nuevo en la caldera para realizar el ciclo nuevamente.

A continuación, se definen cada uno de los estados del Ciclo Rankine.

- **Estado 1:** Vapor sobrecalentado a 60 bares y 450°C. La caldera está diseñada para la producción de vapor en estas características. El vapor es conducido a la primera etapa de la turbina para su expansión.
- **Estado 2:** Primera extracción de vapor o como se conoce comúnmente “sangrado” a una presión de 12 bares, la cual se corresponden con la presión de trabajo del precalentador. Este vapor tiene como misión transferir energía en forma de calor latente para precalentar el agua de alimentación a la caldera.
- **Estado 3:** Corriente de vapor que continúa expandiéndose en la turbina.
- **Estado 4:** Segunda extracción o sangrado a una presión de 3 bares la cual se corresponde con la presión de operación del desgasificador.
- **Estado 5:** Corriente de vapor que continúa expandiéndose en la turbina.
- **Estado 6:** Última etapa de expansión de la turbina a una presión de 0,1 bar, a la

presión de operación del condensador. A la salida de la turbina nos encontramos con una mezcla húmeda de vapor-agua. Este punto está situado dentro de la campana en el diagrama T-s. Tiene como destino el condensador para transferir su energía a una corriente de agua de refrigeración.

- **Estado 7:** Condensación hasta líquido saturado ($x=0$) de la corriente de salida de la turbina. Este punto se corresponde con la salida del condensador.
- **Estado 8:** Aumento de presión a la de operación de desgasificación, 3 bar, a través de una bomba.
- **Estado 9:** Salida del agua desgasificada y precalentada del desgasificador a 105 °C y 3 bar.
- **Estado 10:** Aumento de la presión del agua de alimentación a la de operación del precalentador, 12 bar, a través de una bomba.
- **Estado 11:** Agua de alimentación precalentada a 180°C y 12 bar.
- **Estado 12:** Aumento de la presión del agua de alimentación a la de operación de la caldera, 60 bar, a través de una bomba.
- **Estado 13:** Entrada al condensador del agua de refrigeración (agua de río) a 17°C.
- **Estado 14:** Salida de agua de refrigeración una vez se haya producido la transferencia de calor desde la corriente de vapor húmedo hasta el agua de refrigeración. El agua de refrigeración abandona el condensador con una temperatura máxima de 24°C, es decir un salto de temperatura máximo de 7°C, debido a restricciones medioambientales.

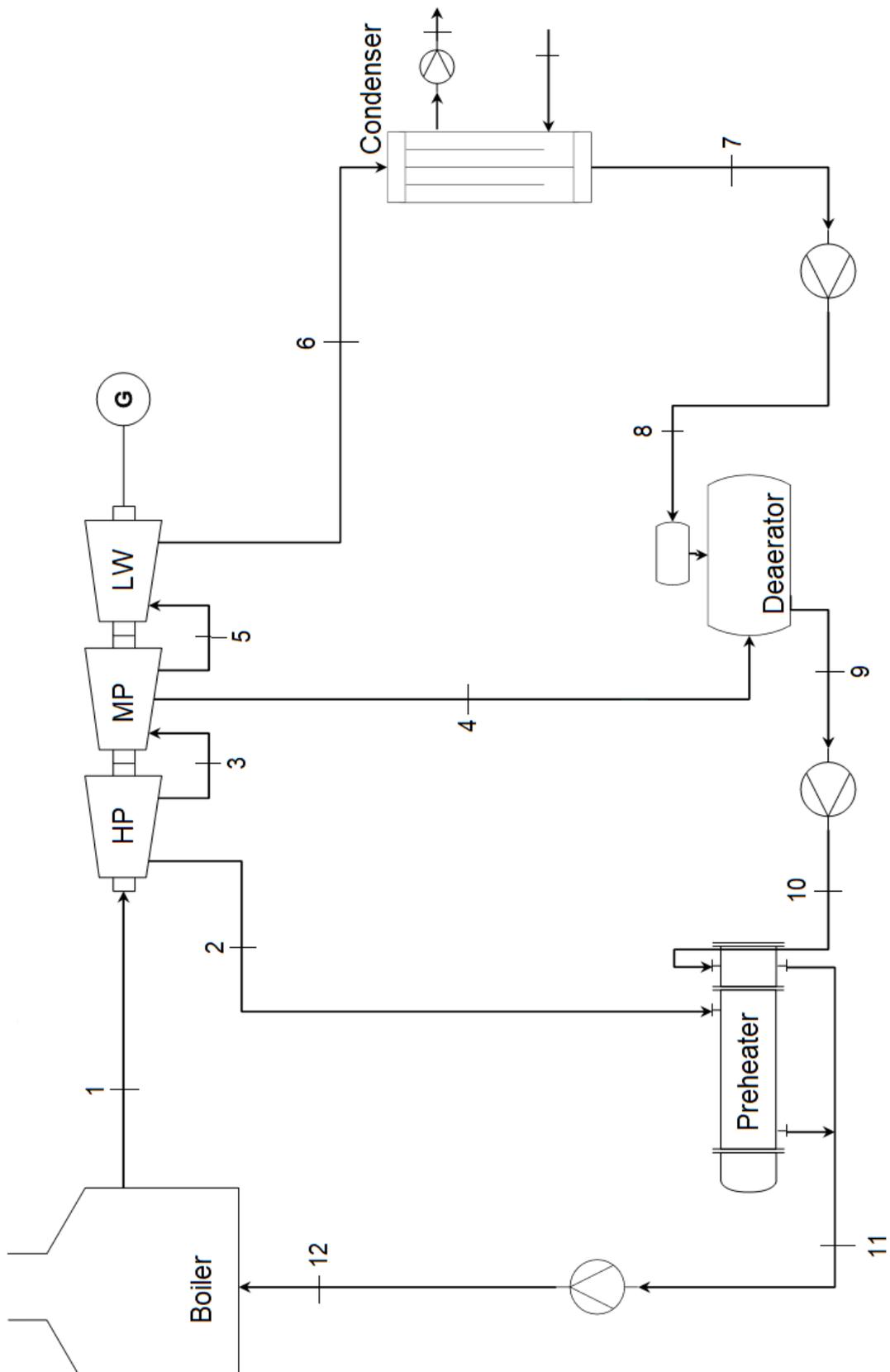


Figura 10. Esquema ciclo de potencia de la planta.

9.3 BALANCES DE MASA Y ENERGIA

A efectos de cálculo cada equipo se considera individualmente del resto del conjunto. Todos los equipos se definen como sistemas abiertos y estableciéndose volúmenes de control. Se aplicará por tanto la conservación de la energía (1er Principio) y la conservación de la masa (Ley de continuidad) por cada volumen de control formulando por cada equipo dos ecuaciones. Para simplificación de los cálculos todos los equipos trabajan en estado estacionario y de manera adiabática. Se considerarán despreciables los términos de energía cinética y potencial de la ecuación de conservación de la energía por ser despreciables frente al resto de términos de la ecuación.

➤ **Ley de continuidad (Conservación de la masa)**

El volumen de control no intercambia masa con el exterior ni lo acumula, luego la suma de los flujos de masa entrantes debe ser los misma que suma de los salientes.

$$\sum_e m_e = \sum_s m_s$$

➤ **Ley de la conservación de la energía (1er Principio)**

$$0 = -W_{vc} + \sum_e m_e \cdot h_e - \sum_s m_s \cdot h_s$$

9.3.1 Caldera

La caldera es el único equipo en el que no se aplicara las leyes antes mencionadas por no disponer de datos suficientes para su resolución, si no que se utilizara la ecuación de rendimiento de una caldera. Existen dos formas de calcular el rendimiento de una caldera: por el método directo y por el método indirecto.

El método indirecto o de pérdidas separadas recoge en un sumatorio cada una de pérdidas que se producen en la caldera.

$$\eta_{cal} = 100 - \sum P(\%) = 100 - P_g - P_i - P_p - P_r$$

- Pg: Calor perdido por la salida de los gases.
- Pi: Perdida por inquemados.
- Pp: Perdida por purgas.
- Pr: Perdidas por radiación.

Como no se dispone de información suficiente para determinar el conjunto de las pérdidas separadas se optará por el método directo.

El método directo define el rendimiento de una caldera como el cociente entre el efecto útil, aumento de la entalpía entre al entrada y salida (h_1-h_{12}), y el gasto que se corresponde al PCI del combustible.

$$\eta_{cal} = \frac{\text{Efecto útil}}{\text{Gasto}} = \frac{Mv \cdot (h_1 - h_{12})}{Mc \cdot \text{PCI}} = 0.86$$

- Mv: Caudal másico de vapor/agua en kg/s.
- Mc: Gasto másico de combustible en kg/s.

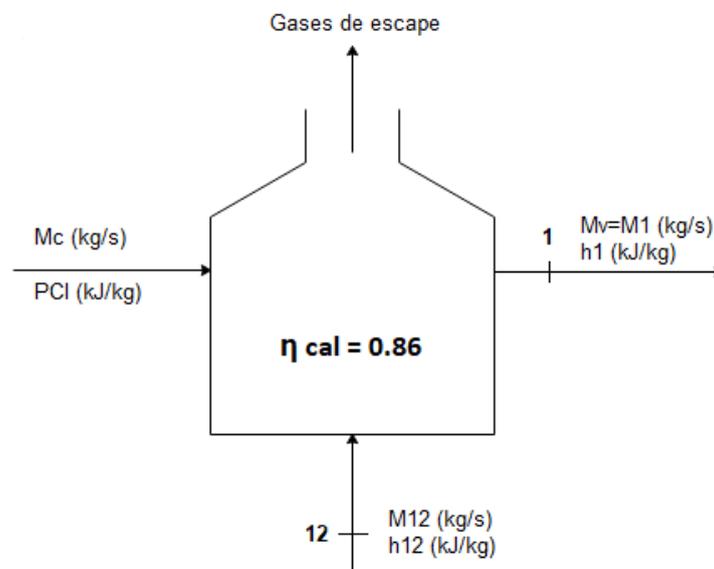


Figura 11. Esquema de flujos en la caldera.

9.3.2 Turbo-alternador

El caudal **M1** de vapor sobrecalentado producido en la caldera entra en la turbina a 450°C y 60 bar. En un primer lugar sufre una expansión hasta 12 bares donde se extrae una cierta cantidad (sangrado) de vapor, que se destina al precalentamiento del agua de alimentación. Esta extracción está identificada en la figura como **x**, es decir que **M2=x*M1**. El vapor sigue su expansión en la turbina. El estado 3 tiene las mismas características termodinámicas que el 2 pero con un caudal másico de **M3= (1-x) *M1** y se expande hasta 3 bares, donde se vuelve a realizar una extracción o sangrado de vapor con destino al desgasificador que servirá para eliminar los gases disueltos en el agua de alimentación. A esta corriente se le ha denominado **y**, es decir que **M4=y*M1**. Finalmente, la corriente 5, que posee las mismas características termodinámicas que la 4 se expande hasta la presión de condensación, 0.1 bares. El estado 6 se corresponde con la salida de la turbina.

Cada una de las etapas de expansión posee un rendimiento isoentropico que va asociado a las irreversibilidades del proceso y es necesario aplicar la siguiente fórmula para calcular el valor real de la entalpia en cada expansión, es decir h2, h4 y h6.

$$\eta_{iso1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} = 0.63$$

Del estado 1 se conocen tanto la P1 y T1 y con estos datos se calculan h1, s1 y v1. Del estado 2 solo conocemos la presión, 12 bares, y el rendimiento isoentropico. Luego tratándose de una extracción isoentropica la entropía del estado isoentropico **s2s es s1**. Con esto calculamos la entalpia isoentropica de este estado ideal y con la formula anterior calculamos la entalpia real. Conociendo la presión y la entalpia podemos calcular la T2, s2 y v2. Tal y como se ha comentado el estado 3 tendrá las mismas características termodinámicas que el estado 2. Este proceso se repetirá para las dos extracciones posteriores.

$$\eta_{iso2} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = 0.75 \quad ; \quad s_{4s} = s_3 ; h_{4s} \rightarrow h_4$$

$$\eta_{iso3} = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6s}} = 0.78 \quad ; \quad s_{6s} = s_5 ; h_{6s} \rightarrow h_6$$

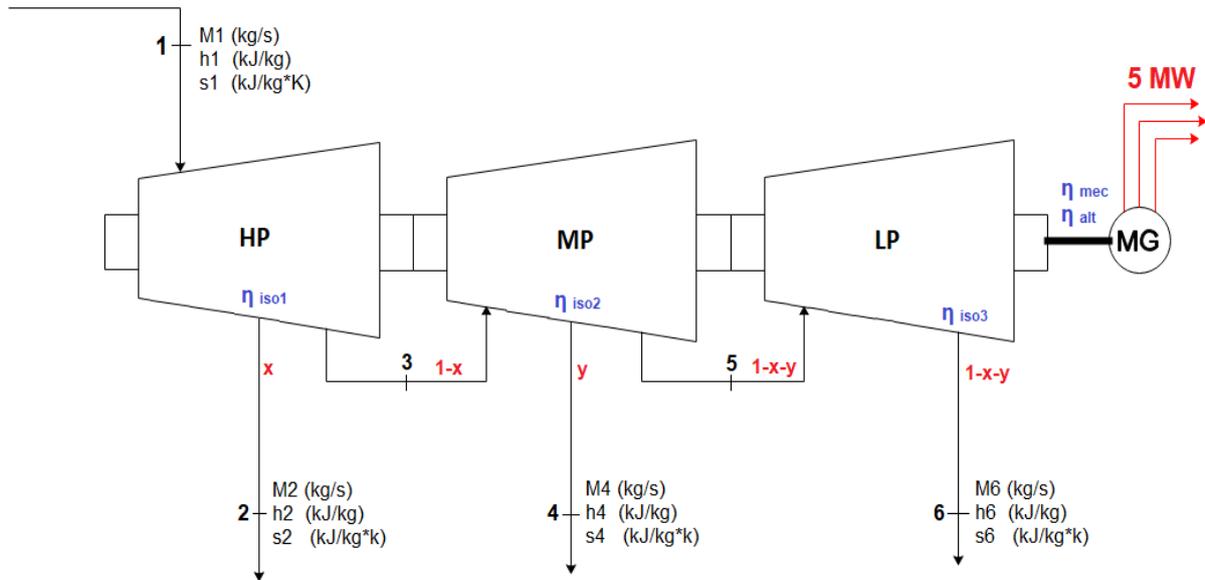


Figura 12. Esquema de flujos en la turbina.

Conservación de la masa:

$$M1 = M2 + M4 + M6$$

$$M2 = x \cdot M1 \quad ; \quad M3 = (1-x) \cdot M1 \quad ; \quad M4 = y \cdot M1 \quad ; \quad M5 = (1-x-y) \cdot M1 \quad ; \quad M6 = M5$$

Conservación de la energía:

$$W_t = M1 \cdot [h1 - (x \cdot h2) - (y \cdot h4) - ((1-x-y) \cdot h6)]$$

$$W_e = 5.000 \text{ kW} = W_t \cdot \eta_{\text{mec}} \cdot \eta_{\text{alt}}$$

$$W_{\text{aux}} = W_e \cdot (1 - \Gamma_{\text{aux}})$$

9.3.3 Condensador

La corriente bifásica, vapor húmedo, mezcla de vapor y agua a la salida de la turbina ingresa en un condensador que opera a una presión de 0,1 bares. Esta corriente cede calor al agua de refrigeración, agua de río, que circula por el interior de los tubos, hasta incrementar su temperatura en 7°C. Tras la cesión de calor el vapor húmedo sale del condensador en estado de líquido saturado (100% líquido) a la presión de operación del condensador.

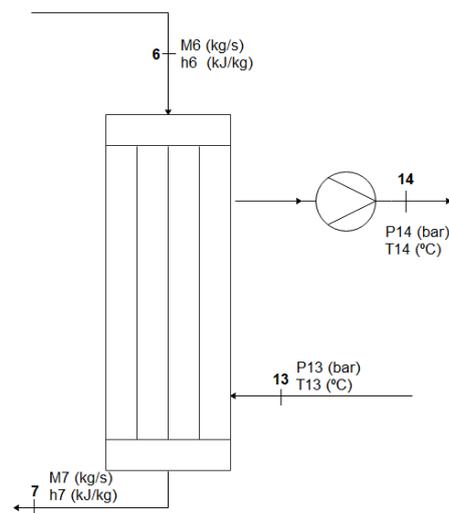


Figura 13. Esquema de flujos en el condensador.

Conservación de la masa:

$$M6 + M13 = M7 + M14$$

$$M6 = M7 \quad ; \quad M13 = M14$$

Conservación de la energía:

$$M6 \cdot h6 + M13 \cdot h13 = M7 \cdot h7 + M14 \cdot h14$$

Los estados 13 y 14 por tratarse de agua subenfriada podemos realizar la siguiente simplificación:

$$h13 \approx C_p \cdot T13$$

$$h14 \approx C_p \cdot T14$$

Luego,

$$M13 = \frac{M6 \cdot (h6 - h7)}{C_p \cdot (T14 - T13)}$$

9.3.4 Desgasificador

Una bomba a la salida del condensador incrementa la presión del agua hasta una presión de 3 bares que es a la que opera el desgasificador. Esta corriente entra por la parte superior del equipo, la cabeza desgasificadora, pulverizándose en contra corriente con un flujo de vapor a la misma presión, corriente 4, que es el vapor de la segunda extracción de la turbina. Se eliminan los gases disueltos en el agua se almacena en la parte inferior, tanque de almacenamiento. Finalmente, el agua abandona el equipo (estado 9) a una presión de 3 bares y 105°C.

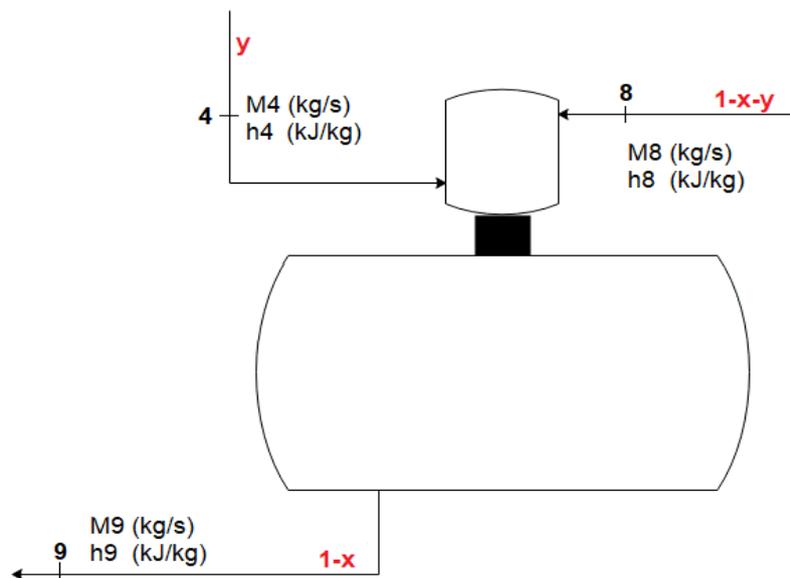


Figura 14. Esquema de flujos en el desgasificador.

Conservación de la masa:

$$M4 + M8 = M9$$

$$M8 = M7$$

Conservación de la energía:

$$(1-x-y) \cdot h8 + y \cdot h4 = (1-x) \cdot h9$$

9.3.5 Precalentador agua alimentación

Una bomba incrementa la presión del agua desgasificada hasta la presión de operación del precalentador, 12 bares. El agua (10) ingresa en el equipo través de la cabeza de distribución y se distribuye por el interior de los tubos. La corriente 2, primera extracción de vapor de la turbina a 12 bares, alimenta al equipo de calor cediéndolo al agua que circula por el interior de los tubos precalentándola. El vapor cede así su energía en forma de calor latente pasando de vapor seco a líquido saturado a la presión de operación del equipo y el agua aumenta su energía en forma de calor sensible incrementando su temperatura. El agua precalentada abandona el equipo a 12 bares y 180 °C.

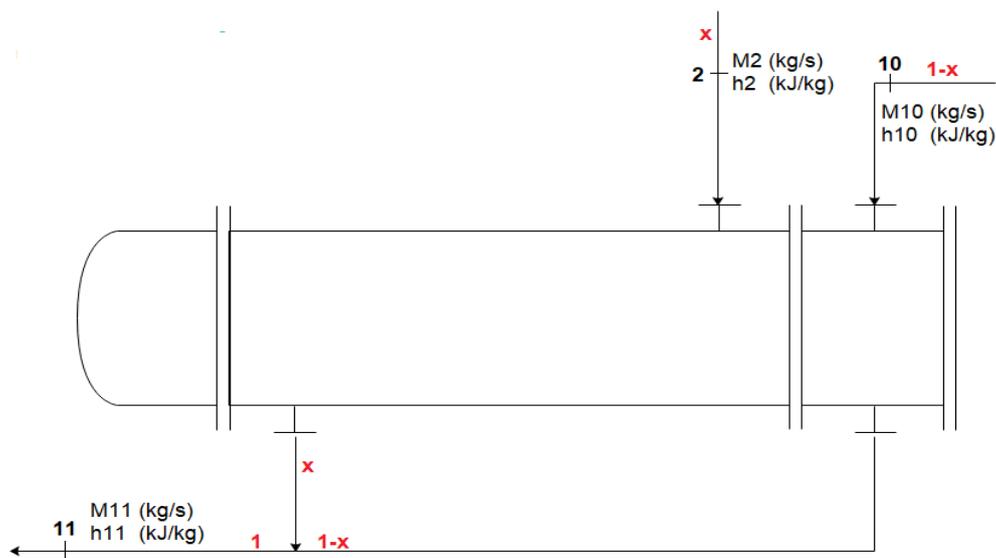


Figura 15. Esquema de flujos en el precalentador.

Conservación de la masa:

$$M2 + M10 = M11$$

$$M10 = M9$$

Conservación de la energía:

$$(1-x) \cdot h10 + x \cdot h2 = h11$$

9.3.6 Bombas

Las bombas necesitan aporte de energía para funcionar, es decir consumen trabajo para aumentar la presión del fluido. La ecuación del trabajo teórico de una bomba es la siguiente.

$$W_B^t = - \int_{P_1}^{P_2} v \cdot dP$$

$$W_B^t \text{ (kW)} = M \cdot v \cdot (P_2 - P_1) \cdot 100$$

También podemos calcular la potencia de una bomba con la siguiente formula:

$$W_B^t \text{ (kW)} = M \cdot (h_{2s} - h_1)$$

Pero en este caso debemos tener en cuenta que el trabajo real de una bomba es mayor debido a que debe vencer los efectos del rozamiento que hacen crecer la entropía del fluido a su paso por la misma y se debe tener en cuenta su rendimiento isoentropico.

$$W_B^r \text{ (kW)} = \frac{W_B^t \text{ (kW)}}{\eta_b}$$

$$\eta_b = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} ; \quad s_{2s} = s_1 \rightarrow h_{2s} \rightarrow h_2$$

$$W_B^r \text{ (kW)} = M \cdot (h_2 - h_1)$$

Bomba salida del condensador, 0.1-3 bar.

$$W_{b_{refri}} \text{ (kW)} = \frac{M_8 \cdot v_8 \cdot (P_8 - P_7) \cdot 100}{\eta_b} \quad \text{o} \quad W_{b_{refri}} \text{ (kW)} = M_8 \cdot (h_8 - h_7)$$

Bomba salida del desgasificador, 3-12 bar.

$$W_{b_{refri}} \text{ (kW)} = \frac{M_{10} \cdot v_{10} \cdot (P_{10} - P_9) \cdot 100}{\eta_b} \quad \text{o} \quad W_{b_{refri}} \text{ (kW)} = M_{10} \cdot (h_{10} - h_9)$$

Bomba salida del Pre calentador, 12 -60 bar.

$$W_{b_{refri}} \text{ (kW)} = \frac{M_{12} \cdot v_{12} \cdot (P_{12} - P_{11}) \cdot 100}{\eta_b} \quad \text{o} \quad W_{b_{refri}} \text{ (kW)} = M_{12} \cdot (h_{12} - h_{11})$$

9.4 RENDIMIENTO DEL CICLO

El rendimiento del ciclo es un indicador del aprovechamiento energético del combustible. Se define como el cociente entre el efecto útil del conjunto de la planta que es la producción de 5MWe (W_e) y el gasto que se corresponde con la potencia aportada en la caldera en forma de potencia del combustible ($Mc \cdot PCI$).

$$\eta_{\text{CICLO}} = \frac{\text{Efecto útil}}{\text{Gasto}} = \frac{W_e}{W_c} = \frac{W_e}{Mc \cdot PCI}$$

9.5 ALMACENAMIENTO Y DIMENSIONADO PATIO DEL ORUJILLO

El orujillo seco y extractado se almacena en un patio exterior en montones de 4 metros de altura aproximadamente. Conocemos la densidad media de este compuesto y la cantidad que se necesitan al año, considerando la disponibilidad de la planta de 8.000 horas anuales, de orujillo para generar 5.000 MWe. Las ecuaciones para dimensionar el patio son las siguientes:

$$Mc \left(\frac{t}{\text{año}} \right) = Mc \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot \frac{3600}{1000}$$

Conociendo la altura de los montones necesitamos calcular el volumen total que ocuparan y con el volumen se calculara la superficie total de ocupación para su almacenamiento. Se multiplicará por un factor de seguridad (20%) para sobredimensionarlo y asegurar que no exista interrupción en el suministro de combustible a la caldera.

$$V_{\text{orujillo}}(m^3) = \frac{Mc \left(\frac{kg}{s} \right) \cdot 3600 \cdot 8000}{\rho_{\text{orujillo}}}$$

$$S_{\text{orujillo}}(m^2) = \frac{V_{\text{orujillo}} \cdot \sigma_{\text{patio}}}{h}$$

$$S_{\text{orujillo}}(ha) = \frac{S_{\text{orujillo}}(m^2)}{Ha}$$

9.6 RESULTADOS

Tabla 5. Estados termodinámicos del ciclo Rankine

| ESTADOS TERMODINÁMICOS | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Estado | Presión P (bar) | Temperatura T (°C) | Entalpia h (kJ/Kg) | Entropía s (kJ/kg*k) | Titulo x (-) | Volumen especifico v (m3/kg) | Caudal Másico M (Kg/s) |
| 1 | 60 | 450 | 3.302 | 6,72 | - | 0,05214 | 7,22 |
| 2 | 12 | 295,5 | 3.035 | 7,013 | - | 0,2119 | 0,8949 |
| 3 | 12 | 295,5 | 3.035 | 7,013 | - | 0,2119 | 6,325 |
| 4 | 3 | 173 | 2.809 | 7,189 | - | 0,6722 | 0,5993 |
| 5 | 3 | 173 | 2.809 | 7,189 | - | 0,6722 | 5,725 |
| 6 | 0,1 | 45,82 | 2.395 | 7,556 | 0,921 | 13,51 | 5,725 |
| 7 | 0,1 | 45,82 | 191,8 | 0,6493 | 0 | 0,00101 | 5,725 |
| 8 | 3 | 45,87 | 192,3 | 0,6499 | - | 0,00101 | 5,725 |
| 9 | 3 | 105 | 440,3 | 1,363 | - | 0,001047 | 6,325 |
| 10 | 12 | 105,2 | 441,9 | 1,365 | - | 0,001047 | 6,325 |
| 11 | 12 | 180 | 763,3 | 2,139 | - | 0,001127 | 7,22 |
| 12 | 60 | 181,5 | 772,4 | 2,147 | - | 0,001127 | 7,22 |
| 13 | 1,013 | 17 | | | - | 0,001001 | 431,1 |
| 14 | 1,013 | 24 | | | - | 0,001003 | 431,1 |

Diagrama T-s del ciclo.

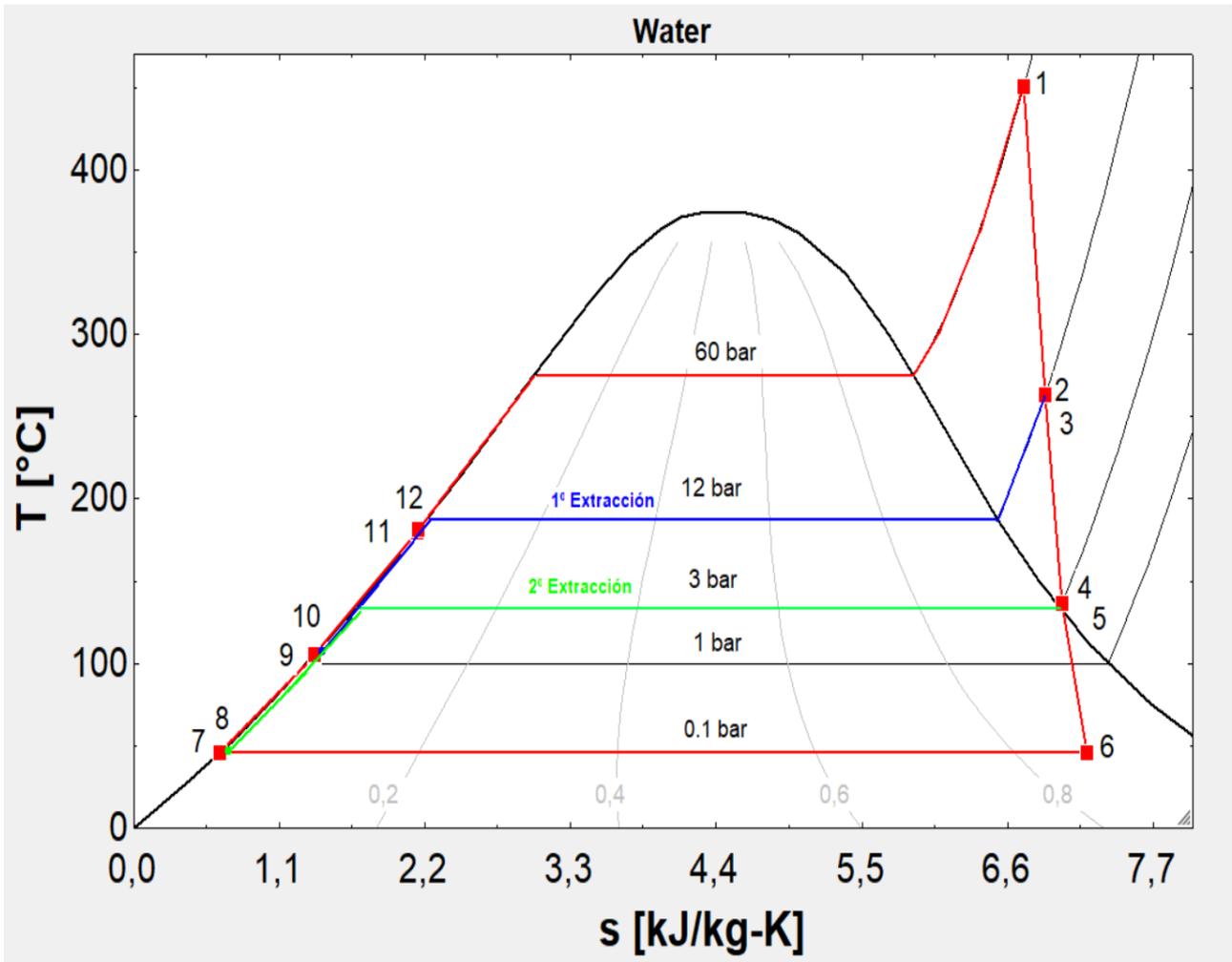


Figura 16. Diagrama T-s del ciclo.

Tabla 6. Resultados caldera.

| <u>CALDERA</u> | | | |
|-----------------------|------------|-------------|-----------------------------------------------------|
| W cal | 18.263 kW | | Potencia absorbida por el agua |
| Wc | 21.236 kW | | Potencia del combustible |
| M v | 7,22 kg/s | 25.991 kg/h | Caudal másico de vapor |
| Mc | 1.376 kg/s | 4.953 kg/h | Caudal másico de combustible |
| W eco+eva | 14.523 kW | | Potencia absorbida en el economizador y evaporador |
| W sobrec | 3.740 kW | | Potencia absorbida en el sobrecalentador |
| % eco+eva | 79.52 % | | % de Wcal absorbida en el economizador y evaporador |
| % sobrec | 20.48 % | | % de Wcal absorbida en el sobrecalentador |

Tabla 7. Resultados Turbolternador.

| <u>TURBO-ALTERNADOR</u> | | |
|--------------------------------|-------------|-------------------------------------------------|
| Wt | 5.727 kW | Potencia térmica bruta producida por la turbina |
| Waux | 750 kW | Potencia consumida por los equipos auxiliares |
| We | 5.000 kW | Potencia eléctrica instalada |
| x | 0.124 | Fracción de gasto másico 1º extracción |
| y | 0.08302 | Fracción de gasto másico 2º extracción |
| M1 | 7,22 kg/s | Producción de vapor sobrecalentado |
| M2 | 0,8949 kg/s | Caudal másico 1º extracción |
| M4 | 0,5993 kg/s | Caudal másico 2º extracción |

| | | |
|----|------------|------------------------------------|
| M6 | 5,725 kg/s | Caudal másico salida de la turbina |
|----|------------|------------------------------------|

Tabla 8. Resultados condensador.

| <u>CONDENSADOR</u> | | |
|---------------------------|------------|-----------------------------------------------|
| Wcond | 12.613 kW | Potencia disipada en el condensador |
| Mref | 431,1 kg/s | Caudal másico del agua de rio para refrigerar |

Tabla 9. Resultado trabajos de las bombas.

| <u>BOMBAS</u> | | |
|----------------------|----------|----------------------------------------------------|
| Wb_refri | 65,77 kW | Potencia consumida por la bomba del condensador |
| Wb_desg | 2,796 kW | Potencia consumida por la bomba del desgasificador |
| Wb_pre | 9,936 kW | Potencia consumida por la bomba del precalentador |
| Wb_cald | 65,1 kW | Potencia consumida por la bomba de la caldera |
| Wb_total | 143,6 kW | Potencia total consumida por las bombas |

Tabla 10. Rendimiento del ciclo.

| <u>RENDIMIENTO DEL CICLO</u> | | |
|-------------------------------------|---------|--------------------------|
| η ciclo | 23,54 % | Rendimiento de la planta |

Tabla 11. Resultado dimensionado almacenamiento del combustible.

| ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE | | |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| M orujillo | 39.624 t/año | Consumo anual del combustible al año |
| V orujillo | 72.044 m ³ | Volumen total de orujillo anualmente |
| S orujillo | 21.613 m ² | Superficie en m ² para almacenar el combustible |
| H orujillo | 2,161 ha | Superficie en ha para almacenar el combustible |

Ahora que conocemos la cantidad necesaria de combustible al año, se va a determinar las cantidades que se han ido obteniendo a lo largo del proceso desde la aceituna hasta el combustible final, el orujillo seco y extractado. Mediante la extracción de dos fases en las almazaras por cada tonelada procesada de aceituna se obtienen 200 kg de aceite y 800 kg de alperujo. A su vez el alperujo tras pasar por la extractora da lugar a orujillo seco y extractado (27%), hueso de aceituna (11,5%), aceite de orujo (1,5%) y agua (60%). Los porcentajes son en peso respecto al alperujo. Luego podemos concluir que las cantidades totales a lo largo del proceso productivo son las siguientes:

Tabla 12. Cantidades producidas de productos y subproductos en almazara y extractora.

| ALMAZARA-EXTRACTORA | | | |
|----------------------------|-------------------|---------|--------------|
| ACEITUNAS | | 183.444 | t/año |
| ACEITE | 20% | 36.689 | t/año |
| ALPERUJO | 80% | 146.756 | t/año |
| | AGUA | 60% | 88.053 t/año |
| | HUESO DE ACEITUNA | 11,50% | 16.877 t/año |
| | ACEITE DE ORUJO | 1,50% | 2.201 t/año |
| | ORUJILLO | 27% | 39.624 t/año |

10 PLAN DE PROYECTO

En este apartado se describirán las tareas que componen el proyecto, la duración estimada y los recursos necesario para su ejecución. Un diagrama de Gantt mostrara un resumen de la planificación.

10.1 TAREAS E HITOS

T.1 Ingeniería

- **T1.1 Ingeniera Básica**

- Descripción: Diseño preliminar del proyecto: anteproyecto, cálculos preliminares, estimaciones de costos, superficie aproximada de construcción, diagrama unifilar, diagrama de procesos, etc.
- Duración: 3 meses.
- Recursos: Ingeniero técnico.

- **T1.2 Ingeniera Detalle**

- Descripción: Se desarrolla el proyecto arquitectónico, planos estructurales, planos eléctricos, etc.
- Duración: 12 meses.
- Recursos: Ingeniero técnico.

H.1 Hito 1: Fin Ingeniería.

T2. Compras

- Descripción: Compra de la maquinaria.
- Duración: 12 meses.
- Recursos: Agente o gestor de compras.

H.2 Hito 2: Equipos en obra.

T3. Obra civil

- Descripción: Construcción de la planta: cimentaciones, almacén general, almacén nodriza, isla de potencia, etc.

- Duración: 6 meses.
- Recursos: Operarios.

H.3 Hito 3: Obra Civil ejecutada.

T4. Montaje mecánico

- Descripción: Instalación de la maquinaria.
- Duración: 4 meses.
- Recursos: Operarios.

H.4 Hito 4: Equipos montados.

T5. Montaje eléctrico

- Descripción: Montaje de todo el entramado eléctrico.
- Duración: 3 meses.
- Recursos: Operarios.

H.5 Hito 5: Equipos conectados.

T6. Puesta en marcha

- Descripción: Se realizan los ensayos de las máquinas para asegurar su correcto funcionamiento además de una prueba general de todo el proceso para verificar que las máquinas funcionen correctamente en todo el conjunto.
- Duración: 2 meses.
- Recursos: Operarios e Ingenieros técnicos.

H.6 Hito 6: Planta en funcionamiento.

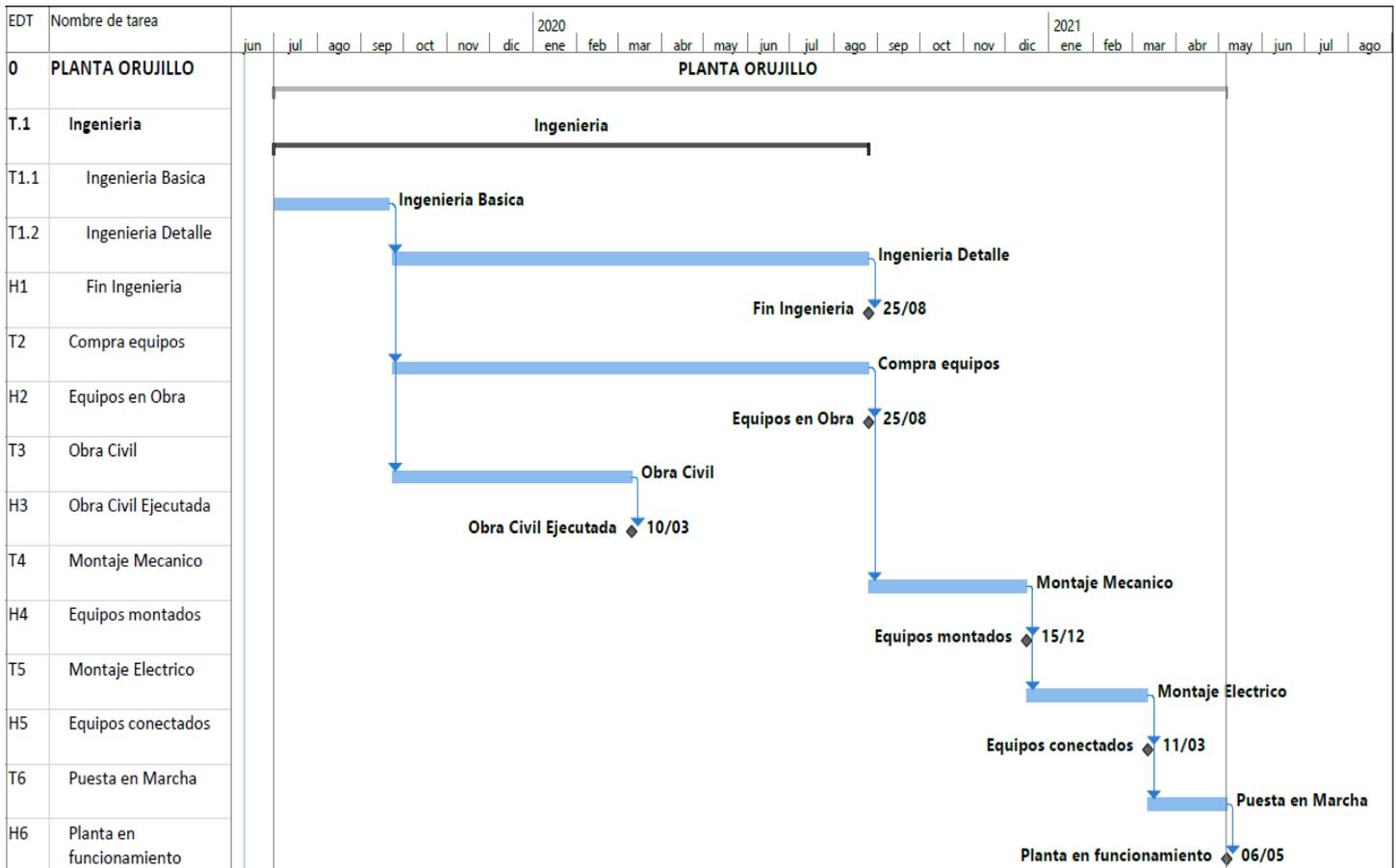
10.2 DIAGRAMA GANTT

RESUMÉN PROYECTO

INICIO: 01/07/2019

FIN:06/05/2021

CAMINO CRITICO: T1.1, T2, T4, T5, T6.



11 PRESUPUESTO

A continuación, se presenta el presupuesto total de la planta para puesta en marcha, los ingresos y gastos anuales debido a la venta de electricidad, operación y mantenimiento y un análisis del tiempo simple de retorno de la inversión.

| Partidas | Coste total | Unidad |
|---------------------------------------|-------------------|----------|
| Caldera | 4.500.000 | € |
| Caldera | | |
| Economizador | | |
| Calentador aire-humos | | |
| Filtro de mangas y chimenea | | |
| Desgasificador | | |
| Precalentador | | |
| Control | | |
| Turboalternador | 4.200.000 | € |
| Turbina | | |
| Reductor de velocidades | | |
| Alternador | | |
| Armario control local | | |
| Seguridad y control | | |
| Sistema de lubricación | | |
| Auxiliares | 2.500.000 | € |
| Bombas | | |
| Ventiladores y soplantes | | |
| Condensador | | |
| Tuberías, Válvulas, etc.. | | |
| Control general | | |
| Obra civil | 1.300.000 | € |
| Almacén general y nodriza de orujillo | | |
| Cimentaciones | | |
| Edificio turbina | | |
| Oficinas y Laboratorios | | |
| Taller(repuestos, herramientas...) | | |
| Montaje mecánico | 1.900.000 | € |
| Montaje eléctrico | 1.800.000 | € |
| Puesta en marcha | 280.000 | € |
| Subtotal 1 | 16.480.000 | € |
| Costes Indirectos (7%) | 1.153.600 | € |
| Subtotal 2 | 17.633.600 | € |
| Imprevistos(5%) | 881.680 | € |
| Inversión | 18.515.280 | € |

La inversión total de la planta de biomasa es de 18,5 millos de €. A continuación, se van a exponer los ingresos y gastos anuales al igual que los flujos de caja y el tiempo de retorno simple.

De la potencia total instalada, 5.000 kW, un 15%, es decir, 750 kW, se destina para el funcionamiento global de la planta. De los 4.250 kW restantes no todo se vende a la red eléctrica española (REE) sino que una cierta cantidad se vende a la extractora, aproximadamente 1000 kW, necesarios para el accionamiento de la totalidad de la maquinaria.

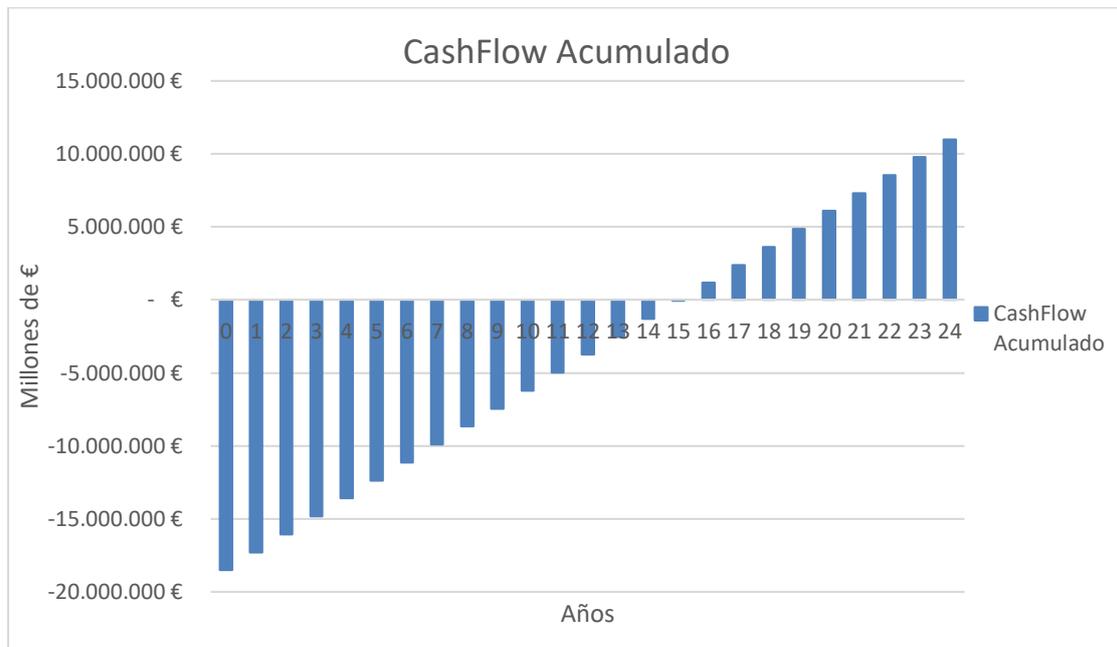
| | |
|-----------------------------|---------|
| POTENCIA INSTALADA | 5000 kW |
| POTENCIA AUXILIARES | 750 kW |
| SUBTOTAL 1 | 4250 kW |
| POTENCIA CONSUMO EXTRACTORA | 1000 kW |
| POTENCIA NETA | 3250 kW |

Los ingresos por la venta de electricidad y los gastos por operación y mantenimiento anuales se muestran a continuación. El orujillo no es un gasto ya que, al tratarse de un residuo de la extractora, su gestión y transporte por un ente autorizado supone un coste adicional y por tanto se entrega sin coste alguno a la planta para su combustión.

| Precios | | |
|---------------------------------------|-----|-------|
| Precio venta electricidad a REE | 50 | €/MWh |
| Precio compra electricidad extractora | 110 | €/MWh |

| INGRESOS Y GASTOS | | |
|-----------------------------|------------------|----------|
| INGRESOS VENTA A EXTRACTORA | 880.000 | € |
| INGRESOS VENTA A REE | 1.300.000 | € |
| TOTAL INGRESOS | 2.180.000 | € |
| OPERACIÓN | 800.000 | € |
| MANTENIMIENTO | 150.000 | € |
| TOTAL GASTOS | 950.000 | € |

| AÑO | INGRESO | GASTO | FLUJO DE CAJA | CASHFLOW ACUMULADO |
|-----|-------------|----------------|----------------|--------------------|
| 0 | - € | - 18.515.280 € | - 18.515.280 € | -18.515.280 € |
| 1 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | - 17.285.280 € |
| 2 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | - 16.055.280 € |
| 3 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | - 14.825.280 € |
| 4 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | - 13.595.280 € |
| 5 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -12.365.280 € |
| 6 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -11.135.280 € |
| 7 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -9.905.280 € |
| 8 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -8.675.280 € |
| 9 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -7.445.280 € |
| 10 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -6.215.280 € |
| 11 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -4.985.280 € |
| 12 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -3.755.280 € |
| 13 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -2.525.280 € |
| 14 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -1.295.280 € |
| 15 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | -65.280 € |
| 16 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 1.164.720 € |
| 17 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 2.394.720 € |
| 18 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 3.624.720 € |
| 19 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 4.854.720 € |
| 20 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 6.084.720 € |
| 21 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 7.314.720 € |
| 22 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 8.544.720 € |
| 23 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 9.774.720 € |
| 24 | 2.180.000 € | 950.000 € | 1.230.000 € | 11.004.720 € |



Tanto en la tabla de flujo de caja como en la gráfica correspondiente se puede observar que la planta tiene un beneficio anual de 1.23 millones de € y se necesitaran 15 años para recuperar la inversión total.

12 CONCLUSIÓN

España es el país de la Unión Europea con mayor cantidad de recursos absolutos de biomasa forestal y además es el país con mayor producción de aceite de oliva y el primer productor de ganado porcino de Europa. Sin embargo, nos encontramos a la cola en el ranking europeo por aprovechamiento de los recursos forestales y agroganaderos en la generación de energía eléctrica, térmica, biogás/biometano y valorización de la fracción orgánica de los residuos municipales. Esto se refleja en el mix energético actual en el que la biomasa representa únicamente el 2 % del total. En Finlandia, por ejemplo, la cuota de biomasa para generación eléctrica es del 20%. Esto nos da una idea de lo alejados y retrasados que nos encontramos respecto al uso de este recurso.

La biomasa es una energía renovable que no contamina, diversifica la generación eléctrica, combate el cambio climático, previene de incendios forestales, permite valorizar un residuo, impulsa la economía circular y aporta beneficios sociales y económicos al país y sobre todo dinamiza las zonas rurales. Pero es cierto que, si comparamos el uso del biocombustible analizado en este trabajo frente al gas, sin duda las plantas de gas para generación eléctrica o cogeneración poseen mayores rendimientos ya que el poder calorífico de gas es mucho mayor que el de la biomasa en general. ¿Pero y que haríamos sino con toda la biomasa que se genera? Su gestión y tratamiento o eliminación conlleva grandes gastos y su uso como biocombustible está más que justificado por todos los beneficios anteriormente mencionados. Pero las leyes cambiantes y los gobiernos no han concedido el apoyo suficientemente a la biomasa generando un base de inestabilidad a largo plazo que finalmente ha contribuido el estancamiento de este sector energético.

Pero la biomasa tiene una oportunidad de convertirse en energía de carba base en España y servir de apoyo a las renovables no gestionables (eólica y solar) con el fin de garantizar un suministro firme y ser una potencial candidata para sustituir a la nuclear.

Vivimos en un mundo que demanda cada año más energía y el cambio climático acecha a una velocidad alarmante. La población está cada día más concienciada con el impacto de la actividad del ser humano en nuestro planeta y creo que a pesar de que muchas fuentes de energía como puede ser el gas son altamente eficientes frente a otras fuentes renovables, nuestros representante políticos deben ser conscientes de que apoyar a cualquier tipo de fuente renovables como fuente base y segura de energía en un futuro próximo es una

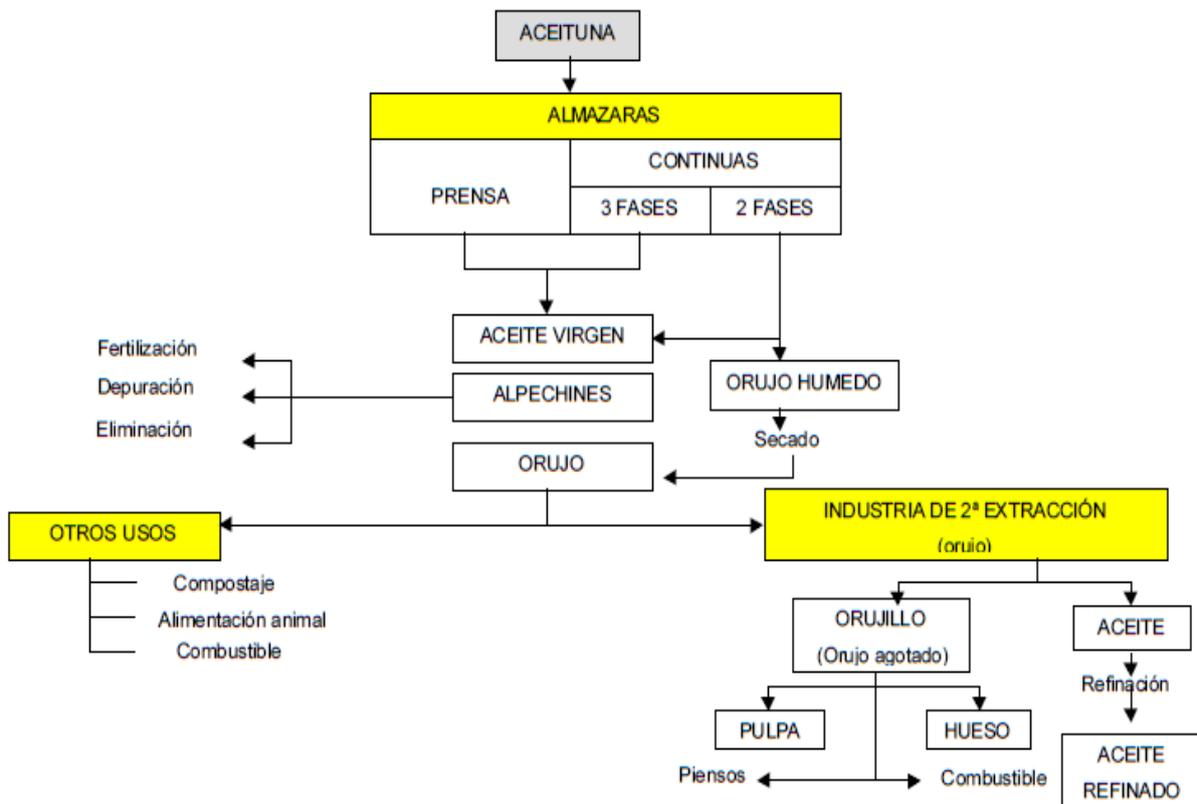
responsabilidad a pesar de los inconvenientes y dificultades a las que nos enfrentemos.
Debemos trabajar conjuntamente hacia un futuro sostenible y limpio.

13 BIBLIOGRAFIA

- [1] BÉJAR HEREDIA, M.C. (2012). *Obtención de aceites de orujo de oliva*. INAK0109. España: IC Editorial.
- [2] BESEL, S.A. (2007). *Biomasa: Gasificación*. España: IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). <https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Gasificacion_A2007_596f03d5.pdf>.
- [3] CAR/PL. (2000). *Prevención de la contaminación en la producción de aceite de oliva*. España: Centro de Actividades para la Producción Limpia. Plan Acción para el mediterráneo.
- [4] Centrales Termoeléctricas. (2019). *Master Universitario en Ingeniería Industrial*.
- [5] España. Real Decreto 1042/2017, de 22 de diciembre, sobre la limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión medianas y por el que se actualiza el anexo IV de la Ley 34/2007, de 15 de noviembre, de calidad del aire y protección de la atmósfera. «BOE» núm. 311, de 23 de diciembre de 2017.
- [6] Engineering Equation Solver (EES); (Versión v9.944-3D).
- [7] MOLINA IGARTUA, L.A. y ALONSO GIRÓN, J. M^a. (1996). *Calderas de vapor en la industria*. España: CADEM, Grupo EVE.
- [8] FERNÁNDEZ DÍEZ, P. (s.f.). Libros sobre Ingeniería Energética. <<http://es.pfernandezdiez.es/>>.
- [9] FERNÁNDEZ ORÍO, D. (2013). *Almazara de aceite virgen extra en Alfaro*. Proyecto Fin de Carrera. La Rioja: Universidad de la Rioja.
- [10] JIMÉNEZ, S.(s.f.). *Combustión de biomasa*. España: Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión, LITEC(CSIC-UZ). <<http://www.energia2012.es/sites/default/files/Combusti%C3%B3n%20de%20biomasa.pdf>>.
- [8] MATEOS FERNÁNDEZ, D. (2012). *Análisis, mantenimiento y operación de una central Térmica*.
- [13] MELISSARI, B. (2012). *Comportamiento de Cenizas y su Impacto en Sistemas de Combustión de Biomasa*. <http://www.um.edu.uy/docs/6_comportamiento_de_cenizas_y_suimpacto_en_sistemas_de_%20combustion_de_biomasa.pdf>.
- [5] Microsoft Project Professional 2016.

[9] SIERRA GARCÍA, H.A. (2018). *Información técnica ITSI-07. Desgasificación térmica*. España: Sistemas Industriales Calderas, S.L.(SINCAL)

ANEXO I. Visión general de productos, subproductos y residuos en la industria del aceite. Propiedades físicas y químicas del alperujo y orujillo seco y extractado.



Cortesía: Centro de Actividades Regionales para la Producción Limpia (CAR/PL).

| Parametros ¹ | Alperujo |
|-----------------------------------------------------|----------|
| Humedad | 55.8 |
| pH ² | 5.38 |
| CE2(ds m ⁻¹) | 4.64 |
| MO (%) | 90.8 |
| Lignina (%) | 34.5 |
| Celulosa (%) | 17.9 |
| Hemicelulosa (%) | 35.0 |
| C _{OT} (%) | 48.6 |
| NT (g kg ⁻¹) | 13.4 |
| NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹) | 63 |
| NO ₃ ⁺ (mg kg ⁻¹) | 16 |
| NO ₂ ⁺ (mg kg ⁻¹) | nd |
| Relación C _{OT} /N _T | 36.3 |
| Contenido graso (%) | 9.9 |
| Carbohidratos solubles (%) | 2.0 |
| Polifenoles hidrosolubles (%) | 0.9 |
| C _{OH} (%) | 8.7 |
| P (mg kg ⁻¹) | 0.8 |
| K (mg kg ⁻¹) | 10.4 |
| Ca (mg kg ⁻¹) | 8.0 |
| Mg (mg kg ⁻¹) | 3.1 |
| Na (mg kg ⁻¹) | 0.3 |
| S (mg kg ⁻¹) | 1.1 |
| Fe (mg kg ⁻¹) | 2429 |
| Cu (mg kg ⁻¹) | 22 |
| Mn (mg kg ⁻¹) | 56 |
| Zn (mg kg ⁻¹) | 17 |
| Pb (mg kg ⁻¹) | 4 |
| Cr (mg kg ⁻¹) | 19 |
| Ni (mg kg ⁻¹) | 55 |
| Cd (mg kg ⁻¹) | nd |

¹Datos expresados sobre materia seca,²extracto acuoso 1:10, nd: no detectado, Ce(conductividad térmica), MO (materia orgánica), C_{OR}(carbono orgánico total), N_T(nitrógeno total) y C_{OH}(carbono orgánico hidrosoluble).

| Orujillo seco y extractado | Valor mínimo | Valor máximo | Valor medio | Unidades |
|-----------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| ANÁLISIS BÁSICO | | | | |
| <i>Humedad(b.h.)</i> | 10.5 | 19.39 | 14.71 | % |
| <i>Cenizas(b.h.)</i> | 4.58 | 8.11 | 6.49 | % |
| <i>Volátiles (b.s.)</i> | 72.29 | 73.34 | 72.82 | % |
| ANÁLISIS ELEMENTAL | | | | |
| <i>Carbono(b.s.)</i> | 49.49 | 50.54 | 50.02 | % |
| <i>Hidrógeno(b.s.)</i> | 5.86 | 5.9 | 5.88 | % |
| <i>Azufre(b.s.)</i> | 0.07 | 0.24 | 0.14 | % |
| <i>Cloro(b.s.)</i> | 0.12 | 0.4 | 0.26 | % |
| <i>Potasio(b.s.)</i> | 25.45 | 33.15 | 29.3 | % |
| <i>Calcio (b.s.)</i> | 0.1 | 0.3 | 0.2 | % |
| <i>Magnesio (b.s.)</i> | 1 | 2.91 | 1.96 | % |
| <i>Oxígeno (b.s.)</i> | 36.04 | 42.56 | 39.3 | % |
| PODER CALORÍFICO | | | | |
| <i>Poder Calorífico Superior(b.s.)</i> | 4500 | 4819 | 4644 | Kcal/Kg |
| <i>Poder Calorífico inferior(b.s.)</i> | 4119 | 4513 | 4361 | Kcal/kg |
| <i>Poder Calorífico superior(b.h.)</i> | 3498 | 4216 | 3831 | Kcal/Kg |
| <i>Poder Calorífico Inferior (b.h.)</i> | 3441 | 3876 | 3689 | Kcal/Kg |

Nota b.s.=base seca, b.h.=base húmeda

ANEXO II. Imágenes extractora.

Almacenamiento de alperujo en el exterior de las almazaras.



Balsas de almacenamiento.





Tornillo sin fin de la balsa.



Sistema de transporte.



Decanter (centrifugadora).



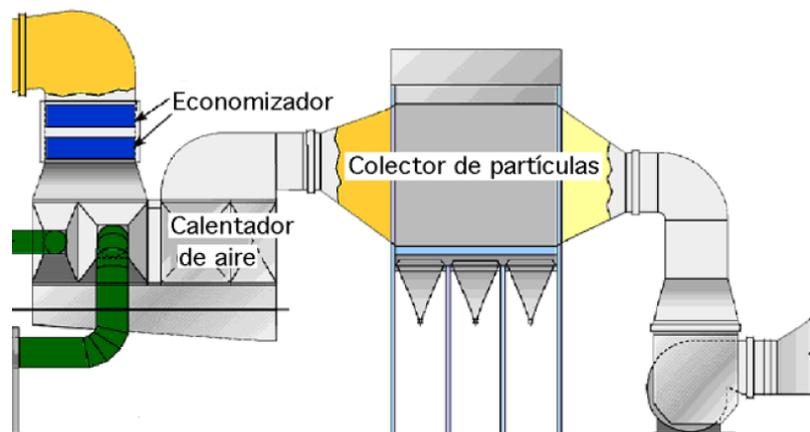
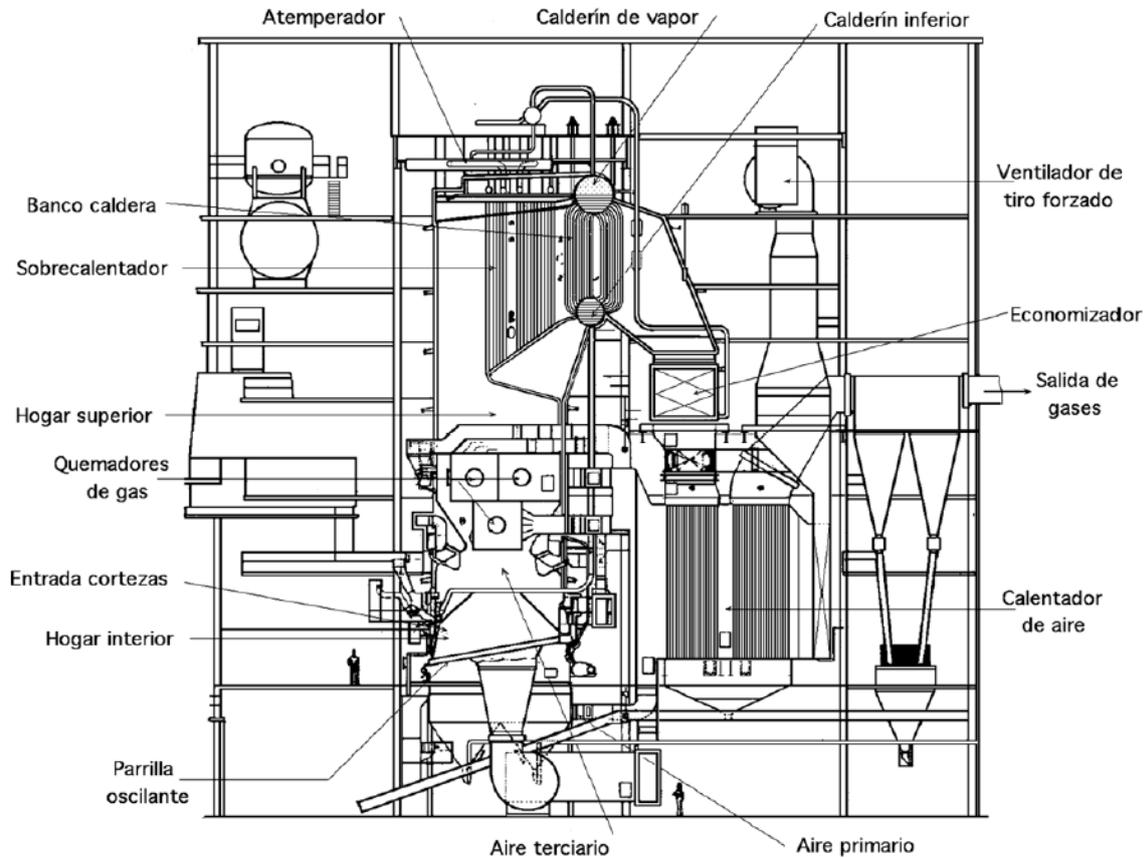
Secaderos.

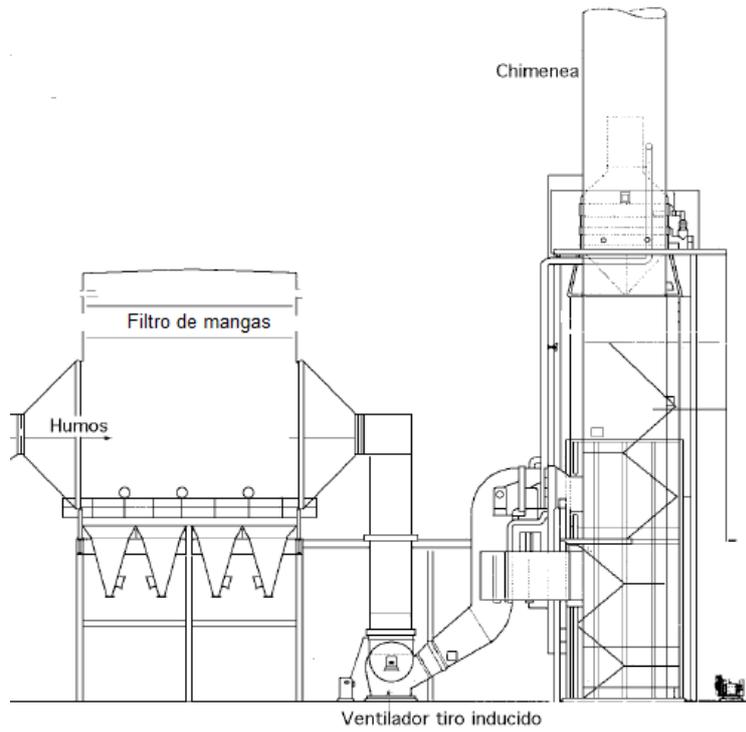


Pellets de orujo graso seco (granulado).

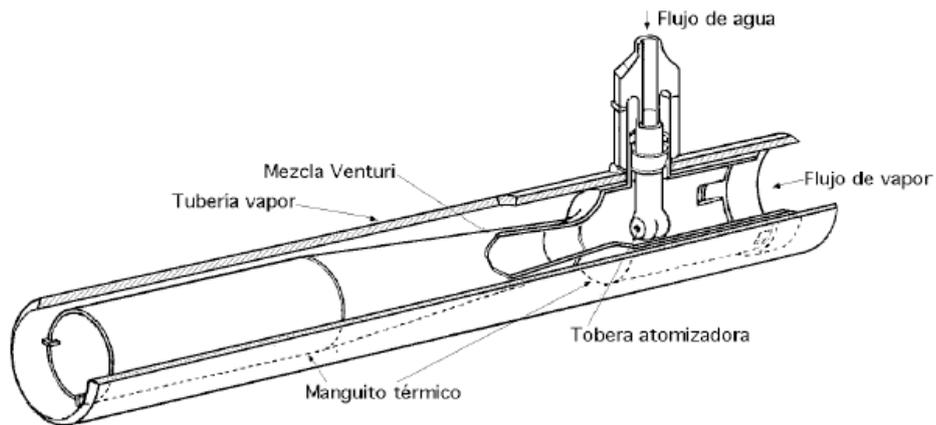
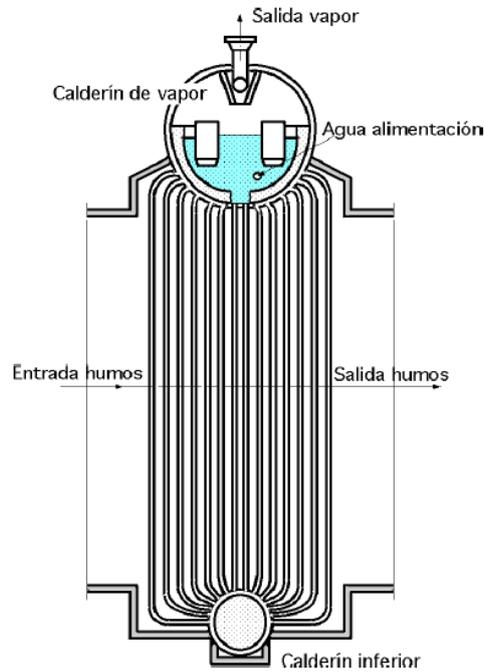


ANEXO III. Disposición general de caldera de parrillas para biomasa (Caldera Stirling)





ANEXO IV. Evaporador y atemperador



ANEXO V. Calidad del agua de alimentación en calderas acuatubulares según norma UNE 9.075.

| TIPOS DE CALDERAS Y PRESIONES MAXIMA DE SERVICIO, p, kg/cm ² | CALDERAS DE CIRCULACION FORZADA Y AGUA DE INYECCION PARA ATEMPERACION DE VAPOR | CALDERAS DE CIRCULACION (1) NATURAL O ASISTIDA | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------|-------------|---------|
| | | p ≤ 20 | 20 < p ≤ 40 | 40 < p ≤ 64 | p > 64 |
| REQUISITOS GENERALES | | | | | |
| Aspecto visual | Transparente, sin color ni sedimentos | | | | |
| Dureza °f | ≤0,01 | ≤0,1 | ≤0,05 | ≤0,05 | ≤0,02 |
| pH a 20 °C | 8 a 9,5 | 8 a 9,5 | 8 a 9,5 | 8 a 9,5 | 8 a 9,5 |
| O ₂ mg/l | ≤0,02 | | | | |
| CO ₂ libre | No detectable | | | | |
| CO ₂ combinado como (CO ₃ H+CO ₃ ⁼) mg/l (2) | ≤1 | Recomendado ≤20 | | ≤1 | |
| Fe mg/l | ≤0,02 | Recomendado ≤0,05 | | ≤0,03 | |
| Cu mg/l | ≤0,005 | ≤0,01 | | ≤0,005 | |
| Materias orgánicas valoradas en mg/l de MnO ₄ K consumido | ≤5 | ≤10 | | ≤5 | |
| Aceite mg/l | ≤0,3 | ≤1 | ≤0,5 | ≤0,5 | |
| SiO ₂ mg/l | Función de los límites impuestos para el agua en el interior de la caldera. | | | | |

(1) Para flujos de calor absorbidos superiores a 2×10⁵ kcal/m² h serán aplicables los valores de p>64 kg/cm² cualquiera que sea la presión máxima de servicio.

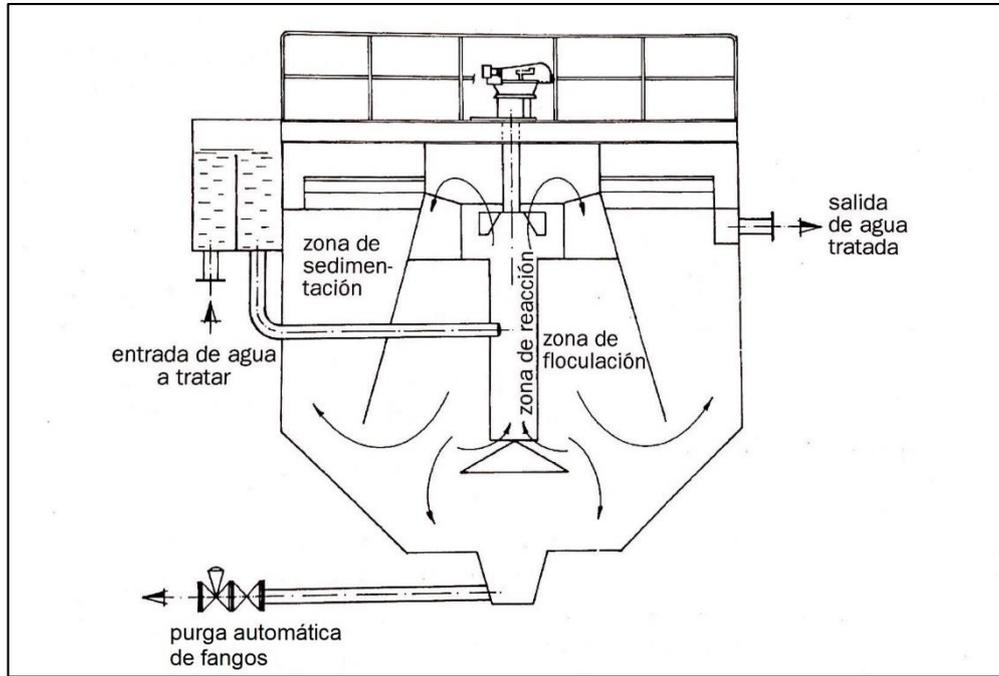
(2) Para caldera de presión inferior a 11 kg/cm² y baja producción se consideran estos valores como aconsejables.

| Presión máx. de servicio p en kg/cm ² | ≤20 | ≤40 | ≤64 | ≤80 | ≤125 | ≤160 |
|--------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Salinidad total mg/l | ≤3000 | ≤2000 | ≤1500 | ≤750 | ≤150 | ≤30 |
| Sólidos en suspensión mg/l | ≤150 | ≤100 | ≤75 | ≤40 | ≤10 | ≤5 |
| Alcalinidad total mg/l (2) | ≤600 | ≤400 | ≤300 | ≤150 | ≤30 | ≤6 |
| pH a 20 °C. | 9,5 a 11 |
| Fosfatos mg/l de P ₂ O ₅ | ≥25 | ≤10 | ≤10 | ≤3 | ≤3 | ≤6 |
| Sílice SiO ₂ mg/l | ≤140 | ≤50 | ≤10 | ≤4 | ≤1,5 | ≤0,4 |

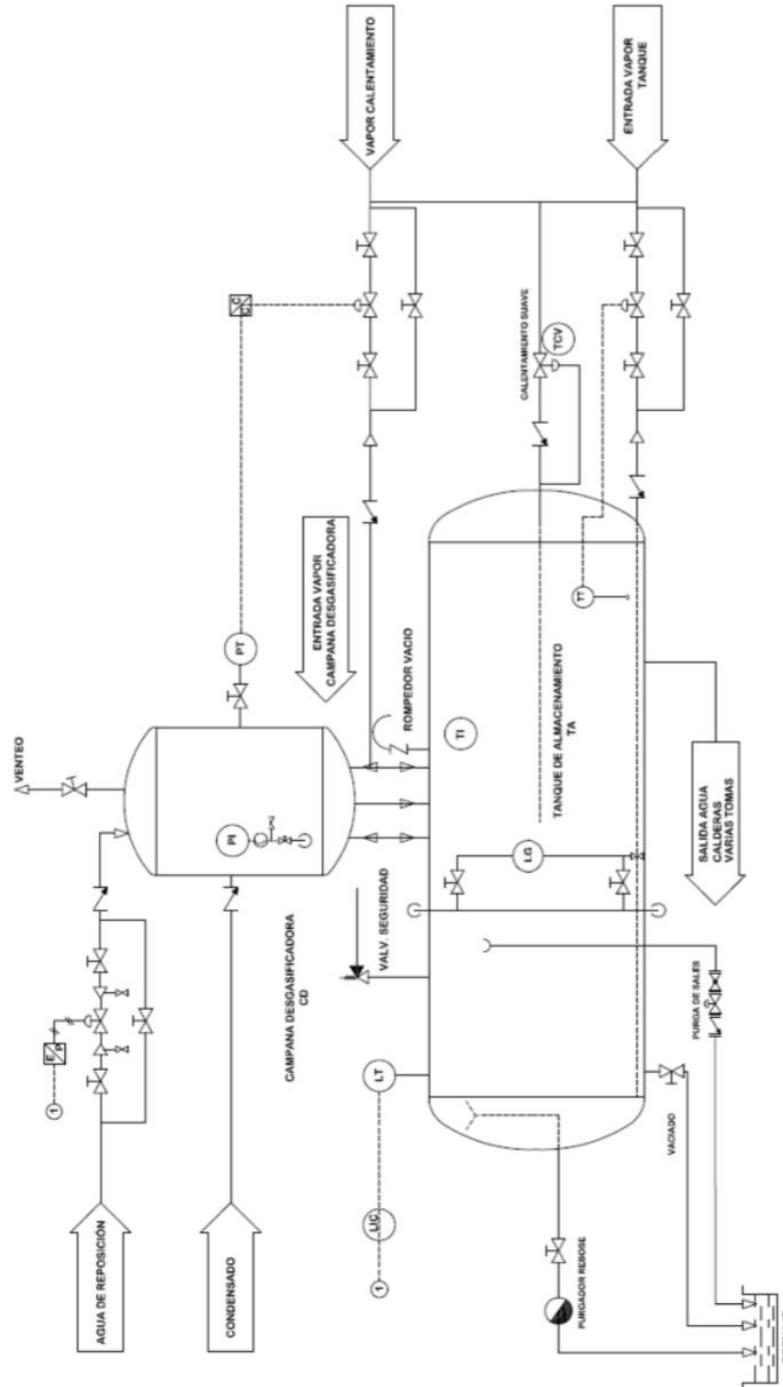
(1) Para cargas térmicas >2.10⁵ kcal/m²/h serán aplicables valores más exigentes de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

(2) En ningún caso será superior al 20% de la salinidad.

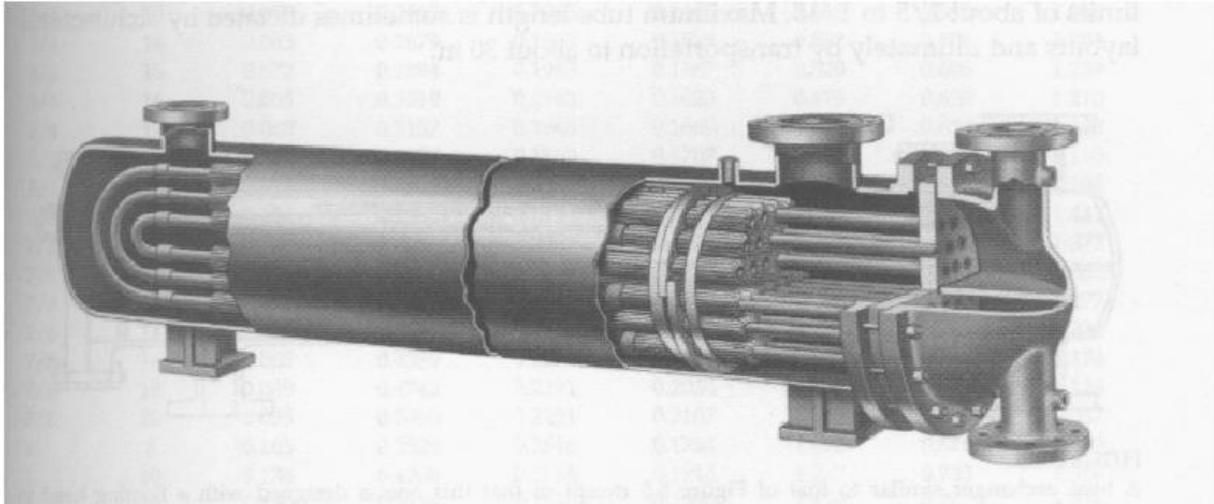
ANEXO VI. Fluoculador- decantador dinámico sin rasquetas de fondo.



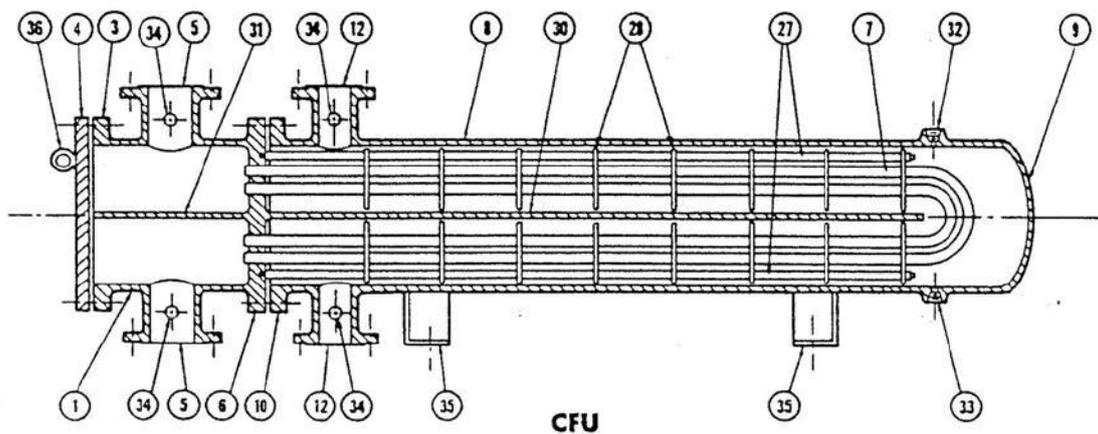
ANEXO VII. Desgasificador.



ANEXO VIII. Precalentador alta presión.



•INTERCAMBIADOR DE CABEZAL Y TUBOS INTEGRADOS (tipo CFU)



Este modelo tiene el conjunto de tubos en U lo que permite un fácil desmontaje del conjunto de tubos. Tiene el inconveniente a la hora de sustituir un tubo dañado. Tiene el desviador central unido a la placa de tubos .

ANEXO IX. Código EES y soluciones.

```

{ TFM : " Valorización energetica de orujillo de aceituna " }
{ Alumno: Ruben Iglesias Loredo }
{ Director: Victor de La Peña Aranguren }
{ Curso 2018/2019 }
{ Master en Ingeniería Industrail- Departamento de Maquinas y Motores Térmicos }
  
```

{DATOS CONOCIDOS}

```

L=8000                                {h, disponibilidad de la planta}
Ha=10^4                                {1 hectarea son 10,000 m2}
den_oru=550                             {kg/m3, densidad media del orujillo}
h=4                                     {m, altura de los montones de orujillo en el
patio}
n_patio=1,2                             {Coeficiente de seguridad para
almacenamiento}
PCI=15435                               {kJ/kg. poder calorifico inferior de la biomasa}
ren_cal=0,86                            {rendimiento de la caldera}
ren_mec=0,9                              {rendimiento mecanico del acoplamiento
turbina-alternador}
ren_alt=0,97                             {rendimiento del alternador}
ren_b=0,6                                {rendimiento bombas}
ren_iso_1=0,63                           {rendimiento isoentropico 1º extracción de la
turbina}
ren_iso_2=0,75                           {rendimiento isoentropico 2º extracción de la
turbina}
ren_iso_3=0,78                           {rendimiento isoentropico 3º extracción de la
turbina}
We=5000                                 {kW, potencia electrica de la planta}
ren_aux=0,85                             {El 10% de la potencia electrica generada es
autoconsumida por la propia planta}
  
```

{ESTADOS TERMODINAMICOS }

{ESTADO 1, salida de la caldera, vapor sobrecalentado}

```

P[1]=60                                 {bar}
T[1]=450                                 {°C}
h[1]=Enthalpy(Water;T=T[1];P=P[1])     {kJ/kg}
s[1]=Entropy(Water;T=T[1];P=P[1])     {kJ/kg*K}
v[1]=Volume(Water;T=T[1];P=P[1])     {m3/kg}
  
```

{ESTADO 2, sangrado para el precalentador}

```

P[2]=12                                 {bar}
s_s[2]=s[1]                             {kJ/kg*K}
h_s[2]=Enthalpy(Water;s=s_s[2];P=P[2]) {kJ/kg}
ren_iso_1=(h[1]-h[2])/(h[1]-h_s[2])     {-}
T[2]=Temperature(Water;P=P[2];h=h[2])  {°C}
s[2]=Entropy(Water;T=T[2];P=P[2])     {kJ/kg*K}
v[2]=Volume(Water;T=T[2];P=P[2])     {m3/kg}
  
```

{ESTADO 3}

| | |
|-------------|----------------------|
| $P[3]=P[2]$ | {bar} |
| $h[3]=h[2]$ | {kJ/kg} |
| $s[3]=s[2]$ | {kJ/kg*K} |
| $T[3]=T[2]$ | {°C} |
| $v[3]=v[2]$ | {m ³ /kg} |

{ESTADO 4, sangrado para el desgasificador}

| | |
|----------------------------------------------------------|----------------------|
| $P[4]=3$ | {bar} |
| $s_s[4]=s[3]$ | {kJ/kg*K} |
| $h_s[4]=\text{Enthalpy}(\text{Water};s=s_s[4];P=P[4])$ | {kJ/kg} |
| $\text{ren_iso_2}=(h[3]-h[4])/(h[3]-h_s[4])$ | {-} |
| $T[4]=\text{Temperature}(\text{Water};P=P[4];h=h[4])$ | {°C} |
| $s[4]=\text{Entropy}(\text{Water};T=T[4];P=P[4])$ | {kJ/kg*K} |
| $v[4]=\text{Volume}(\text{Water};T=T[4];P=P[4])$ | {m ³ /kg} |

{ESTADO 5}

| | |
|-------------|----------------------|
| $P[5]=P[4]$ | {bar} |
| $h[5]=h[4]$ | {kJ/kg} |
| $s[5]=s[4]$ | {kJ/kg*K} |
| $T[5]=T[4]$ | {°C} |
| $v[5]=v[4]$ | {m ³ /kg} |

{ESTADO 6, expansionado final de la turbina}

| | |
|----------------------------------------------------------|----------------------|
| $P[6]=0,1$ | {bar} |
| $s_s[6]=s[5]$ | {kJ/kg*K} |
| $h_s[6]=\text{Enthalpy}(\text{Water};s=s_s[6];P=P[6])$ | {kJ/kg} |
| $\text{ren_iso_3}=(h[5]-h[6])/(h[5]-h_s[6])$ | {-} |
| $T[6]=\text{Temperature}(\text{Water};P=P[6];h=h[6])$ | {°C} |
| $s[6]=\text{Entropy}(\text{Water};T=T[6];x=x[6])$ | {kJ/kg*K} |
| $x[6]=\text{Quality}(\text{Water};T=T[6];h=h[6])$ | {-} |
| $v[6]=\text{Volume}(\text{Water};x=x[6];P=P[6])$ | {m ³ /kg} |

{ESTADO 7, salida del condensador, liquido saturado}

| | |
|-------------------------------------------------------|----------------------|
| $P[7]=P[6]$ | {bar} |
| $x[7]=0$ | {-} |
| $h[7]=\text{Enthalpy}(\text{Water};x=x[7];P=P[7])$ | {kJ/kg} |
| $T[7]=\text{Temperature}(\text{Water};x=x[7];P=P[7])$ | {°C} |
| $s[7]=\text{Entropy}(\text{Water};P=P[7];x=x[7])$ | {kJ/kg*K} |
| $v[7]=\text{Volume}(\text{Water};x=x[7];P=P[7])$ | {m ³ /kg} |

{ESTADO 8, aumento de presión del agua a la presión de trabajo del desgasificador}

| | |
|----------------------------------------------------------|----------------------|
| $P[8]=3$ | {bar} |
| $v[8]=v[7]$ | {m ³ /kg} |
| $s_s[8]=s[7]$ | {kJ/kg*K} |
| $h_s[8]=\text{Enthalpy}(\text{Water};s=s_s[8];P=P[8])$ | {kJ/kg} |
| $\text{ren_b}=(h_s[8]-h[7])/(h[8]-h[7])$ | {-} |
| $T[8]=\text{Temperature}(\text{Water};h=h[8];P=P[8])$ | {°C} |

$$s[8]=\text{Entropy}(\text{Water};P=P[8];T=T[8]) \quad \{\text{kJ/kg}\cdot\text{K}\}$$

{ESTADO 9, salida agua desgasificada}

$$\begin{aligned}
 P[9] &= 3 && \{\text{bar}\} \\
 T[9] &= 105 && \{^\circ\text{C}\} \\
 h[9] &= \text{Enthalpy}(\text{Water};T=T[9];P=P[9]) && \{\text{kJ/kg}\} \\
 s[9] &= \text{Entropy}(\text{Water};P=P[9];T=T[9]) && \{\text{kJ/kg}\cdot\text{K}\} \\
 v[9] &= \text{Volume}(\text{Water};T=T[9];P=P[9]) && \{\text{m}^3/\text{kg}\}
 \end{aligned}$$

{ESTADO 10, aumento de presión del agua a la presión de trabajo del precalentador}

$$\begin{aligned}
 P[10] &= 12 && \{\text{bar}\} \\
 v[10] &= v[9] && \{\text{m}^3/\text{kg}\} \\
 s_s[10] &= s[9] && \{\text{kJ/kg}\cdot\text{K}\} \\
 h_s[10] &= \text{Enthalpy}(\text{Water};s=s_s[10];P=P[10]) && \{\text{kJ/kg}\} \\
 \text{ren_b} &= (h_s[10]-h[9])/(h[10]-h[9]) && \{-\} \\
 T[10] &= \text{Temperature}(\text{Water};h=h[10];P=P[10]) && \{^\circ\text{C}\} \\
 s[10] &= \text{Entropy}(\text{Water};P=P[10];T=T[10]) && \{\text{kJ/kg}\cdot\text{K}\}
 \end{aligned}$$

{ESTADO 11, salida agua precalentada}

$$\begin{aligned}
 P[11] &= 12 && \{\text{bar}\} \\
 T[11] &= 180 && \{^\circ\text{C}\} \\
 h[11] &= \text{Enthalpy}(\text{Water};T=T[11];P=P[11]) && \{\text{kJ/kg}\} \\
 s[11] &= \text{Entropy}(\text{Water};P=P[11];T=T[11]) && \{\text{kJ/kg}\cdot\text{K}\} \\
 v[11] &= \text{Volume}(\text{Water};T=T[11];P=P[11]) && \{\text{m}^3/\text{kg}\}
 \end{aligned}$$

{ESTADO 12, aumento de presión del agua a la presión de trabajo de la caldera}

$$\begin{aligned}
 P[12] &= 60 && \{\text{bar}\} \\
 v[12] &= v[11] && \{\text{m}^3/\text{kg}\} \\
 s_s[12] &= s[11] && \{\text{kJ/kg}\cdot\text{K}\} \\
 h_s[12] &= \text{Enthalpy}(\text{Water};s=s_s[12];P=P[12]) && \{\text{kJ/kg}\} \\
 \text{ren_b} &= (h_s[12]-h[11])/(h[12]-h[11]) && \{-\} \\
 T[12] &= \text{Temperature}(\text{Water};h=h[12];P=P[12]) && \{^\circ\text{C}\} \\
 s[12] &= \text{Entropy}(\text{Water};P=P[12];T=T[12]) && \{\text{kJ/kg}\cdot\text{K}\}
 \end{aligned}$$

{ESTADOS 13 y 14, entrada y salida agua de refrigeración}

$$\begin{aligned}
 P[13] &= 1,013 && \{\text{bar}\} \\
 P[14] &= 1,013 && \{\text{bar}\} \\
 C_{p_ref} &= 4,18 && \{\text{kJ/Kg}\cdot\text{K}, \text{ calor específico del agua}\} \\
 T[13] &= 17 && \{^\circ\text{C}, \text{ temperatura}\} \\
 \text{entrada} & && \\
 \text{Dif_T} &= 7 && \{\text{Diferencia máxima por restricción}\} \\
 \text{medioambiental entre la entrada y salida del agua de refrigeración} & && \\
 T[14] &= T[13]+\text{Dif_T} && \{^\circ\text{C}\} \\
 v[14] &= \text{Volume}(\text{Water};T=T[14];P=P[14]) && \{\text{m}^3/\text{kg}\} \\
 v[13] &= \text{Volume}(\text{Water};T=T[13];P=P[13]) && \{\text{m}^3/\text{kg}\}
 \end{aligned}$$

{CALCULOS ENERGETICOS, BALANCES DE MASA Y ENERGIA}

{-----CALDERA-----}

{Rendimiento de la caldera}

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| $W_c = M_c \cdot PCI$ | {kW, Potencia del combustible} |
| $ren_cal = M_v \cdot (h[1] - h[12]) / W_c$ | {-} |
| $T_sat = T_sat(\text{Water}; P=60)$ de la caldera} | {°C, temperatura de saturación a la presión de la caldera} |
| $h_sat = \text{Enthalpy}(\text{Water}; x=1; P=60)$ la caldera} | {kJ/kg, entalpia de saturación a la presión de la caldera} |
| $W_cal = M_v \cdot (h[1] - h[12])$ por la caldera} | {kW, potencia absorbida del agua a su paso por la caldera} |
| $W_eco_eva = M_v \cdot (h_sat - h[12])$ agua} | {kW, potencia necesaria para evaporar el agua} |
| $W_sobre = M_v \cdot (h[1] - h_sat)$ caldera} | {kW, grado de sobrecalentamiento en la caldera} |
| $porcentaje_eco_eva = 100 \cdot (W_eco_eva / W_cal)$ | {%, porcentaje potencia para evaporación} |
| $porcentaje_sobre = 100 \cdot (W_sobre / W_cal)$ sobrecalentamiento} | {%, porcentaje potencia para el grado de sobrecalentamiento} |

{-----TURBO-ALTERNADOR-----}

{Balance de energia}

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| $W_t = (M_v \cdot (h[1] - (x \cdot h[2]) - (y \cdot h[4]) - ((1-x-y) \cdot h[6])))$ | {kW, potencia generada por la turbina} |
| $W_e = W_t \cdot ren_mec \cdot ren_alt$ | {kW, Potencia electrica generada} |
| $W_aux = W_e \cdot (1 - ren_aux)$ | {kW, potencia electrica para auxiliares,} |
| $W_neta = W_e - W_aux$ | |

{Balance de masa}

| | |
|-----------------------------|--------|
| $M_v = M[1]$ | {kg/s} |
| $M[2] = x \cdot M[1]$ | {kg/s} |
| $M[3] = (1-x) \cdot M[1]$ | {kg/s} |
| $M[4] = y \cdot M[1]$ | {kg/s} |
| $M[5] = (1-x-y) \cdot M[1]$ | {kg/s} |
| $M[5] = M[6]$ | {kg/s} |

{-----CONDENSADOR-----}

{Balance de masa}

| | |
|-------------------|--------|
| $M[7] = M[6]$ | {kg/s} |
| $M[13] = M[14]$ | {kg/s} |
| $M[13] = M_{ref}$ | {kg/s} |

{Balance de energia}

| | |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| $M[6] \cdot (h[6] - h[7]) = M_{ref} \cdot C_{p_ref} \cdot Dif_T$ | |
| $W_cond = M[6] \cdot (h[6] - h[7])$ | {kW} |

{-----DESGASIFICADOR-----}

{Balance de energía}

$$((1-x-y)*h[8])+(y*h[4])=((1-x)*h[9])$$

{Balance de masa}

$$M[9]=M[8]+M[4] \quad \text{{kg/s}}$$

{-----PRECALENTADOR ALTA PRESIÓN-----}

{Balance de energía}

$$(1-x)*h[10]+x*h[2]=h[11]$$

{Balance de masa}

$$M[11]=M[10]+M[2] \quad \text{{kg/s}}$$

$$W_pre=M[10]*(h[11]-h[10]) \quad \text{{kW}}$$

{-----CONSUMO DE LAS BOMBAS-----}

{BOMBA AGUA DE REFRIGERACIÓN}

$$Wb_refri=(Mref*v[14]*(P[14]-P[7])*100)/ren_b \quad \text{{kW}}$$

{ BOMBA ENTRADA DESGASIFICADOR}

$$M[8]=M[7] \quad \text{{kg/s}}$$

$$Wb_desg=(M[8]*v[8]*(P[8]-P[7])*100)/ren_b \quad \text{{kW}}$$

{ BOMBA ENTRADA PRECALENTADOR}

$$M[10]=M[9] \quad \text{{kg/s}}$$

$$Wb_pre=M[10]*v[10]*(P[10]-P[9])*100/ren_b \quad \text{{kW}}$$

{ BOMBA ENTRADA CALDERA}

$$M[12]=M[11] \quad \text{{kg/s}}$$

$$Wb_cald=(M[12]*v[12]*(P[12]-P[11])*100)/ren_b \quad \text{{kW}}$$

$$Wb_total=Wb_pre+Wb_refri+Wb_desg+Wb_cald \quad \text{{kW}}$$

{-----}

$$ren_ciclo=(We/Wc)*100 \quad \text{{%}}$$

$$M_vapor=M[1]*3600 \quad \text{{kg/h}}$$

$$M_oru=Mc*3600/1000 \quad \text{{t/h}}$$

$$M_oru_año=M_oru*L \quad \text{{t/año}}$$

$$V_oru=Mc*(1/den_oru)*3600*L \quad \text{{m3}}$$

$$S_{oru} = n_{patio} \cdot V_{oru} / h$$

$$H_{oru} = S_{oru} / Ha$$

{\\$ST\\$OFF}

{m²}

{Ha, hectareas}

Unit Settings: SI C bar kJ mass deg

| | | |
|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| $C_{p,ref} = 4,18$ [kJ/kg] | $den_{oru} = 550$ [kg/m ³] | $Dif_T = 7$ [°C] |
| $h = 4$ [m] | $Ha = 10000$ [m ²] | $H_{oru} = 2,161$ [hectareas] |
| $h_{sat} = 2784$ [kJ/kg] | $L = 8000$ [h] | $Mc = 1,376$ [kg/s] |
| $M_{ref} = 431,1$ [kg/s] | $Mv = 7,22$ [kg/s] | $M_{oru} = 4,953$ [t/h] |
| $M_{oru,año} = 39624$ [t/año] | $M_{vapor} = 25991$ [kg/h] | $n_{patio} = 1,2$ |
| $PCI = 15435$ [KJ/kg] | $porcentaje_{eco,eva} = 79,52$ [%] | $porcentaje_{sobre} = 20,48$ [%] |
| $ren_{at} = 0,97$ | $ren_{aux} = 0,85$ | $ren_b = 0,6$ |
| $ren_{cal} = 0,86$ | $ren_{ciclo} = 23,54$ [%] | $ren_{iso,1} = 0,63$ [kg/kJ] |
| $ren_{iso,2} = 0,75$ | $ren_{iso,3} = 0,78$ | $ren_{mec} = 0,9$ |
| $S_{oru} = 21613$ [m ²] | $T_{sat} = 275,6$ | $V_{oru} = 72044$ [m ³] |
| $Wb_{cald} = 65,1$ [kW] | $Wb_{desg} = 2,796$ [kW] | $Wb_{pre} = 9,936$ [kW] |
| $Wb_{refri} = 65,77$ [kW] | $Wb_{total} = 143,6$ [kW] | $Wc = 21236$ [kW] |
| $W_e = 5000$ [kW] | $W_t = 5727$ [kW] | $W_{aux} = 750$ [kW] |
| $W_{cal} = 18263$ [kW] | $W_{cond} = 12613$ [kW] | $W_{eco,eva} = 14523$ [kW] |
| $W_{neta} = 4250$ [kW] | $W_{pre} = 2033$ [kW] | $W_{sobre} = 3740$ [kW] |
| $x = 0,124$ | $y = 0,08302$ | |