

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***PLANTA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUOS FORESTALES MEDIANTE CICLO RANKINE, PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA***

**Alumno/Alumna:** Cuesta, Herrero, David  
**Director/Directora:** de la Peña, Aranguren, Víctor Francisco

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** 17, Julio, 2018

## DATOS BÁSICOS DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO

- **Alumno:** David Cuesta Herrero.
  - **Director/a:** Víctor Francisco de la Peña Aranguren.
  - **Departamento:** Máquinas y Motores Térmicos.
- 
- **Título del proyecto:** Planta de valorización energética de residuos forestales mediante ciclo Rankine, para generar energía eléctrica.

- **Resumen:**

En este trabajo, se realiza el diseño de una planta industrial para valorizar energéticamente residuos forestales, aplicando el ciclo Rankine, mediante la producción de electricidad. Para ello, primero se ha realizado un análisis de las alternativas de valorización posibles seleccionando la más adecuada. En segundo lugar, se describe el ciclo y los equipos principales que lo componen. En tercer lugar, se ha realizado el dimensionamiento de estos equipos con ayuda de unos cálculos termodinámicos realizados con el programa EES. Y en cuarto lugar, se aborda la problemática de las emisiones de la combustión.

Después, se realiza un análisis económico con el fin de hacer una estimación de la inversión necesaria a realizar en una planta de este tipo.

Por último, se presenta una planificación, ordenada cronológicamente, detallando los pasos que se deben seguir para llevar a cabo esta instalación.

- **Palabras clave:** planta, valorización, biomasa, forestal, electricidad.

- **Title of the project:** energy recovery plant for forest residues through the Rankine cycle, to generate electricity.

- **Abstract:**

In this work, the design of an industrial plant is made to valorise forest residues energetically. Applying the Rankine cycle by producing electricity. For this, first an analysis has been made of the possible alternatives of valorisation selecting the most suitable one. Second, the cycle and the main equipment that make it up are described. In the third place, the dimensioning of these has been made with the help of thermodynamic calculations made with the EES program. And in fourth place, the problem of combustion emissions it's studied.

Then, an economic analysis is made in order to estimate the necessary investment in a plant of this type.

Lastly, a planification is presented, cronologically ordered, to detailing the steps that must be to carry out this installation.

- **Keywords:** plant, valorization, biomass, forestry, electricity.

- **Proiektuaren izenburua:** Baso-hondakinen energia balorizatzeko planta Rankine zikloaren erabilera elektrizitatea sortzeko.

- **Laburpena:**

Lan honetan, industria-lantegi baten diseinua egiten da baso-hondakinak balorizatzeko, elektrizitatearen ekoizpenaren bidez Rankine zikloa aplikatuz. Horretarako, lehendabizi dauden aukerak aztertu dira egokiena aukeratuz. Bigarrenik, zikloa eta bere ekipamendu nagusiak deskribatzen dira. Hirugarrenik, ekipo horien dimentsioak EES programarekin egindako kalkulu termodinamikoak laguntzaz. Jarraian, erregai isuriaren arazoak aztertzen dira..

Ondoren, azterketa ekonomikoa egiten da, mota honetako planta batean egin beharreko beharrezko inbertsioa kalkulatzeko.

Azkenik, planifikazio kronologikoa aurkezten da, instalazio hau burutzeko jarraitu beharreko urratsak zehaztuz.

- **Gako-hitzak:** planta, balorizazioa, biomasa, basogintza, elektrizitatea.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	8
2.	ANTECEDENTES.....	10
3.	ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN .....	12
3.1.	COMPOSTAJE.....	12
3.2.	GASIFICACIÓN.....	14
3.3.	COMBUSTIÓN .....	18
4.	ALTERNATIVA SELECCIONADA .....	20
5.	GESTIÓN DE LA BIOMASA .....	21
5.1.	PREPARACIÓN DE LA BIOMASA .....	21
5.2.	TRANSPORTE A LA PLANTA.....	22
5.3.	ALMACENAMIENTO EN PLANTA .....	22
6.	DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA. EQUIPOS PRINCIPALES.....	24
6.1.	CALDERA .....	26
6.2.	DESGASIFICADOR.....	32
6.3.	TURBOALTERNADOR .....	33
6.4.	CONDENSADOR .....	37
6.5.	SCADA.....	39
7.	DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA .....	41
7.1.	ESTADOS CARACTERÍSTICOS. VARIABLES TERMODINÁMICAS.....	41
7.2.	BALANCES DE MASA Y ENERGÍA .....	43
7.3.	DIMENSIONAMIENTO DEL ALMACÉN GENERAL .....	48
7.4.	RESULTADOS.....	50
8.	CONTROL DE EMISIONES EN LOS EQUIPOS DE COMBUSTIÓN .....	51
9.	DESCRIPCIÓN DE TAREAS. DIAGRAMA DE GANTT .....	54
9.1.	PAQUETES DE TRABAJO. TAREAS.....	54
9.2.	RESUMEN PLANIFICACIÓN .....	55
10.	ESTUDIO ECONÓMICO .....	56
11.	CONCLUSIONES.....	58
12.	FUENTES DE INFORMACIÓN .....	59
13.	ANEXOS .....	60

<b>13.1.</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>60</b>
<b>13.2.</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>63</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Tipos de reactores para el proceso de gasificación .....	15
Ilustración 2. Tipos de biomasa forestal .....	17
Ilustración 3. Extracción y triturado .....	21
Ilustración 4. Camión de transporte de biomasa .....	22
Ilustración 5. Almacén general.....	22
Ilustración 6. Almacén de suelo móvil .....	23
Ilustración 7. Ciclo Rankine .....	25
Ilustración 8. Esquema de una caldera de combustibles sólidos .....	27
Ilustración 9. Detalle del sistema de alimentación de la caldera. ST: Sensor de temperatura .....	28
Ilustración 10. Silo y sistema de seguridad del sistema de alimentación de la caldera.....	28
Ilustración 11. Turboalternador SST-100 Siemens .....	33
Ilustración 12. Esquema básico del grupo turbina-alternador .....	34
Ilustración 13. Esquema básico de una turbina .....	35
Ilustración 14. Corte transversal de un generador trifásico de dos polos (N o norte, S o sur) .....	35
Ilustración 15. Esquema básico de un generador síncrono .....	36
Ilustración 16. Rotor o inductor de un generador de gran potencia .....	36
Ilustración 17. Estator de alternador o inducido.....	37
Ilustración 18. Esquema de un condensador real .....	37
Ilustración 19. Esquema básico de un condensador .....	38
Ilustración 20. Esquema básico de una torre de refrigeración.....	39
Ilustración 21. Desgasificador .....	44
Ilustración 22. Turbina con extracción de vapor .....	46
Ilustración 23. Filtro de mangas FIVEPULSE. Planta de biomasa de Villanueva de Algaidas (Málaga).....	53
Ilustración 24. Diagrama T-s del Ciclo Rankine .....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables termodinámicas de los estados característicos .....	43
Tabla 2. Datos de partida .....	49
Tabla 3. Resultados de los balances .....	50
Tabla 4. Presupuesto .....	57
Tabla 5. Diagrama de Gantt .....	63

## 1. INTRODUCCIÓN

Se podría describir la biomasa como la materia orgánica no fosilizada, ya sea originada en un proceso biológico espontáneo o provocado.

Se trata, además, de un combustible 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.

Dentro de la biomasa, existen muchos tipos de residuos. Se analizan los residuos procedentes de los bosques o forestales.

El País Vasco se trata de un territorio forestal, dado que según el último Inventario Forestal del País Vasco (2011), las masas arboladas ocupan el 55% de la superficie geográfica vasca (491.500 de las 722.400 ha totales). Es un porcentaje relativamente alto, comparable al de otros países europeos de gran tradición forestal (Finlandia 68 %, Suecia 66 % o Eslovenia 63 %) y superior a la media de la Unión Europea (40 %).

Los bosques naturales suponen cerca del 47 % de la superficie arbolada, siendo el haya, con unas 54.000 ha, la especie natural de mayor extensión. Entre las especies de plantación, el pino radiata es la especie más frecuente, ya que se extiende por 132.000 ha.

Mediante herramientas de última generación tales como los SIG (sistemas de información geográfica), el GPS, los dendrómetros y otros aparatos de medida sónicos, las fotos de satélite, el láser 3D y la tecnología LIDAR (detección por imágenes láser y distancia) se calculan unas existencias totales en nuestros bosques de 62.600.000 m<sup>3</sup> con un crecimiento anual de 3.500.000 m<sup>3</sup>/año de los que se da aprovechamiento anual a 1.200.000 m<sup>3</sup>/año quedando en nuestros montes un incremento neto anual 2.300.000 m<sup>3</sup>/año. Por lo tanto, Euskadi es la comunidad autónoma con mayor densidad de existencias maderables con una media superior a los 160 m<sup>3</sup> por hectárea. Sin embargo, en ella no existe un total aprovechamiento de los recursos forestales que se dispone y existe un gran potencial de esta biomasa. Este mal aprovechamiento es debido a que existen diversas dificultades técnicas en su extracción, manipulación y transporte, así como insuficiente información sobre la cantidad y calidad de estos residuos.

Debido a esto último y a su posibilidad de uso para la generación eléctrica y de calor, este proyecto tiene como objetivo el estudio de la valorización energética de los residuos forestales. Se analiza con detenimiento el residuo escogido, el porqué de su elección, sus procesos de obtención y su valor energético para generar electricidad, para lo cual se propone una planta capaz de generar potencia eléctrica a partir de este tipo de biomasa. Para ello será necesario un dimensionamiento de la planta, los cálculos energéticos, la

gestión y el tratamiento del residuo. Para finalizar, se presenta un estudio económico del proyecto para estudiar su viabilidad.

## 2. ANTECEDENTES

La biomasa forestal como fuente de energía da respuesta a cuatro demandas ambientales directamente relacionadas con las prioridades actuales de la sociedad: cumplimiento de los objetivos ambientales fijados internacionalmente, captura masiva de emisiones de CO<sub>2</sub>, reducción de incendios en nuestros montes, su reforestación, y la reutilización de residuos forestales, agrícolas e industriales.

El desarrollo de la energía con biomasa en España permitiría el cumplimiento de los objetivos ambientales exigidos en los acuerdos internacionales para la reducción de los gases efecto invernadero (GEI):

- En referencia al Protocolo de Kyoto, el objetivo de la UE era la reducción de emisiones de GEI en un 8 % entre 1990 y 2012, mientras que el objetivo de España es que las emisiones de CO<sub>2</sub> se incrementasen solo un 15% respecto a 1990. La generación con biomasa supondría un ahorro de 12 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> si se aprovecha todo su potencial de generación en España, frente a los 5 millones de toneladas de los objetivos marcados por el Plan Español de Energías Renovables de 2005 a 2010.
- En referencia al Plan 2020, el objetivo de la UE es que el 20 % del consumo final de energía bruta proceda de fuentes renovables. El objetivo para España es el mismo; en nuestro país la biomasa podría atender una parte significativa del objetivo de la Directiva para España: el 19 % si se aprovecha el 100 % de su potencial para generación eléctrica y hasta el 70 % si se aprovecha el potencial para generación térmica.

En cuanto a la captura masiva de emisiones de CO<sub>2</sub>, la biomasa presenta un balance positivo en este aspecto. Las plantaciones de cultivos forestales actúan como sumideros masivos de CO<sub>2</sub>, ya que, al contrario que los seres humanos, los árboles inhalan dióxido de carbono y expulsan oxígeno. Esto último provoca que el CO<sub>2</sub> emitido en la generación de energía sea menor que el captado de la atmósfera previamente por los cultivos forestales. Además, el proceso de captura de CO<sub>2</sub> es especialmente eficiente en cultivos forestales energéticos. Por otra parte, el ciclo completo de emisiones de CO<sub>2</sub> en la construcción y operación de una planta de biomasa es más favorable que el de otras energías renovables. Por último, destacar que con el desarrollo de la energía con biomasa en España podría ahorrarse hasta 12 millones de toneladas de dióxido de carbono.

La gestión forestal sostenible, específicamente la relacionada con la recogida y limpieza de la biomasa que se acumula en los bosques, proporciona tres ventajas de gran valor ambiental:

- Reducción del peligro de incendios en un 70 %. Con estas medidas se limpiaría el manto seco de hojas (producido especialmente en otoño) acumulado en la parte inferior de los árboles, el cual prende con mucha facilidad. Estas operaciones suponen un coste económico periódico, que podrían ser compensados si el destino de los restos resultantes fuera en un 100 % a uso energético. En la actualidad esta inversión en las operaciones de limpieza no es realizada por propietarios privados. En cierto modo, la obtención de biomasa energética podría incentivar la realización de estas operaciones.
- Mejor utilización de los espacios. Al cabo de cinco años de plantación, se reduce la densidad dejando aproximadamente 200 árboles por hectárea. Los criterios de selección se basan en la calidad, la vitalidad (existencia de una copa con suficiente follaje) y estabilidad. De acuerdo con estos criterios se talan los árboles menos apropiados de forma que la distancia mínima entre árboles sea superior a 3 metros.
- Apoyo a la regeneración natural de la masa principal con un menor riesgo de plagas forestales y mejora de la calidad del arbolado.

Asimismo, y respecto al tratamiento de residuos forestales, industriales, agrícolas, agropecuarios y agroindustriales, el aprovechamiento de la biomasa repercute en:

- Reducción de vertidos y quemas incontroladas de residuos agrícolas.
- Cierre de la cadena monte-industria, eliminando residuos por falta de mercado o carencia de tecnología, lo que resuelve los problemas de acumulación y eliminación.
- Menor riesgo de contaminación.
- Reducción de la contaminación visual.
- Aprovechamiento de residuos tras su transformación en el proceso de producción energética.
- Reducción de costes de tratamiento industrial.
- Puesta en valor del bosque.

### 3. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS DE VALORIZACIÓN

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 adición de valor. Existen diversos procesos de transformación de la biomasa en energía, pero nos centraremos únicamente en un proceso biológico como es el compostaje y en dos procesos termoquímicos como son la gasificación y la combustión. Tanto el proceso biológico como el termoquímico son transformaciones químicas de la biomasa, a diferencia de que el biológico lo realizan los seres vivos de forma natural mientras que en el termoquímico se somete la biomasa a una alta temperatura (300 – 1500 °C).

#### 3.1. COMPOSTAJE

El compostaje se define como un proceso de descomposición de la materia orgánica o biomasa mediante la utilización de oxígeno o aire. Con este método se consigue transformar la biomasa, mediante microorganismos que actúan sobre la sustancia gracias a un proceso de fermentación, y obtener un producto inocuo y con buenas propiedades como fertilizante que recibe el nombre de compost.

Este proceso se llevará a cabo por medio de pilas o montones, el cual es el método más conocido entre de los sistemas disponibles para compostar la materia orgánica y es ideal para grandes volúmenes.

Antes de realizar todo el proceso y para conseguir una correcta fermentación y descomposición se debe realizar previamente el troceado y triturado de los residuos forestales obtenidos. El tamaño ideal de partículas sería entre 2 y 5 cm. de diámetro aproximadamente. La proporción de los residuos debe estar equilibrada entre materiales finos y gruesos para que exista una adecuada aireación.

La excesiva presencia en el compost de materiales gruesos puede inhibir, ralentizar y retrasar el proceso fermentativo.

El proceso consiste en realizar montones de 1 m<sup>3</sup> de volumen para poder alcanzar temperaturas de 70 °C en el interior de la pila, para higienizar el compost.

Las fases que comprende este método son: la acumulación de restos en montones, la realización de la pila por capas, y finalmente, su cubrimiento con plástico.

Se debe realizar un control del compostaje vigilando que a los pocos días (2 - 4 días) la

temperatura alcance los 65 – 70 °C y que no baje de 35 °C, evitando temperaturas superiores a 70°C para que no se quemee el compost.

Se debe controlar la humedad del compost. Los microorganismos requieren niveles de humedad óptimos para su desarrollo y actividad. Debe ser del 40 – 60 %. Si el montón se encuentra seco y muy húmedo el compostaje fracasará.

Así mismo, debe mantenerse un equilibrio entre carbono y nitrógeno. La proporción óptima es, aproximadamente, de veinticinco y treinta partes de carbono por una de nitrógeno.

Los microorganismos que intervienen en los procesos de fermentación aerobia y en el compostaje de la materia orgánica se desarrollan en un medio ligeramente ácido, neutro e incluso ligeramente alcalino (pH entre 6 y 8, suele ser 7,5). Si el pH es menor que 6(mayor acidez), se ralentizará la actividad. El descenso del nivel de pH se debe a la falta de oxígeno, las putrefacciones y las fermentaciones anaerobias.

Por último, se expondrán las ventajas e inconvenientes de esta alternativa:

#### **Ventajas:**

- Se consigue la transformación de basura regular en un fertilizante ideal para un jardín, plantación u otro espacio.
- Se consigue la reducción de la cantidad de residuos (menos bolsas de basura a utilizar) y de posibles impactos negativos sobre el medio ambiente (contaminación).
- Se trata de un producto comerciable.
- Se trata de la alternativa más económica dado que no requiere máquinas de gran inversión.

#### **Desventajas:**

- Dificultad de producir la cantidad justa y necesaria para su posterior utilización.
- Su aplicación. El compostaje sirve para obtener un abono o fertilizante, pero para este proyecto lo que se necesita es un producto con el que obtener energía eléctrica.
- Dificultad de evitar y controlar los malos olores del material orgánico.
- Necesidad de un clima óptimo para el proceso del compost ya que, si nos encontramos en un lugar frío, el proceso se alargará ya que pueden aparecer problemas de encharcamiento y anaerobiosis.
- Se necesitan grandes terrenos para almacenar los materiales de partida, compost en proceso de maduración, productos ya finalizados, etc.

### 3.2. 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:

- Lecho móvil: 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.
- 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 del tipo de tecnología empleado, en sus variantes, son:

- La biomasa pasa por una primera etapa de calentamiento hasta los 100 °C, que provoca que 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 alcance una temperatura aproximada de 200°C.
- La segunda etapa, que también absorbe calor, es la pirolisis (ruptura por calor). Es un proceso de descomposición térmica, que ocurre entre 300 y 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, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO e hidrocarburos. Se obtiene un gas muy sucio.

- La tercera etapa es la oxidación de la fracción más pesada de la biomasa (carbonosa) al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, o vapor de agua). Esta etapa 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 combustión (como el CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>O) son requeridos en esta etapa. La reducción es la más compleja de todas las etapas, envuelve reacciones químicas entre HC, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>, así como los gases desprendidos. De todas estas reacciones, las de gasificación del residuo carbonoso producido son las más importantes. Tras esta etapa, se obtiene por un lado cenizas y por el otro el gas producto o “syngas”, del cual se ha hablado anteriormente, pero que sigue conteniendo alquitranes.

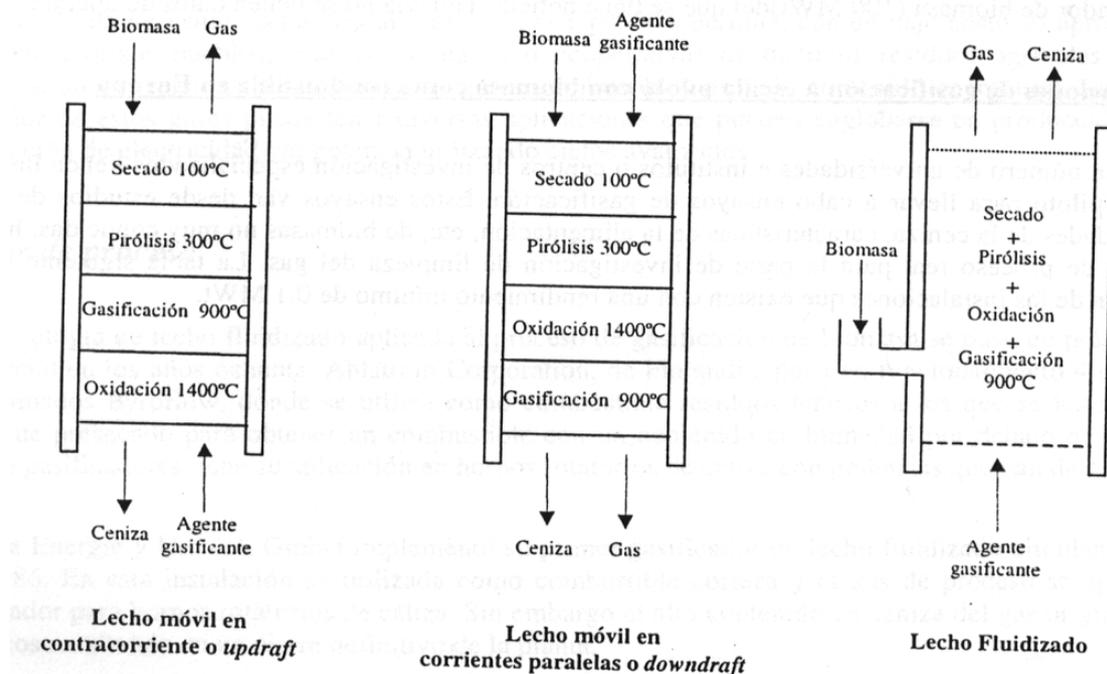


Ilustración 1. Tipos de reactores para el proceso de gasificación

La presencia de alquitranes o impurezas en el syngas provoca que disminuya el rendimiento de los aparatos de termoconversión y, por tanto, se realizará una limpieza de éste por medio de 4 aparatos:

- **Ciclones:** se encargan de eliminar las partículas más grandes por centrifugación.

- **Filtros cerámicos:** se encargan de eliminar las partículas más grandes por filtración.
- **Torre de lavado de gases:** envía agua fina sobre el gas sucio a contracorriente, introducido a la torre y por pesar más el agua se junta con el alquitrán y desciende. El gas obtenido nuevo no tiene alquitrán, pero sin embargo tiene mucha humedad y por lo tanto se perdería poder calorífico.
- **Frigorífico:** se usa en este proceso para conseguir eliminar la humedad del syngas. En él existe un secador, en el cual aplicando frío se seca el syngas.

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.
- 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 del H<sub>2</sub> pero disminuye la eficiencia térmica.
- La temperatura a la que se llevan a cabo las reacciones.
- La relación entre el agente gasificante y la biomasa.
- El tamaño y la densidad de la biomasa. Existe una limitación de densidad mínima de 200 a 250 kg/m<sup>3</sup>. Densidades menores generan problemas en el manejo de la biomasa y su gasificación.
- El tipo de tecnología utilizada.

A continuación, se expondrá una tabla con los diferentes tipos de biomasa forestal, con sus calores específicos y sus porcentajes de humedad correspondientes:

BIOMASA	HUMEDAD (%)	PCI (kcal/kg)
Corteza verde	28	2.000
Corteza resinosa	25	4.000
Corteza eucaliptus	50	2.000
Madera blanca verde	37	2.500
Madera blanca oreada	15	3.700
Madera dura	8	4.500
Viruta verde	35	2.500
Viruta seca	14	3.500
Polvo de madera	10	4.000
Polvo aglomerado	6	4.200
Serrín seco	10	3.500
Serrín húmedo	35	3.000

**Ilustración 2. Tipos de biomasa forestal**

Se puede comprobar en esta tabla que a mayor porcentaje de humedad menor PCI y viceversa. Esto indica que se debe elegir aquel tipo que tenga la mejor relación entre la calidad y el precio y que, además, sea apto para el proceso de gasificación (serían descartados aquellos cuya humedad sea superior al 15%).

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 22% mediante el uso de un ciclo Rankine convencional simple.

A modo de conclusión de esta alternativa, se exponen sus ventajas y desventajas:

#### **Ventajas:**

- Versatilidad: posibilidad de obtener la energía en el momento que ésta se requiera.
- Aceptable eficiencia en la producción eléctrica (12 – 30 %).
- Aceptable eficiencia térmica (60 – 85 %).
- Poco impacto ambiental: se genera menor impacto ambiental cuando se realiza la combustión de un gas que de biomasa sólida.
- Disminución del impacto por la reducción de gases de efecto invernadero, cuando lo que se gasifica es biomasa y no carbón u otro combustible de origen fósil.

#### **Desventajas:**

- Se requieren plantas industriales con altos costes de inversión.
- Se necesita un aprovisionamiento de biomasa muy homogénea.

### 3.3. COMBUSTIÓN

La tercera y última de las alternativas de valorización se basa en la combustión directa de la astilla en una caldera y el aprovechamiento del calor desprendido de su quema para evaporar agua o aceite (fluido caloportador) y ,posteriormente, hacer pasar dicho vapor por una turbina y , mediante la conexión a un alternador, obtener energía eléctrica 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 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 es un proceso exotérmico que transcurre con la liberación de energía en forma de calor.

Los productos principales resultantes de dicha combustión son:

- Gaseosos: el dióxido de carbono, agua (en forma de vapor a la salida del equipo de combustión), además de pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno y de azufre. Éstos constituyen las emisiones gaseosas del proceso, que se deben minimizar con el fin de disminuir el impacto ambiental generado.
- Sólidos: sales minerales contenidas en la biomasa empleada como combustible, así como 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 estos inquemados, en muy pequeñas cantidades, constituyen las cenizas del proceso que, bajo determinadas condiciones y previamente tratadas en un laboratorio, pueden ser aprovechadas como fertilizantes, como ocurre en las plantaciones forestales, ya que permiten retornar los nutrientes extraídos con la biomasa y ser un medio para retener más carbono permitiendo la respiración y crecimiento de los árboles.

Para concluir, se nombran las ventajas y desventajas del proceso de la combustión:

#### Ventajas:

- Mayor control en el proceso que en la gasificación en cuanto a la generación de calor y continuidad se refiere. Esto es debido a que existen menores factores que alteren su normal funcionamiento.
- No se generan alquitranes, como ocurre en la gasificación, necesitando así una menor cantidad de equipos.

- Tecnología muy avanzada y preparada en la producción de energía eléctrica.
- Mayores rendimientos eléctricos que en la gasificación (30 % aproximadamente).

**Desventajas:**

- Genera gases de efecto invernadero, especialmente el vapor de agua y el dióxido de carbono, y lluvia ácida, facilitada por los óxidos de azufre y nitrógeno principalmente.
- Requiere grandes inversiones a la hora de construir la planta, al igual que en la gasificación y contrario al compostaje.
- De las tres alternativas expuestas, es el proceso que mayor contaminación e impacto al medio ambiente genera. Debido a esto, las plantas que utilizan esta alternativa tienen controles muy estrictos por parte de las administraciones públicas. Para ello, se ha establecido una normativa que fija los límites de las emisiones.

#### 4. ALTERNATIVA SELECCIONADA

Como se ha visto anteriormente, el compostaje es de mucha utilidad para fertilizar las tierras, de ahí que se use por los agricultores, pero el objetivo de este proyecto no es fertilizar unos cultivos si no la producción eléctrica, por lo tanto, se descarta esta alternativa.

La gasificación se lleva a 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 variará según la tecnología utilizada para 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.

En cuanto a la combustión directa, como ya se ha indicado, 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. Además, 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%.

En conclusión, la combustión es la alternativa elegida para la valorización de la biomasa forestal. Esta elección se debe a las razones explicadas anteriormente y por ser el proceso que mayor valor energético le aporta al residuo.

A continuación, se presenta el proyecto que va desde la descripción de cómo obtener la materia prima (preparación de la biomasa), su transporte y su almacenamiento. Después, se presenta un posible diseño de la planta y de sus equipos principales. También se ha elaborado un estudio económico en el que se realiza una estimación de la inversión necesaria. Finalmente, se presenta un apartado relativo al control de emisiones de partículas en los equipos de combustión.

## 5. GESTIÓN DE LA BIOMASA

### 5.1. PREPARACIÓN DE LA BIOMASA

Una vez seleccionada la alternativa de valorización, se procede a describir la fase de preparación de la biomasa. En esta fase, se deberá realizar la correspondiente poda y triturado de los árboles. Este proceso se llevará a cabo en plantaciones energéticas destinadas específicamente para la producción de biocombustibles. En éstas se eliminan todos los árboles comerciales, cuya especie será de crecimiento rápido, de una determinada zona en la que no queda una cubierta arbórea significativa. La tala de los árboles se realizará con diámetros pequeños de entre 10 y 15 cm. y al de dos o tres años después de su plantación. Ejemplos de especies de árboles serán: chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias,...

Se utilizarán uno de estos dos sistemas de extracción:

- a) Tala mediante máquina taladradora-apiladora en la cual los árboles son depositados en montones en la zona de corte. Posteriormente, un tractor autocargador recoge los materiales y los agrupa en una zona de acopio donde una astilladora de elevada potencia los astilla. Mediante impulsión neumática las astillas son depositadas en un contenedor de transporte que las conducirá a la fábrica donde serán utilizadas.
- b) Utilización de máquinas con cabezal de corte frontal. Estas máquinas disponen en su parte delantera de un cabezal con cuchillas en la parte inferior que a su vez conducen los materiales hacia un triturador situado en el interior de la máquina. El corte se produce simultáneamente al avance sobre la plantación. Una vez el material se encuentra triturado se impulsa de forma neumática a un contenedor de transporte situado en un tractor que avanza paralelamente. El uso de estos cabezales es apto para diámetros más pequeños que el sistema anterior.



Ilustración 3. Extracción y triturado

## 5.2. TRANSPORTE A LA PLANTA

Finalmente, tras la preparación del residuo forestal, se llevará a cabo el transporte de éste hacia la planta en camiones de alta capacidad.



Ilustración 4. Camión de transporte de biomasa

## 5.3. ALMACENAMIENTO EN PLANTA

Cuando se realiza el transporte de la biomasa ya reducida (astilla) no se mete directamente a la caldera de la planta si no que se almacena.

Existirá un almacén general, en el cual se depositará toda la astilla que no vaya a ser quemada en la caldera y que permitirá disponer de reservas ante las posibles fluctuaciones de suministro. Éste posee grandes dimensiones y deberá dimensionarse en función de la cantidad de astilla recibida del transporte.



Ilustración 5. Almacén general

Además del almacén general, se deberá construir un almacén de menores dimensiones y que se encuentre anexo a la caldera. Éste recibe el nombre de almacén de suelo móvil y se encarga de alimentar la caldera al ritmo que ésta le pide combustible dado que es un proceso automatizado. Consta de un motor hidráulico conectado a una cuña que es introducida dentro de la biomasa, triturada previamente, para que luego al extraerla

arrastre parte de la biomasa al foso donde al final de él le espera la cinta transportadora hacia la caldera.



**Ilustración 6. Almacén de suelo móvil**

## 6. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA. EQUIPOS PRINCIPALES

A continuación, se describe el diseño e implantación de un sistema de generación eléctrica para una planta térmica que transforma la energía calorífica de la astilla en electricidad mediante un ciclo Rankine.

En las centrales térmicas de vapor se utilizan un conjunto de máquinas imprescindibles para su funcionamiento como la turbina de vapor, la caldera, el condensador, las bombas, los generadores eléctricos, etc. Éstas usan como máquinas motrices las turbinas de vapor, que son las encargadas de accionar, gracias a la energía mecánica producida por su eje, los generadores eléctricos y gracias a éstos producir electricidad. Esta electricidad se usa para autoconsumo en el accionamiento de equipos auxiliares, tales como bombas, ventiladores de la caldera, la propia caldera y muchos otros equipos que van a necesitar energía eléctrica para su funcionamiento. El resto se vende con el fin de obtener un determinado rendimiento económico.

En termodinámica, la ley de la conservación de la energía afirma que la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. En nuestro sistema la energía sufre las siguientes transformaciones:

- La energía que contiene la astilla se convierte, gracias a la combustión, en energía calorífica.
- El fluido de trabajo, agua, absorbe la energía calorífica y tras expansionarse en una turbina se transforma en energía mecánica.
- La energía mecánica se transforma en energía eléctrica mediante un generador eléctrico.

El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico ampliamente utilizado en centrales térmicas de vapor 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 se evapora y condensa. El ciclo constará de los siguientes procesos y equipos:

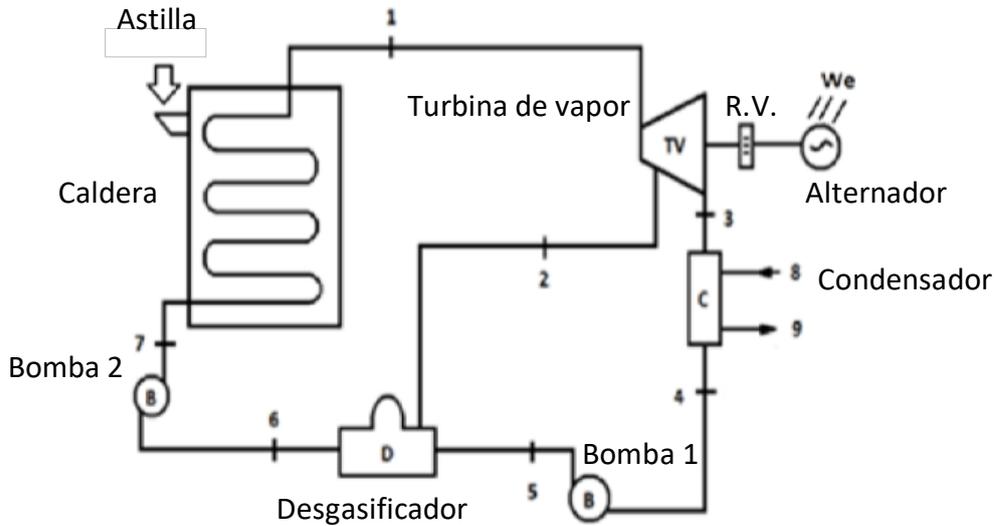


Ilustración 7. Ciclo Rankine

**Proceso 1-3:** Expansión isoentrópica de una parte del vapor del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en una turbina de vapor y se genera potencia en el eje de la misma, que posteriormente se convierte en energía eléctrica mediante un alternador trifásico. Mediante el uso de un reductor de velocidades (R.V.) pasamos de las 7000 rpm del eje de la turbina a las 1000 o 1500 rpm del alternador.

**Proceso 1-2:** La parte del vapor restante se expande hasta la presión del desgasificador. Con esta extracción, se consigue un precalentamiento del agua de alimentación, con lo que se consigue un ahorro de combustible en la caldera.

**Proceso 3-4:** Transmisión de calor a presión constante desde el fluido de trabajo hacia el circuito de refrigeración, de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador (intercambiador de calor), idealmente sin pérdidas de carga.

**Proceso 8-9:** entrada y salida del agua de refrigeración.

**Proceso 4-5:** bombeo del agua extraída del condensador (bomba 1). Aumenta la presión del líquido, de la presión del condensador a la del desgasificador. Este bombeo requiere un consumo de potencia eléctrica.

**Proceso 2-6 y 5-6:** entrada del agua precalentada en la turbina y de la extraída del condensador, hacia el desgasificador.

**Proceso 6-7:** Compresión isoentrópica del fluido de trabajo en fase líquida (bomba 2). Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en la caldera. Aunque es un proceso que consume energía, la compresión de un líquido es mucho más económica energéticamente hablando que la compresión de un gas, razón por la cual se aumenta la presión en el líquido con un equipo mecánico, en vez de hacer aumentar la presión del vapor que sería mucho más costoso.

**Proceso 7-1:** Transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en el serpentín de la caldera. En un primer tramo del proceso, el fluido de trabajo se calienta hasta la temperatura de saturación o ebullición, y luego tiene lugar el cambio de fase líquido-vapor. Este vapor es el utilizado por la turbina para generar la potencia del ciclo (la potencia neta del ciclo se obtiene realmente descontando la consumida por las bombas 1 y 2, aunque esta suele ser despreciable).

## 6.1. CALDERA

En la caldera se produce la combustión de la biomasa y la transferencia del calor hacia el agua para posteriormente turbinarla y generar electricidad mediante un alternador.

Existen calderas para combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. En este proyecto se usará una caldera para combustibles sólidos. En ella el combustible sólido se oxida sobre una estructura metálica o cerámica denominada parrilla. Esta parrilla se encuentra situada dentro de una cámara de combustión u hogar. Además de esto, la parrilla tiene unos huecos o perforaciones de tamaño menor al que inicialmente tienen las partículas del combustible por lo que éste queda ahí retenido. La ignición se produce mediante la aplicación de una energía de activación procedente de una resistencia, chispa o llama. Durante la combustión el combustible sólido pierde masa por volatilización de los gases volátiles, oxidación del carbono fijo y también se fracciona por el efecto térmico. Esto hace que a medida que se forman las cenizas, previamente mencionadas, el tamaño de partícula se vaya reduciendo hasta que caen por los huecos de la parrilla a un recipiente de almacenamiento de cenizas llamado cenicero. El estudio de la variación del tamaño de las partículas durante la combustión permite diseñar los orificios de tal modo que cuando caigan las partículas al cenicero se haya producido prácticamente el 100% de la oxidación de la fracción orgánica. El cenicero debe de limpiarse periódicamente de acuerdo a la cantidad de ceniza producida en la combustión y al tamaño del mismo. Por ello conocer el porcentaje de ceniza de los distintos biocombustibles se hace necesario. La limpieza del cenicero puede ser manual o automática.

Para que se produzca la combustión es necesario aportar aire como comburente, es decir,

portador del oxígeno responsable de la oxidación. Las entradas de aire en las calderas de combustible sólido son generalmente dos, por un lado el aire primario que entra por la parte superior de la parrilla y es el responsable de aportar oxígeno a los gases volatilizados; por otro lado el aire secundario, que entra por debajo de la parrilla en sentido ascendente aportando el oxígeno a la fracción sólida del combustible (carbón fijo).

Los humos generados en la combustión, mencionados anteriormente, junto con el exceso de aire, son calentados por el calor desprendido en la reacción. Los gases calientes se hacen pasar por un intercambiador de calor, donde los humos se enfrían cediendo energía calorífica al caloportador que, como se ha dicho, puede ser agua o aceite. El diseño del circuito de los gases calientes a través del intercambiador de calor suele ser laberíntico para que los cambios de dirección provoquen la caída de la ceniza que pueda ser arrastrada por la corriente. Tras la cesión de energía de los gases al caloportador, los humos enfriados se eliminan por la chimenea de la caldera. Para evitar la emisión de partículas carbonosas a la atmósfera, responsables de humos negros, antes de la emisión de humos pueden colocarse ciclones o sistemas de filtración o absorción de partículas.

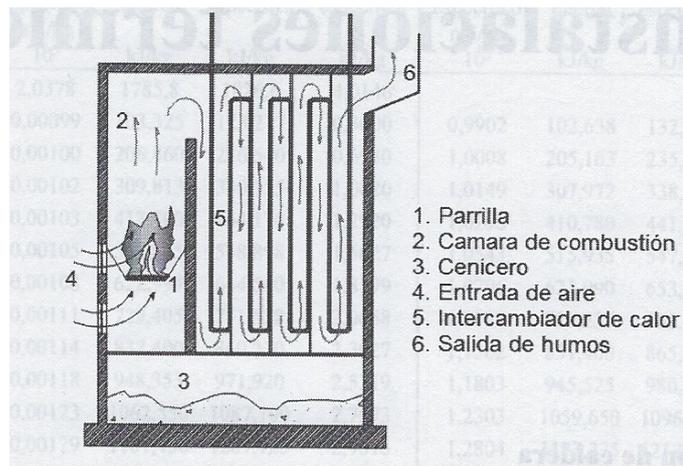
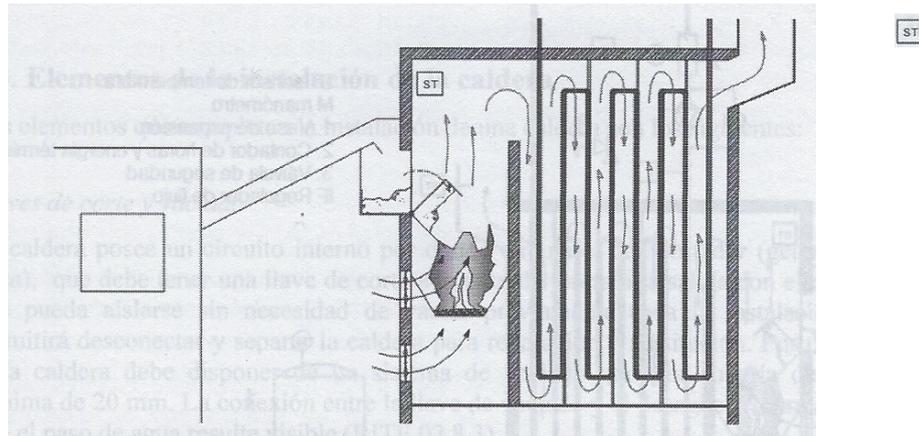


Ilustración 8. Esquema de una caldera de combustibles sólidos

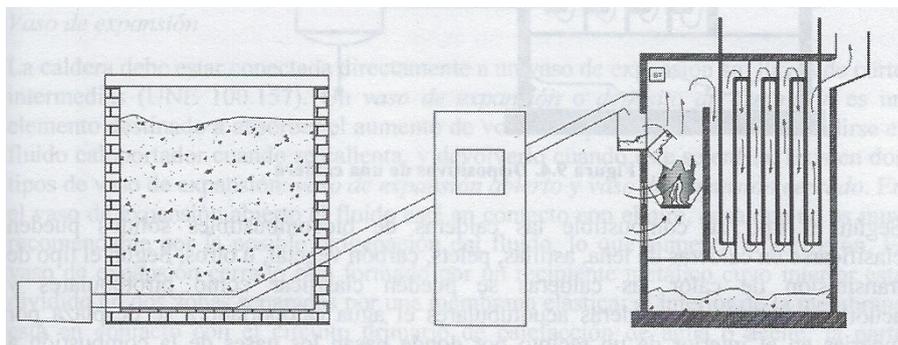
La alimentación de biocombustibles en calderas de sólidos automáticas se realiza por gravedad desde un receptáculo protegido por dos compuertas cortafuegos, una anterior y otra posterior. Estas compuertas evitan la propagación de la llama desde el hogar y el almacén del combustible. Cuando la compuerta en contacto con el hogar está abierta la compuerta con el contacto con el sistema de suministro de combustible se encontrará cerrada, de forma que solo una fracción del material, la existente en el interior del receptáculo, cae sobre la parrilla. Para llenar de nuevo el receptáculo, se cierra la compuerta de contacto con el hogar y se abre la que está en contacto con el sistema de suministro, generalmente un tornillo sinfín. La alimentación se realiza gracias a una cinta

transportadora que conduce la astilla del almacén a la caldera.

Previamente a la compuerta anterior del receptáculo debe existir un sistema de seguridad, de forma que si por accidente la llama alcanzase el sistema de suministro, un volumen de agua o cualquier otro ignífugo inundaría los conductos de alimentación evitando una propagación al almacén o silo de almacenamiento, lo que provocaría un grave peligro en el edificio donde la caldera estuviese instalada.



**Ilustración 9. Detalle del sistema de alimentación de la caldera. ST: Sensor de temperatura**



**Ilustración 10. Silo y sistema de seguridad del sistema de alimentación de la caldera**

La alimentación está regulada por uno o varios sensores de temperatura existentes en el hogar. Cuando sobre la parrilla existen materiales en proceso de combustión, la temperatura de los gases ascendentes es elevada, fruto de las reacciones exotérmicas de oxidación. A medida que la fracción orgánica combustible se va consumiendo, procediendo a la formación de cenizas, la temperatura en el hogar va disminuyendo. Cuando la temperatura en el hogar desciende por debajo de un determinado umbral, se conecta el sistema de alimentación para aportar más combustible sobre la parrilla. Además de los sensores de temperatura que regulan la alimentación, existen otros sensores de seguridad. La temperatura en el hogar no puede superar un determinado límite que ponga en compromiso las propiedades mecánicas de los materiales. Por otra parte, una temperatura elevada en los humos indicaría problemas de transmisión de calor

en el intercambiador hacia el caloportador. Por ello, también existen sensores de temperatura en la salida de humos.

Hay que resaltar la importancia de la caldera, ya que generalmente dentro de la planta es el equipo más caro y el que requiere mayor mantenimiento. A mejor vapor sobrecalentado que sale de ésta, mayor rendimiento del ciclo.

- **Dispositivos de la caldera**

Para completar el funcionamiento de ésta se explicarán los siguientes dispositivos que lo facilitan:

- Llaves de corte y vaciado

La caldera posee un circuito interno por donde circula el fluido caloportador (generalmente agua), que debe tener una llave de corte a la entrada y otra a la salida con el objeto de que pueda aislarse sin necesidad de vaciar previamente toda la instalación. Esto permitirá desconectar y separar la caldera para reparación o sustitución.

Por otro lado, cada caldera debe disponer de un sistema de vaciado con una tubería de sección de 20 milímetros. La conexión entre la llave de vaciado y el desagüe se hará de forma que forma que el paso de agua resulte visible

- Vaso de expansión

La caldera debe estar conectada directamente a un vaso de expansión sin llaves de corte intermedias.

Este elemento sirve para absorber el aumento de volumen que se produce al expandirse el fluido caloportador cuando se calienta, y devolverlo cuando éste se enfría.

Está formado por un recipiente metálico cuyo interior está dividido en dos zonas separadas por una membrana elástica: el interior de la membrana se encuentra en contacto con las tuberías de la caldera, portadoras del fluido caloportador, y la parte externa de la membrana se encuentra en contacto con una zona llena de aire o nitrógeno. Cuando el caloportador se expande, aumentando su volumen, el interior de la membrana se llena con el exceso de volumen estirándose comprimiendo la zona gaseosa. Cuando el caloportador se enfría y se retrae, la sobrepresión del vaso hace que compense la reducción de volumen de fluido caloportador. Es recomendable un vaso de expansión independiente para cada caldera.

- Válvula de seguridad

La caldera debe poseer una válvula de seguridad, cuyo objetivo es evitar que en la caldera se produzcan sobrepresiones que puedan deteriorarla, independientemente de que existan otros elementos de control y seguridad como los termostatos.

- Termostatos

Se clasifican en tres tipos en función de la función que realizan:

- a) Termostatos de funcionamiento: su misión es ajustar la alimentación cuando se alcancen las temperaturas de consigna, de modo que la producción de calor se adecue a las necesidades instantáneas.
- b) Termostatos de seguridad: deben actuar si fallan los de funcionamiento, en cuyo caso la alimentación no se detendría cuando se alcanzan las temperaturas de consigna y continúa aportando material incrementándose el calor a la caldera, pudiéndose alcanzar temperaturas peligrosas para la instalación.
- c) Termostato de humos: controla que no exista una pérdida de calor excesiva por la chimenea, lo que indicaría que no se está transfiriendo calor al caloportador en el intercambiador. Evidentemente, una temperatura excesiva de los humos indica una reducción de rendimiento. Si se supera el umbral de temperatura admitida en humos se corta la alimentación.

- Termómetros

La misión de los mismos es proporcionar datos sobre el estado de funcionamiento de la instalación. Cada caldera dispondrá como mínimo un termómetro en la impulsión de agua, otro en el retorno de agua, y otro en el conducto de humos.

- Contadores de horas y energía térmica

Es obligatorio que las calderas de potencia superior a 100 kW dispongan de un contador para controlar las horas de funcionamiento. Asimismo, para centrales de potencia superior a 1000 kW, es preciso disponer de medición de energía térmica.

- Medidores de caudal y presión

Durante el funcionamiento de la caldera se produce gran cantidad de calor en el interior de la caldera, que debe ser absorbido inicialmente por los gases de la combustión para después transferirlos en el intercambiador al fluido caloportador. En cierto modo, estos elementos funcionan como refrigeradores del sistema. La correcta absorción del calor por

parte del caloportador depende de que por las tuberías del intercambiador circule con un caudal y presión mínimos. Los medidores de caudal y presión se encargan del control de estos parámetros y, en caso de no cumplir con estos mínimos, interrumpir la alimentación del combustible. Por debajo de un determinado límite de caudal y presión la instalación se sobrecalentaría en exceso, lo que podría provocar grandes daños. Antes de que eso ocurra, se debe detener la combustión.

- Sensor de temperatura del fluido de retorno

La circulación de los gases calientes y del caloportador suele ser en contra sentido, es decir, los gases que salen del hogar recién formados entran en el intercambiador por la zona donde está la salida de la tubería del caloportador, mientras que salida de gases se produce por la zona de entrada del caloportador al intercambiador. Esto provoca que si la temperatura de retorno del caloportador a la caldera es demasiado baja se pueden producir en la zona final del recorrido de humos condensaciones de agua evaporada en la combustión, que provocarían deterioros en la caldera. Por lo tanto, este elemento se encarga de controlar esa temperatura del fluido caloportador de retorno a la caldera. La temperatura mínima de retorno debe ser indicada por el fabricante de la caldera.

➤ Problemática de los residuos sólidos de la combustión: cenizas en la caldera

En la combustión de biomasa se generan dos tipos de cenizas:

- Ceniza que se decanta en el fondo o de fondo: comprende la fracción gruesa (0 – 3 cm.) de ceniza producida en la parrilla y en el hogar.
- Ceniza volante: 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 esta ceniza tiene un tamaño inferior a 75 micrómetros. Las partículas de mayor tamaño (> 1 milímetro) proceden del material inquemado.

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 cómo de propenso es el combustible a formar depósitos de escoria. El comportamiento de las cenizas es un fenómeno muy complejo y depende de muchos factores, pero se ha demostrado que el cloro tiene un efecto catalítico que conlleva a la disociación de los materiales de acero de tuberías de los intercambiadores de calor, aun cuando las temperaturas de los tubos son bajas (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).

Los cloruros reaccionan con  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_3$  en los gases para formar sulfatos, provocando la generación de cloro gaseoso, que a su vez puede reaccionar con el oxígeno disponible o directamente con el hierro de los tubos para formar  $\text{FeCl}_2$ . Estos nuevos cloruros pueden reaccionar con el 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 frecuentes 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 disminuir al mínimo el número de paradas de la caldera para operaciones de limpieza y los 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 y control de la temperatura de los gases a lo largo de todo el proceso. El análisis químico elemental de las cenizas ayudará a predeterminar su comportamiento durante el proceso.

## 6.2. DESGASIFICADOR

Es un tanque de alimentación de agua que cumple 4 funciones principales:

- Eliminar los gases disueltos en el agua principalmente el oxígeno, que es altamente corrosivo en los circuitos de vapor. Se efectúa en un desaierador que pone en contacto el condensado con una corriente de vapor aprovechando la solubilidad inversa de los gases, según la cual los gases son menos solubles en agua a altas temperaturas.

- Precalentar el agua de alimentación con una extracción de vapor de la turbina con la finalidad de conseguir un ahorro del consumo de combustible.
- Almacenar agua a alta temperatura para alimentar las bombas de alimentación.
- Proporcionar la presión hidrostática necesaria (NPSH) para evitar el fenómeno de cavitación de las bombas de alimentación de agua a la caldera.

### 6.3. TURBOALTERNADOR

El vapor sobrecalentado generado en la caldera se destina a mover una turbina y generar potencia mediante un alternador síncrono acoplado solidariamente al eje de la turbina. La planta está provista de un turboalternador de vapor SST-100 Siemens de dos carcasas con reductor de velocidades para que el alternador lleve la velocidad de sincronismo, a la misma frecuencia que la red (50 Hz).

Es de un solo cuerpo y está diseñada para soportar elevados gradientes térmicos, lo que permite unos tiempos de arranque cortos y cambios rápidos de carga. El rotor está hecho con discos forjados montados en contracción en el eje de la turbina y enchavetados. Es corto y rígido, con velocidades de operación por debajo de la crítica. Utilizando cojinetes deslizantes para asegurar el funcionamiento suave y bien amortiguado.

Principales características:

- Configuración totalmente compacta
- Arranque rápido sin precalentamiento
- Válvula de parada de emergencia accionada por vapor
- Válvulas de control de doble asiento con actuador hidráulico
- 6 etapas de impulso
- Dos cojinetes de manguito y una almohadilla de empuje
- Extracción y/o alimentación reguladas por presión



Ilustración 11. Turboalternador SST-100 Siemens

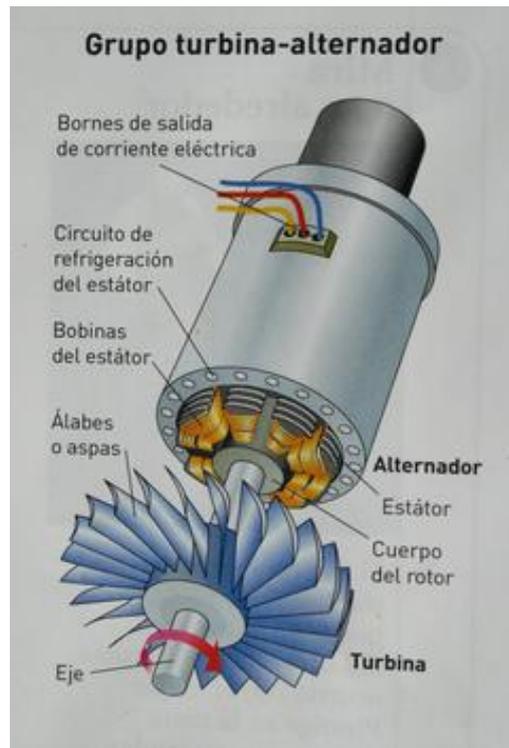


Ilustración 12. Esquema básico del grupo turbina-alternador

A la hora de analizarlos individualmente, se describirán los dos elementos así como su funcionamiento:

- La turbina de vapor, es una turbomáquina motora que transforma la energía de un flujo de vapor en energía mecánica a través de un intercambio de cantidad de movimiento entre el fluido de trabajo (entiéndase el vapor sobrecalentado procedente de la caldera) y el rodete, órgano principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes los cuales tienen una forma particular para poder realizar el intercambio energético. Esta energía mecánica es la que se utiliza para girar un alternador eléctrico y, con ello, generar energía eléctrica. En términos energéticos, lo que provoca la turbina es un salto o aumento entálpico, empleando una expansión o disminución de la presión, que es directamente proporcional al trabajo neto de la turbina y a su vez con el trabajo eléctrico generado (a mayor salto, mayor trabajo).

El funcionamiento básico de una turbina se basa en conducir el vapor sobrecalentado procedente de la caldera hacia unos tubos denominados toberas. El vapor introducido golpea los álabes o paletas, organizados en filas o carretes, y hacen girar el eje de la turbina o rotor.

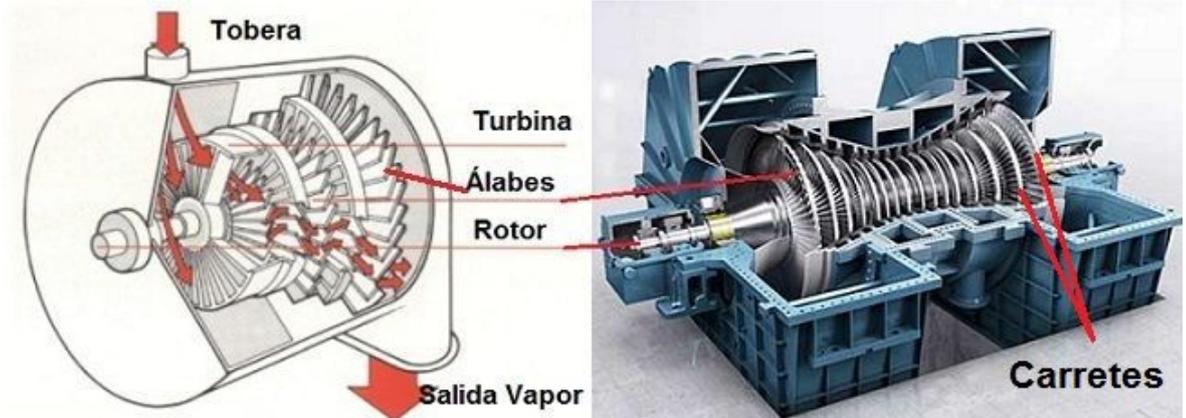


Ilustración 13. Esquema básico de una turbina

- El generador o alternador, el cual será de tipo síncrono, es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. Su velocidad de rotación se mantiene constante y tiene un vínculo rígido con la frecuencia  $f$  de la red. Su relación fundamental es:

$$n = \frac{60 * f}{p}$$

Donde  $n$  representa la velocidad en R.P.M. y  $p$  el número de pares de polos.

Entre los diferentes tipos de generadores síncronos existen los de tipo trifásico, que son los más comunes a la hora de generar energía eléctrica para uso industrial.

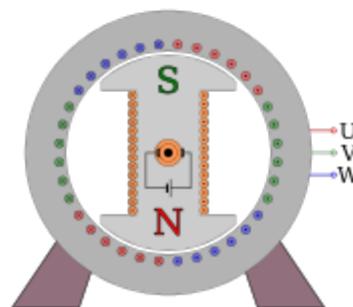


Ilustración 14. Corte transversal de un generador trifásico de dos polos (N o norte, S o sur)

En cuanto a su funcionamiento, el generador síncrono está compuesto principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator.

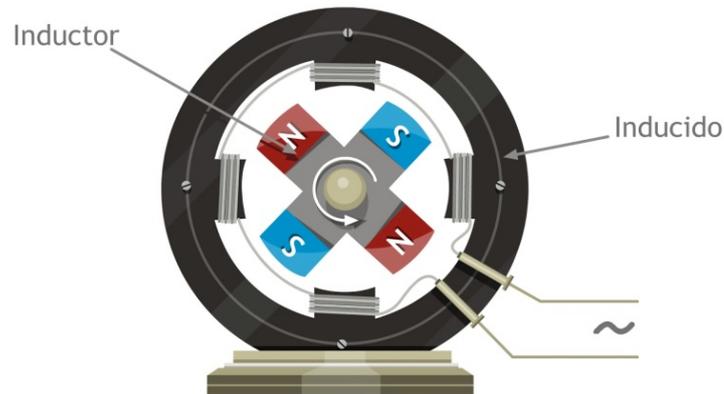


Ilustración 15. Esquema básico de un generador síncrono

El rotor o inductor consiste en un dispositivo interior giratorio conformado por un núcleo magnético y un conductor dispuesto en forma de espiras. A éste se le suministra una corriente continua para su excitación, la que genera un campo magnético (ley de Faraday).

De acuerdo al Teorema de Ferraris, al hacer girar el rotor mediante un evento externo, en este caso el giro del eje de la turbina de vapor, se induce en el estator o inducido un campo magnético giratorio. Este campo, induce en los devanados del estator una fuerza electromotriz (F.E.M.) alterna senoidal, que es la que se aprovecha para la energía eléctrica.



Ilustración 16. Rotor o inductor de un generador de gran potencia



Ilustración 17. Estator de alternador o inducido

#### 6.4. CONDENSADOR

Un condensador es un intercambiador térmico, en cual se pretende que el fluido que lo recorre, en este caso el vapor extraído de la turbina, cambie a fase líquida desde su fase gaseosa mediante el intercambio de calor (cesión de calor al exterior, que se pierde sin posibilidad de aprovechamiento) con otro medio.

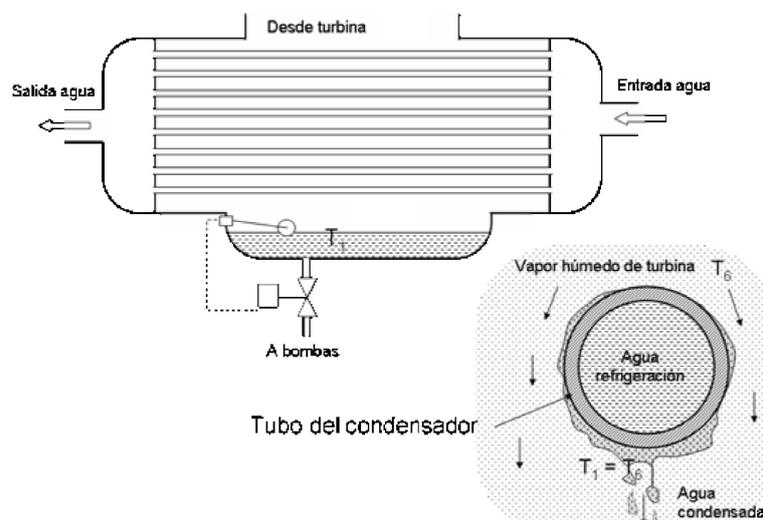
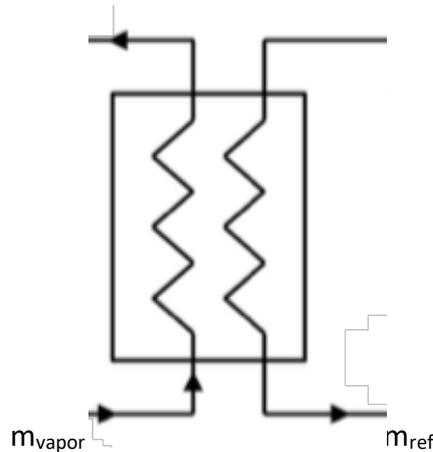


Ilustración 18. Esquema de un condensador real

La condensación se puede producir bien utilizando aire mediante el uso de un ventilador (aerocondensadores) o con agua (esta última suele ser en circuito semicerrado con torre de refrigeración, o en circuito abierto proveniente de un río o del mar). El tipo de condensador más empleado en centrales termoeléctricas es el que utiliza agua como fluido refrigerante, que además utiliza un circuito semiabierto de refrigeración con una torre evaporativa como sumidero del calor latente de vaporización.

Los aerocondensadores se utilizan cuando no se dispone de agua suficiente para alimentar una torre evaporativa. Aunque son más caros y provocan en el ciclo agua-vapor una pérdida de rendimiento, se utilizan cuando no existe otra posibilidad para condensar el vapor.

Como disponemos de agua suficiente, son más baratos y ofrecen un mayor rendimiento, se utilizará en este proyecto un condensador de fluido refrigerante agua por medio de una torre de refrigeración.



**Ilustración 19. Esquema básico de un condensador**

Siendo:

$m_{\text{vapor}}$ : flujo másico de vapor extraído de la turbina.

$m_{\text{ref}}$ : flujo másico de fluido refrigerante (en este caso agua).

El funcionamiento básico del condensador es el siguiente: como se aprecia en el esquema, el vapor extraído de la turbina ( $m_{\text{vapor}}$ ) a la presión constante del condensador y sale en forma de líquido saturado gracias a la introducción del fluido refrigerante ( $m_{\text{ref}}$ ), también a la presión del condensador. El cambio de estado se produce debido a la cesión de calor del vapor de la turbina al fluido refrigerante.

En cuanto a las torres de refrigeración, se utilizan para suministrar el agua fría que circula hacia el condensador ( $m_{\text{ref}}$ ) y permite la condensación del vapor de la turbina ( $m_{\text{vapor}}$ ). En algunas centrales termoeléctricas, se emplea agua de algún mar, río o lago cercano con el fin de construir esta torre y ahorrar en cuanto a gastos económicos se refiere. Pero generalmente existen limitaciones ambientales para la temperatura a la que se puede devolver el agua al entorno, por este motivo en este proyecto se ha optado por una torre de refrigeración.

El funcionamiento básico de una torre de refrigeración es el siguiente: el agua procedente del condensador entra en 1 y se pulveriza. El aire, a contracorriente, entra en 3 mezclándose con el agua pulverizada y formando aire húmedo. Una pequeña fracción del agua se evapora en el aire húmedo, que sale en 4 con una mayor humedad que la que

tenía al entrar en 3, con ayuda de un ventilador. La energía necesaria para la evaporación procede principalmente del agua que no se evapora, con el resultado de que el agua que sale en 2 se encuentra a menor temperatura que en 1. Puesto que parte del agua entrante se evapora, una cantidad equivalente de agua de reposición se añade en 5 de manera que el caudal de agua que retorna es el mismo que el del agua caliente que entra en 1.

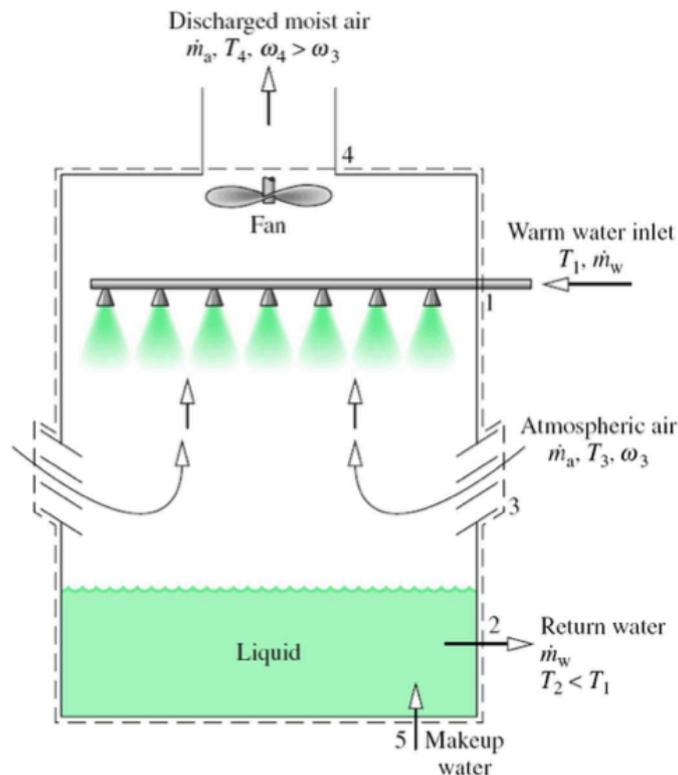


Ilustración 20. Esquema básico de una torre de refrigeración

## 6.5. SCADA

El sistema SCADA (Sistemas de Control y Adquisición de Datos) permite la operación y supervisión en tiempo real de la planta.

Las operaciones modernas de fabricación deben ser escalables y flexibles para que puedan hacer frente a los requisitos en constante cambio. Normalmente, la producción comienza con un rendimiento modesto y se espera que aumente a medida que crezca la demanda del mercado. La arquitectura SCADA por lo tanto, debe ser modular, y adaptarse a las necesidades del momento.

Se pueden integrar elementos externos como el almacén y cualquier otro dispositivo/instalación susceptible de ser controlada.

Las principales funciones que cubre este sistema son: la operación remota, la monitorización y el archivo de datos de funcionamiento.

En este sentido, un sistema SCADA debe permitir realizar acciones de forma remota desde el ordenador como introducir el aire primario en la caldera (con o sin precalentamiento), gases de combustión, o una mezcla de ambos. También debe permitir introducir el combustible (biomasa).

La monitorización incluye medir las temperaturas en la cámara de combustión, mediante la lectura de termopares constituidos por varillas de diferente longitud y diámetro. Además de medir estas temperaturas hay otras señales de diferente naturaleza como presiones, caudales y/o medidas del analizador de gases.

Para el registro o archivo de datos, se puede emplear una hoja de cálculo estándar, como almacén de datos para su posterior tratamiento, pudiendo establecerse los intervalos de tiempo de registro y cada cuantas medidas se ha de hacer una grabación del archivo en el que se están escribiendo los datos. El uso de una hoja de cálculo de amplia difusión facilita el tratamiento posterior de datos y su representación.



**Ilustración 21. Imagen real de un SCADA para visualización y control de proceso de una planta de biomasa en kolin (República Checa).**

## 7. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA

Se va a proceder a calcular las variables termodinámicas de los puntos característicos de la planta, objeto en el estudio, al igual que los balances de masa y energía de los equipos principales. Para la resolución se empleará el programa Engineering Equation Solver (EES). Se adjunta en el Anexo las ecuaciones utilizadas en el EES para la resolución de este apartado al igual que un diagrama T-s con las temperaturas y presiones de cada estado.

### 7.1. ESTADOS CARACTERÍSTICOS. VARIABLES TERMODINÁMICAS

En el ciclo Rankine diferenciamos los siguientes estados:

1. Salida de la caldera. Vapor sobrecalentado.
2. Salida de la turbina.
3. Salida del condensador. Líquido saturado.
4. Extracción del vapor hacia el desgasificador.
5. Condensado comprimido. Entrada al desgasificador.
6. Salida del desgasificador.
7. Agua de alimentación de la caldera.

#### ❖ Estado 1

Salida de vapor sobrecalentado de la caldera y entrada en la turbina. Con los datos de temperatura  $T_1=400$  °C y presión  $P_1=60$  bar obtenemos la entalpía  $h_1$  y la entropía  $s_1$ .

#### ❖ Estado 2

Se corresponde con la extracción de vapor y una de las entradas al desgasificador. Sabiendo que se trata de una extracción isoentrópica la entropía del nuevo estado 2s es igual a la del estado 1 ( $s_{2s}=s_1$ ) y conocida la presión a la cual se produce dicha extracción, presión de trabajo del desgasificador, calculamos  $h_{2s}$ . Para obtener la entalpía real  $h_2$  es necesario aplicar con condición de rendimiento isoentrópico, en este caso, 0,7.

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

#### ❖ Estado 3

Extracción del vapor que va al condensador. De nuevo, tal como se ha comentado en el estado anterior  $s_{3s}=s_2$ . Sacamos  $h_{3s}$  y aplicando la condición de rendimiento

isoentrópico calculamos  $h_3$ .

$$\eta_t = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}}$$

❖ Estado 4

Salida del condensado tras su paso por el condensador. Sale en condiciones de líquido saturado, título 0 ( $x_4=0$ ) a la presión del condensador ( $p_4=0,1$  bar). El título es el cociente entre la masa de vapor y la masa total. En consecuencia se halla la entalpía  $h_4$  y entropía  $s_4$  en este punto.

❖ Estado 5

Entrada al desgasificador de los condensados. Una bomba incrementa su presión desde 0,1 bar, presión de operación del condensador hasta la presión de operación del desgasificador (3 bar). Opera de manera isoentrópica, de manera que la entropía del nuevo estado  $s_5$  se iguala a la del estado 4 ( $s_{5s}=s_4$ ) y calculamos  $h_{5s}$ . Finalmente, con la condición de rendimiento isoentrópico (0,6) se calcula la entalpía real  $h_5$ .

$$\eta_b = \frac{h_{5s} - h_4}{h_5 - h_4}$$

❖ Estado 6

Salida del desgasificador. Las condiciones a la salida de este equipo son  $T_6=105$  °C y  $p_6=3$  bar, presión del trabajo del desgasificador.

❖ Estado 7

Retorno del agua a la caldera tras ser bombeada. La bomba impulsa el agua aumentando su presión hasta la de la caldera  $p_7=60$  bar, venciendo las pérdidas de carga. Trabaja isoentrópicamente, con un rendimiento de 0,6. Se realiza el mismo procedimiento que para el estado 5.

$$\eta_b = \frac{h_{7s} - h_6}{h_7 - h_6}$$

Punto	T(°C)	P(bar)	h(kJ/kg)	s(kJ/kg*K)	x(-)
1	400	60	3177	6,54	-
2	136,7	3	2732	7,009	-
3	45,82	0,1	2374	7,49	0,9123
4	45,82	0,1	191,8	0,6493	0
5	45,87	3	192,3	0,6499	-
6	105	3	440,3	1,363	-
7	106,4	60	450,3	1,373	-

Tabla 1. Variables termodinámicas de los estados característicos

## 7.2. BALANCES DE MASA Y ENERGÍA

Conocidas las características de cada estado del ciclo en estudio se procede a realizar los balances de masa y energía de cada uno de los equipos que intervienen.

### DIMENSIONAMIENTO DE LA CALDERA

En primer lugar, debemos calcular el flujo másico de combustible que entra a la caldera en kg/s. Tenemos como datos de partida la cantidad anual de biomasa disponible y la cantidad de horas anuales de funcionamiento de la caldera.

$$M_c = \frac{M_{c_{anual}}}{T_{func}} = \frac{50.000 \frac{t}{año} * 1000 \frac{kg}{t}}{8000 h/año * 3600 s/h} = 1,74 kg/s$$

Siendo:

$M_{c_{anual}}$ : cantidad de biomasa forestal anual disponible en t/año.

$T_{func}$ : tiempo de funcionamiento de la caldera, en h/año.

$M_c$ : flujo másico de combustible que entra en la caldera, en kg/s.

A continuación, con el rendimiento de la caldera, obtenemos la cantidad de vapor que se produce y el calor transmitido al agua de alimentación de la caldera.

$$\eta_{caldera} = \frac{M_v * (h_1 - h_7)}{M_c * (PCI)} = \frac{M_v * (3177 - 450,3) \frac{kJ}{kg}}{1,74 \frac{kg}{s} * 12000 \frac{kJ}{kg}} = 0,87$$

Resolviendo la ecuación obtenemos:  $Mv=6,6$  kg/s

$$Q_{IN} = Mv * \frac{h_1 - h_7}{\eta_{caldera}} = 6,6 * \frac{(3177 - 450,3) \frac{kJ}{kg}}{0,87} = 20833 \frac{kJ}{kg}$$

Siendo:

$\eta_{caldera}$ : rendimiento de la caldera, en %.

$M_c$ : flujo másico de combustible entrante a la caldera, en kg/s.

PCI: Poder calorífico inferior, en kJ/kg.

$h_1$ : entalpía del vapor a la salida de la caldera, en kJ/kg.

$h_7$ : entalpía de agua de alimentación, en kJ/kg.

$M_v$ : flujo másico de vapor producido, en kg/s.

$Q_{IN}$ : calor transmitido al agua de alimentación de la caldera, en kJ/kg.

### DIMENSIONAMIENTO DEL DESGASIFICADOR

Al desgasificador entra el flujo condensado y el flujo de vapor de extracción en la turbina. El flujo de salida se impulsa mediante una bomba hacia la caldera. Se realiza un balance de masa y energía con el fin de obtener la fracción de vapor extraído hacia el desgasificador respecto de la entrada ( $y$ ):

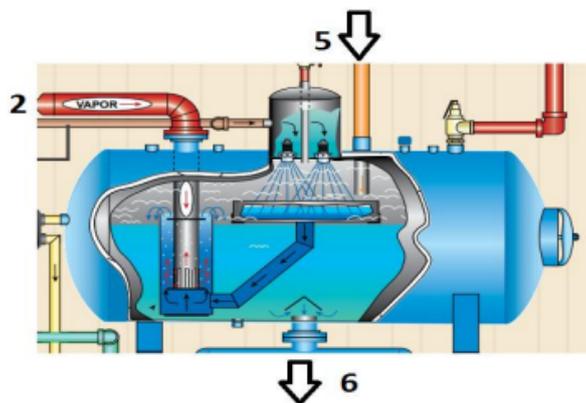


Ilustración 21. Desgasificador

$$m_6 = m_2 + m_5$$

$$m_6 * h_6 = m_2 * h_2 + m_5 * h_5$$

Esta última ecuación podemos reescribirla de esta manera, sabiendo que  $m_6$  es igual a  $m_1$ :

$$m_1 * h_6 = y * m_1 * h_2 + m_1 * (1 - y) * h_5$$

Dividiendo por  $m_1$  la expresión anterior nos queda que la fracción de vapor extraído respecto al de entrada ( $y$ ) es:

$$y = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} = \frac{440,3 - 192,3}{2732 - 192,3} = 0,09764$$

Siendo:

$m_2$ : flujo de extracción de la turbina, en kg/s-

$m_5$ : flujo de condensado, en kg/s.

$m_6$ : flujo de alimentación a la caldera, en kg/s.

$h_2$ : entalpía del vapor de extracción, en kJ/kg.

$h_5$ : entalpía del condensado a la entrada del desgasificador, en kJ/kg.

$h_6$ : entalpía a la salida del desgasificador, en kJ/kg.

#### DIMENSIONAMIENTO DE LA TURBINA DE VAPOR

Para calcular la potencia de la turbina (trabajo positivo), realizamos un balance de energía. Son conocidos los caudales y entalpías de la entrada y las salidas.

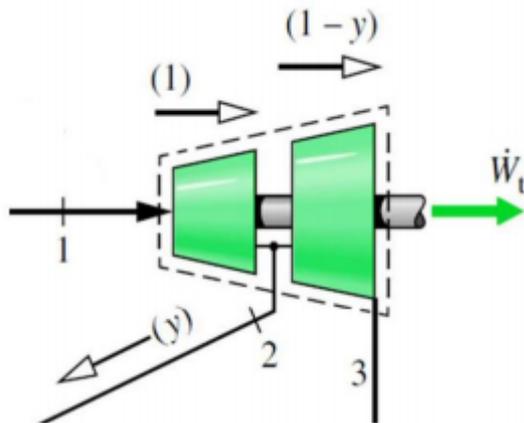


Ilustración 22. Turbina con extracción de vapor

$$W_T = m_1 * ((h_1 - h_2) + (1 - y) * (h_2 - h_3)) = 6,6 \frac{kg}{s} * ((3177 - 2732) \frac{kJ}{kg} + (1 - 0,09764) * (2732 - 2374) \frac{kJ}{kg}) = 5105 kW$$

Siendo:

$W_T$ : Potencia generada por la turbina, en kW.

$m_1$ : flujo másico de vapor entrante (es el mismo que  $M_v$ ), en kg/s.

$m_2$ : flujo másico de extracción para el desgasificador, en kg/s.

$m_3$ : flujo másico de extracción para el condensador, en kg/s.

$h_1$ : entalpía del estado 1, en kJ/kg.

$h_2$ : entalpía del estado 2, en kJ/kg.

$h_3$ : entalpía del estado 3, en kJ/kg.

Para obtener la potencia eléctrica en bornes del alternador será necesario multiplicar la potencia generada en la turbina por los rendimientos del reductor y el alternador. Los rendimientos son datos conocidos.

$$W_E = W_T * \eta_{mec} * \eta_{alt} = 5105 kW * 0,9 * 0,97 = 4457 kW$$

Siendo:

$W_E$ : potencia eléctrica en bornes del alternador, en kW.

$\eta_{mec}$ : rendimiento mecánico del reductor de velocidades, en %.

$\eta_{alt}$ : rendimiento del alternador, en %.

### DIMENSIONAMIENTO DEL CONDENSADOR

En el condensador tiene lugar la condensación del flujo de vapor procedente de la turbina. Conocidas las características tanto de la entrada como de la salida, el calor a disipar o potencia del condensador es:

$$Q_{COND} = m_3 * (h_3 - h_4) = 6,6 * (1 - 0,09764) * (2374 - 191,8) = 13089 \text{ kW}$$

Siendo:

$Q_{COND}$ : potencia necesaria para disipar el calor, en kW.

$h_3$ : entalpía del vapor a la entrada del condensador, en kJ/kg.

$h_4$ : entalpía del líquido saturado a la salida del condensador, en kJ/kg.

### DIMENSIONAMIENTO DE LAS BOMBAS

Su función consiste en elevar la presión del líquido entrante mediante la aplicación de un trabajo eléctrico (trabajo negativo). La primera bomba se encarga de elevar la presión del líquido extraído del condensador de 0,1 bar (presión del condensador) a 3 bar (presión del desgasificador). La segunda bomba se encarga de elevar la presión del líquido extraído del desgasificador de 3 bar a 60 bar (presión de la caldera).

$$W_{b1} = Mv * (1 - y) * (h_4 - h_5) = 5,956 \frac{kg}{s} * (191,8 - 192,3) \frac{kJ}{kg} = -2,978 \text{ kW}$$

$$W_{b2} = Mv * (h_6 - h_7) = 6,6 \frac{kg}{s} * (440,3 - 450,3) \frac{kJ}{kg} = -66 \text{ kW}$$

Siendo:

$W_{b1}$ : trabajo de la bomba 1, en kW.

$W_{b2}$ : trabajo de la bomba 2, en kW.

### RENDIMIENTO DEL CICLO

Para calcular el rendimiento total del ciclo se utilizará el calor aportado en la caldera al circuito de agua ( $Q_{IN}$ ), el trabajo neto realizado por la turbina ( $W_T$ ) y el trabajo de las 2 bombas ( $W_{b1}, W_{b2}$ ):

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_T + W_{b1} + W_{b2}}{Q_{IN}} * 100 = \frac{(5105 - 2,978 - 66) kW}{20833 kW} * 100 = 24,17\%$$

### 7.3. DIMENSIONAMIENTO DEL ALMACÉN GENERAL

Los montones de astilla alcanzarán una altura de 4 metros de altura en el almacén y la densidad aparente media tiene un valor de  $300 \text{ kg/m}^3$ . Previo a calcular la superficie del almacén, se hallará el volumen total de la astilla:

$$V_{astilla} = \frac{M}{\rho} = \frac{50.000.000 \text{ kg}}{300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 166.666,67 \text{ m}^3$$

Para calcular la superficie necesaria se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$S_{teórica} = \frac{V_{astilla}}{Z} = \frac{166.666,67 \text{ m}^3}{4 \text{ m}} = 41.666,67 \text{ m}^2$$

$$S_{real} = S_{teórica} * f = 41.666,67 \text{ m}^2 * 1,25 = 52083,33 \text{ m}^2 = 5,20833 \text{ ha}$$

Siendo:

M: masa total de biomasa anual, en kg.

P: densidad aparente de la astilla, en  $\text{kg/m}^3$ .

$V_{astilla}$ : volumen total de la astilla, en  $\text{m}^3$ .

Z: altura máxima de cada montículo de astilla dentro del almacén, en m.

f: factor de seguridad del almacén (se añade un 25 % a la superficie del almacén teórica)

dado que se debe dejar espacio para las calles donde se opera la maquinaria de transporte).

$S_{teórica}$ : superficie teórica del almacén, en  $m^2$ .

$S_{real}$ : superficie real del almacén, en  $m^2$ .

1 hectárea (ha) son 10.000  $m^2$ .

Finalmente, se exponen en la siguiente tabla los datos de partida para resolver el dimensionamiento de la planta:

PCI astilla	12000 kJ/kg
Densidad astilla	500 kg/ $m^3$
Altura de montones de astilla	4 m.
Cantidad anual de biomasa forestal disponible	50000 t/año
Presión de la caldera	60 bar
Presión del desgasificador	3 bar
Presión del condensador	0,1 bar
Temperatura del vapor de salida de la caldera	400 °C
Temperatura del líquido de salida del desgasificador	105 °C
Disponibilidad de la planta	8000 h/año
Rendimiento de la caldera	87 %
Rendimiento de la turbina	70 %
Rendimiento de las bombas	60 %
Rendimiento mecánico del reductor de velocidades	90 %
Rendimiento eléctrico del alternador	97 %
Calor específico del agua	4,18 kJ/kg $^{\circ}$ K
Factor de seguridad del almacén	1,25

**Tabla 2. Datos de partida**

#### 7.4. RESULTADOS

En la siguiente tabla, se reflejan los resultados de los balances aplicados a modo de resumen:

Consumo de combustible	1,74 kg/s
Producción de vapor de agua en la caldera	6,6 kg/s
Extracción de vapor al desgasificador	0,644 kg/s
Extracción de vapor al condensador	5,956 kg/s
Calor transmitido al agua de alimentación de la caldera	20833 kJ/kg
Potencia bruta de la turbina	5105 kW
Potencia eléctrica en bornes del alternador	4457 kW
Potencia a disipar en el condensador	13089 kW
Potencia de la bomba 1	-2,978 kW
Potencia de la bomba 2	-66 kW
Rendimiento del ciclo	24,17 %
Hectáreas para el almacenamiento del combustible	5,20833 ha

**Tabla 3. Resultados de los balances**

## 8. CONTROL DE EMISIONES EN LOS EQUIPOS DE COMBUSTIÓN

Como ya hemos comentado, la biomasa es una energía renovable porque no se agota, se puede obtener de forma infinita a partir de los recursos naturales que ofrece la vida orgánica. Sin embargo, no se trata de una energía totalmente limpia.

Ya se ha explicado que la combustión es un proceso por el que la biomasa es oxidada hasta obtener dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua. La ecuación global de la reacción de combustión es la inversa de la de fotosíntesis. El proceso se realiza a altas temperaturas ( $800^{\circ}\text{C}$ - $1000^{\circ}\text{C}$ ), utilizando aire como agente oxidante.

En la combustión, en condiciones reales, se emplea una cantidad de aire por encima del necesario para efectuar la oxidación total de la biomasa utilizada en cada caso.

La combustión de la biomasa transcurre con liberación de energía en forma de calor y los productos principales resultantes, como se ha mencionado, son el dióxido de carbono, agua (en forma de vapor a la salida del 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 utilizadas como fertilizantes naturales, en la fabricación de cementos o incluso para luchar contra las mareas negras (ya que tienen la capacidad de adherirse al crudo con bastante facilidad).

Los gases son el otro tipo de residuos que genera la biomasa. Hay de diferentes tipos, pero el que destaca por encima de cualquier otro es el  $\text{CO}_2$  (el principal de todos los gases responsables del efecto invernadero) cuya minimización es necesaria a fin de disminuir el impacto ambiental producido por este proceso.

Hay que tener en cuenta que, para obtener biomasa, primero hace falta plantar vegetales (especialmente árboles) que sirvan de base para producir la biomasa en sus diferentes formas. De esta manera, aunque durante la combustión de la biomasa se libera el  $\text{CO}_2$ , hay que tener en cuenta que, para producir esa biomasa, antes ha sido necesario que una gran cantidad de  $\text{CO}_2$  (que ya estaba presente en la atmósfera) fuera absorbido por las plantas para su crecimiento. De este modo, aunque la biomasa genera  $\text{CO}_2$  en su combustión, también destruye  $\text{CO}_2$  durante su producción. Por ello, se dice que es una energía con “huella de carbono neutral”, es decir, no reduce la cantidad de  $\text{CO}_2$  presente

en la atmósfera, pero tampoco la amplía.

Es deseable que en general, la biomasa se obtenga de plantaciones desarrolladas de forma expresa para tal fin, nunca procedentes de bosques primarios (los que han crecido de forma natural y sin influencia de la mano del hombre).

Al margen de todo esto, nuestro objetivo tiene que ser siempre minimizar las emisiones a la atmósfera. Además de que las plantas de biomasa que utilizan esta alternativa tienen controles muy estrictos, por parte de las administraciones públicas. Para llevar a la práctica este control se ha establecido una normativa que fija, entre otros aspectos, los límites de las emisiones de óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas en suspensión.

En este sentido, el Consejo de Ministros ha aprobado un Real Decreto que limita las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas en suspensión (PM) procedentes de instalaciones de combustión medianas (entre uno y cincuenta megavatios) de biomasa. Se traspone así la directiva comunitaria correspondiente con unos plazos que deberán cumplir las instalaciones nuevas y/o actuales a partir de diciembre de 2018.

La reducción de las emisiones pasa por mejorar la combustión y realizar una correcta depuración de los gases. Con objeto de reducir la cantidad de partículas emitidas a la atmósfera debido a la combustión incompleta de la biomasa, por parte de la industria, se han ido introduciendo modificaciones en los equipos de combustión en los últimos años haciendo grandes inversiones en electrofiltros y filtros de mangas que permitan mantener la emisión de partículas por debajo de los límites legales.

De este modo, por ejemplo, se ha hecho especial hincapié en la modulación de los equipos para adaptarse a la demanda térmica, se han empleado sondas lambda para asegurar el control del ratio combustible-aire más adecuado en función de las condiciones de operación y se ha introducido aire secundario y terciario en distintos puntos de los equipos.

La investigación en este campo ha llevado a la introducción de aditivos en la biomasa para mejorar y que sea más limpio el proceso de combustión, de nuevos precipitadores electrostáticos que atrapan las partículas mediante su ionización, atrayéndolas por una carga electrostática inducida; ciclones y multiciclones, que con su movimiento rotativo separan por fuerza centrífuga las cenizas volátiles.



Ilustración 23. Filtro de mangas FIVEPULSE. Planta de biomasa de Villanueva de Algaidas (Málaga)

## 9. DESCRIPCIÓN DE TAREAS. DIAGRAMA DE GANTT

A continuación, se describirá el lanzamiento del proyecto donde se detallarán las tareas que se llevan a cabo y la identificación del camino crítico mediante el diagrama de Gantt.

### 9.1. PAQUETES DE TRABAJO. TAREAS

#### ➤ T.1 Ingeniería

##### • T.1.1 Ingeniería 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.

##### • T.1.2 Ingeniería Detalle

- Descripción: se desarrolla el proyecto arquitectónico, planos estructurales, planos eléctricos, etc.
- Duración: 15 meses.
- Recursos: Ingeniero técnico.

#### ➤ T.2 Obra civil

- Descripción: construcción de la planta: cimentaciones, almacén general, almacén nodriza, isla de potencia, etc.
- Duración: 4 meses.
- Recursos: Operarios

#### ➤ T.3 Compras

- Descripción: Compra de la maquinaria.
- Duración: 10 meses
- Recursos: Agente o gestor de compras.

#### ➤ T.4 Montaje mecánico

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

#### ➤ T.5 Montaje eléctrico

- Descripción: Montaje de todo el entramado eléctrico.
- Duración: 4 meses.
- Recursos: Operarios.

➤ **T.6 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: 3 meses.
- Recursos: Operarios e Ingenieros técnicos.

Fecha de inicio y fin de cada tarea especificada en el diagrama de Gantt. Ir a Anexo 2 para ver el diagrama.

## 9.2. RESUMEN PLANIFICACIÓN

Fecha de comienzo: 2 de enero de 2018

Fecha de fin: 5 de octubre de 2020

Tareas críticas: T4, T5, T6 y T7.

Cualquier retraso en la ingeniería básica, ingeniería detalle u obra civil retrasaría todo el proyecto. Ir a Anexo 2 para ver el diagrama de Gantt.

## 10. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se procede al cálculo de la inversión de la planta, diferenciando las distintas partidas que engloban la totalidad del proyecto y los costes asociados a cada una de ellas.

PARTIDAS	COSTES (PORCENTAJE)
<b><u>CALDERA:</u></b>	6.125.000 € (35%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caldera</li> <li>• Chimenea</li> <li>• Dispositivos</li> </ul>	
<b><u>GRUPO TURBINA-ALTERNADOR:</u></b>	4.375.000 € (25%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Turbina</li> <li>• Reductor de velocidades</li> <li>• Alternador</li> <li>• Armario control local</li> <li>• Seguridades y control</li> <li>• Sistema de lubricación</li> </ul>	
<b><u>AUXILIARES:</u></b>	2.100.000 € (12%)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bombas</li> <li>• Condensador</li> <li>• Tuberías</li> <li>• Válvulas</li> <li>• Etc.</li> </ul>	

<b><u>OBRA CIVIL:</u></b>	<b>1.400.000 € (8%)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Almacén general de la astilla</li><li>• Almacén cubierto de piso móvil</li><li>• Cimentaciones</li><li>• Edificio de la turbina</li><li>• Oficinas</li><li>• Laboratorio</li><li>• Taller (repuestos, herramientas...)</li></ul>	
<b><u>MONTAJE MECÁNICO</u></b>	<b>1.575.000 € (9%)</b>
<b><u>MONTAJE ELÉCTRICO</u></b>	<b>1.925.000 € (11%)</b>
<b><u>INVERSIÓN TOTAL</u></b>	<b>17.500.000 € (100%)</b>

Tabla 4. Presupuesto

La inversión total de esta planta asciende a 17.500.000 €.

## 11. CONCLUSIONES

Vivimos en una sociedad cada vez más concienciada con el medio ambiente y con la producción de energía limpia. Las energías renovables cubren entorno al 35 % de la producción eléctrica nacional.

En el País Vasco se dispone de una gran producción de biomasa procedente de los bosques, capaz de producir electricidad sin contaminar el medio ambiente. En comparación con centrales que emplean otros combustibles y métodos de producción de energía, las plantas de biomasa son menos caras y el coste del combustible es considerablemente más barato. Sin embargo, el poder calorífico inferior del combustible biomásico es aproximadamente 3 veces más bajo el del gas y los rendimientos obtenidos no superan el 25 %. Estos datos nos llevan a plantearnos si el uso de biomasa como combustible para la generación de calor y electricidad es una alternativa. La respuesta es sí. De esta manera, se evita su almacenamiento con los consiguientes costes de gestión y eliminación y fomentamos la independencia energética de los combustibles fósiles. Además, en la quema de biomasa no se genera CO<sub>2</sub> adicional, se emite menos azufre y partículas como CO, HC Y NO<sub>x</sub>.

¿Pero qué ocurre con el gran volumen de cenizas generadas a lo largo del proceso de combustión de la biomasa forestal? A priori, se podría pensar que contrarrestaría los beneficios para este tipo de generación eléctrica. Sin embargo, la vida útil de estas cenizas no acaba con su recogida en la planta sino que poseen varias alternativas de reutilización. Pueden emplearse como fertilizantes, en la fabricación de morteros, compuesto para la fabricación de hormigón y para piezas de albañilería, silicocalceas con propiedades de aislante térmico.

Tras la abolición del Real Decreto 661/2007 por el que se regulaba la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, en la que se encuentra la biomasa, ha supuesto una considerable disminución de los ingresos. Esto implica que a día de hoy la rentabilidad de estas plantas sea muy baja, no se invierta y se construyan nuevas plantas.

## 12. FUENTES DE INFORMACIÓN

- [http://www.pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/20170321\\_mdg\\_bioplat\\_1.pdf](http://www.pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/20170321_mdg_bioplat_1.pdf)
- [http://www.forestal.cat/bdds/imatges\\_db/biblioteca/BIBLIOTECA\\_DOCUMENT1\\_2026000012846224.pdf](http://www.forestal.cat/bdds/imatges_db/biblioteca/BIBLIOTECA_DOCUMENT1_2026000012846224.pdf)
- Aprovechamiento de la biomasa para uso energético. Borja Velázquez Martí.
- <http://www.biomasaeskadi.net/que-es-la-biomasa-forestal/>
- <http://www.ecohabitar.org/wp-content/uploads/2013/10/elaboracion-de-compost-con-restos-vegetales-1.pdf>
- <https://www.piedra-artificial.es/blog/fertilizantes-abonos-para-tierra/ventajas-e-inconvenientes-del-compostaje-domestico/>
- <http://eimaformacion.com/ventajas-y-desventajas-del-compost/>
- [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_gasificacion\\_07\\_d2adcf3b.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_gasificacion_07_d2adcf3b.pdf)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Gasificaci%C3%B3n\\_de\\_biomasa](https://es.wikipedia.org/wiki/Gasificaci%C3%B3n_de_biomasa)
- <http://agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/COMBUSTION-DIRECTA.pdf>
- [http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos\\_forestales/article/viewFile/14855/14698](http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/viewFile/14855/14698)
- <https://bioecomasia.wordpress.com/2013/06/02/como-se-transporta-la-biomasa/>
- <http://www.cicloaguavapor.com/103-contenido/99-eldesgasificador>
- <http://www.powermag.com/air-cooled-condensers-eliminate-plant-water-use/>
- [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10540\\_Torres\\_refrigeracion\\_GT4\\_07\\_05eca613.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Torres_refrigeracion_GT4_07_05eca613.pdf)
- [http://www.um.edu.uy/docs/6\\_comportamiento\\_de\\_cenizas\\_y\\_suimpecto\\_en\\_sistemas\\_de\\_%20combustion\\_de\\_biomasa.pdf](http://www.um.edu.uy/docs/6_comportamiento_de_cenizas_y_suimpecto_en_sistemas_de_%20combustion_de_biomasa.pdf)
- [http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es\\_CENIZASPROCEDENTESDELAINCINERACIONDEBIOMASADIC2014.pdf](http://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_CENIZASPROCEDENTESDELAINCINERACIONDEBIOMASADIC2014.pdf)
- <https://es.wikipedia.org/wiki/SCADA>
- Apuntes Energías Alternativas. 4º Curso. Biomasa.
- Apuntes Ingeniería Térmica. 4º Curso. Análisis de las instalaciones de potencia con vapor: Ciclo Rankine, Torres de refrigeración.
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Generador\\_s%C3%ADncrono](https://es.wikipedia.org/wiki/Generador_s%C3%ADncrono)
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Turbina\\_de\\_vapor](https://es.wikipedia.org/wiki/Turbina_de_vapor)
- <http://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbina-de-vapor.html>
- [http://projects.ciemat.es/documents/412221/470762/noticia\\_cleanbiom\\_en\\_RET\\_EMA187.pdf/b82f0007-7b9d-42de-aed5-5387632a5af0](http://projects.ciemat.es/documents/412221/470762/noticia_cleanbiom_en_RET_EMA187.pdf/b82f0007-7b9d-42de-aed5-5387632a5af0)
- <http://www.fivemasa.com/wp-content/LinksADocs/PresentacionFivemasa.pdf>
- <https://www.energias-renovables.com/biomasa/las-instalaciones-de-biomasa-de-mas-de-20171226>
- <http://www.plantasdebiomasa.net/>
- <https://www.reliance-scada.com/en/success-stories/power-industry/reliance-scada-at-biomass-power-plant-kolin>

## 13. ANEXOS

### 13.1. ANEXO

#### Código empleado en el EES para la resolución de los apartados 7.1 y 7.2

{CENTRAL TÉRMICA DE VAPOR Y BIOMASA, DAVID CUESTA, TFG}

{DATOS CONOCIDOS}

PCI=12000 {Poder calorífico inferior, kJ/kg}  
 ren\_cal=0,87 {rendimiento de la caldera}  
 n\_t=0,7 {rendimiento isoentropico de la turbina}  
 n\_b=0,6 {rendimiento isoentropico de las bombas}  
 ren\_mec=0,9 {rendimiento mecánico del reductor}  
 ren\_alt=0,97 {rendimiento eléctrico del alternador}  
 tiempo=8000 { numero de horas de funcionamiento}  
 res=50000\*10^3 {residuo forestal suministrado a la caldera al año, kg/año}

{ESTADOS}

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

p[1]=60{bar}  
 T[1]=400 {° 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}

{Estado 2, extracción de vapor hacia el desgasificador}

p[2]=3 {bar}  
 s\_s[2]=s[1] {kJ/kg\*K}  
 h\_s[2]=enthalpy(Water;s=s\_s[2];P=P[2]) {kJ/kg}  
 n\_t=(h[1]-h[2])/(h[1]-h\_s[2])  
 s[2]=entropy(Water;h=h[2];P=P[2]) {kJ/kg\*K}  
 T[2]=temperature(Water;P=P[2];h=h[2]) {° C}

{Estado 3, extracción de vapor hacia el condensador}

p[3]=0,1 {bar}  
 s\_s[3]=s[2] {kJ/kg\*K}  
 h\_s[3]=enthalpy(Water;s=s\_s[3];P=P[3]) {kJ/kg}  
 n\_t=(h[2]-h[3])/(h[2]-h\_s[3])  
 s[3]=entropy(Water;h=h[3];P=P[3]) {kJ/kg\*K}  
 x[3]=quality(Water;P=p[3];h=h[3]) {-}  
 T[3]=temperature(Water;P=P[3];h=h[3]) {° C}

{Estado 4, salida del condensador}

p[4]=p[3] {bar}  
 x[4]=0 {-}  
 h[4]=enthalpy(Water;x=x[4];P=P[4]) {kJ/kg}  
 s[4]=entropy(Water;x=x[4];P=P[4]) {kJ/kg\*K}  
 T[4]=temperature(Water;P=P[4];h=h[4]) {° C}

{Estado 5, entrada al desgasificador}

$p[5]=3$  {bar}  
 $s\_s[5]=s[4]$  {kJ/kg\*K}  
 $h\_s[5]=\text{enthalpy}(\text{Water};s=s\_s[5];P=P[5])$  {kJ/kg}  
 $n\_b=(h\_s[5]-h[4])/(h[5]-h[4])$   
 $s[5]=\text{entropy}(\text{Water};h=h[5];P=P[5])$  {kJ/kg\*K}  
 $T[5]=\text{temperature}(\text{Water};P=P[5];h=h[5])$  {° C}

{Estado 6, salida del desgasificador}

$p[6]=p[5]$  {bar}  
 $T[6]=105$  {° C}  
 $h[6]=\text{enthalpy}(\text{Water};T=T[6];P=P[6])$  {kJ/kg}  
 $s[6]=\text{entropy}(\text{Water};T=T[6];P=P[6])$  {kJ/kg\*K}

{Estado 7, agua de alimentación a la caldera tras ser bombeada}

$p[7]=p[1]$  {bar}  
 $s\_s[7]=s[6]$  {kJ/kg\*K}  
 $h\_s[7]=\text{enthalpy}(\text{Water};s=s\_s[7];P=P[7])$  {kJ/kg}  
 $n\_b=(h\_s[7]-h[6])/(h[7]-h[6])$   
 $s[7]=\text{entropy}(\text{Water};h=h[7];P=P[7])$  {kJ/kg\*K}  
 $T[7]=\text{temperature}(\text{Water};P=P[7];h=h[7])$  {° C}

{CALCULOS ENERGETICOS}

$Mc=\text{res}/(\text{tiempo}*3600)$  {flujo másico de combustible, kg/s}  
 $\text{ren\_cal}=(Mv*(h[1]-h[7]))/(Mc*PCI)$  {flujo másico de vapor,kg/s}  
 $h[6]=y*h[2]+(1-y)*h[5]$  {-} {Balance de energía en el desgasificador para obtener la fracción y}

{DIMENSIONAMIENTO DE LA TURBINA}

$W\_t=Mv*(h[1]-(1-y)*h[3]-(y)*h[2])$  {Trabajo neto realizado por la turbina, kW}  
 $W\_e=W\_t*(\text{ren\_mec})*(\text{ren\_alt})$  {potencia eléctrica obtenida, kW}

{DIMENSIONAMIENTO DEL CONDENSADOR}

$T\_e=18$  {Temperatura de entrada del agua de refrigeración, °C}  
 $T\_s=23$  {Temperatura de salida del agua de refrigeración, °C}  
 $c\_agua=4,18$  {calor específico del agua, kJ/kg\*°C}  
 $Mv*(1-y)*(h[3]-h[4])=Mr*4,18*(T\_s-T\_e)$  {flujo másico de agua de refrigeración, kg/s}  
 $Q\_cond=(Mv*(1-y)*(h[3]-h[4]))$  {potencia del condensador, kW}

{DIMENSIONAMIENTO DE LAS BOMBAS}

$Wb\_1=(Mv*(1-y))*(h[4]-h[5])$  {Potencia bomba 1}  
 $Wb\_2=Mv*(h[6]-h[7])$  {Potencia bomba 2}

{DIMENSIONAMIENTO DE LA CALDERA}

$Q\_realcald=(Mv*(h[1]-h[7]))/\text{ren\_cal}$  {Calor de aporte en la caldera, en kW}

{RENDIMIENTO TÉRMICO DE LA PLANTA}

$\text{ren\_ciclo}=(W\_t-Wb\_1-Wb\_2)/Q\_realcald*100$  {rendimiento neto del ciclo, %}

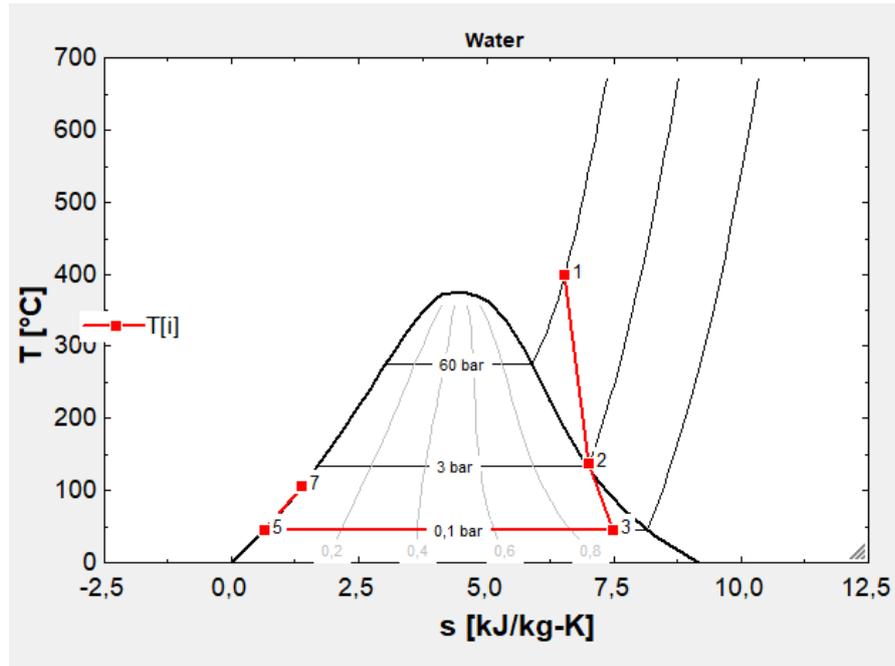


Ilustración 24. Diagrama T-s del Ciclo Rankine

13.2. ANEXO

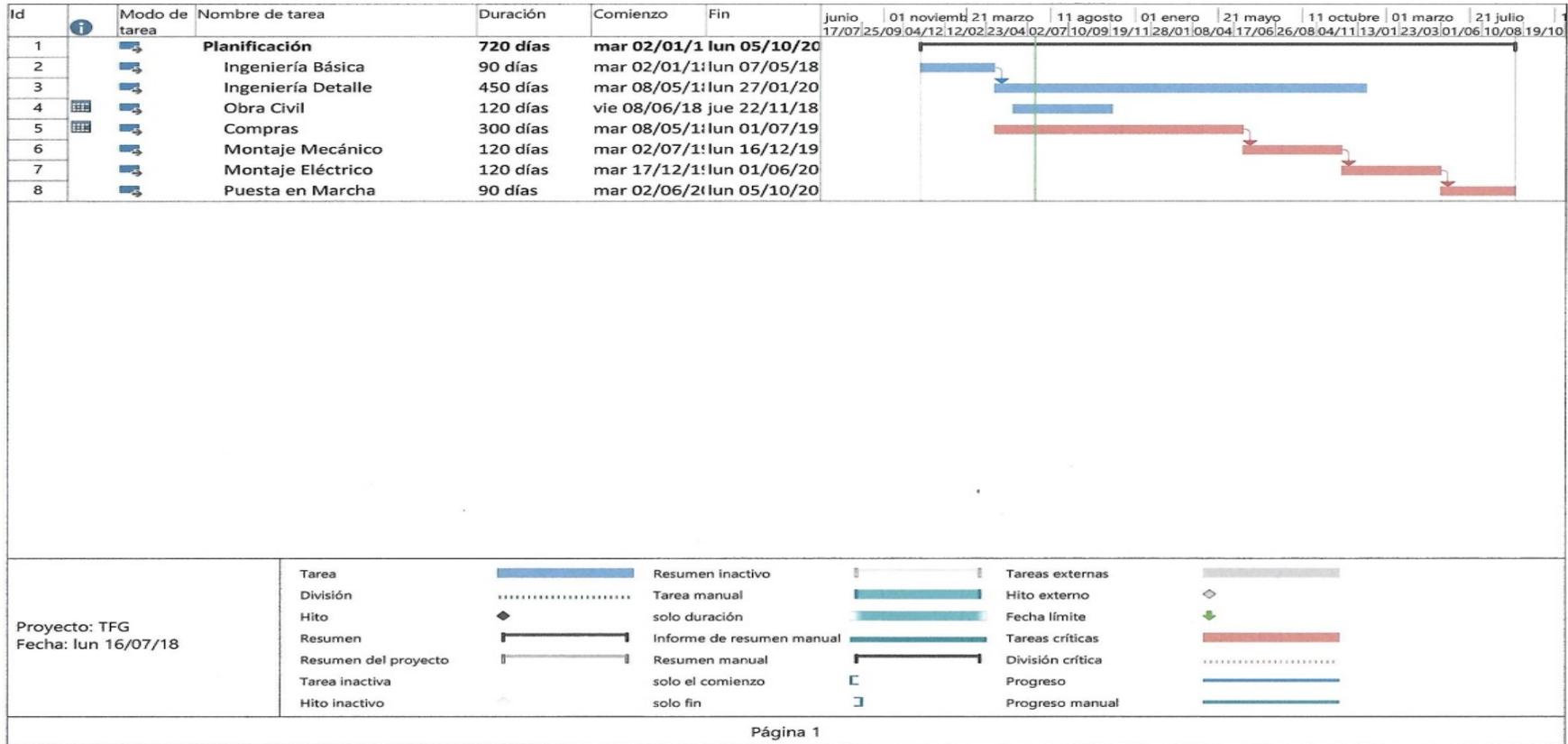


Tabla 5. Diagrama de Gantt