

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

***PROCESO DE FABRICACIÓN DE PAPEL.  
APLICACIÓN DE EERR.***

**Alumna:** Ainhoa Gredilla Pérez  
**Director:** Víctor de la Peña Aranguren  
**Curso:** 2018/2019



## RESUMEN TRILINGÜE:

### RESUMEN:

El abastecimiento de energía a la fábrica de papel mediante una planta de biomasa tiene por objetivo conseguir que la papelera sea autosuficiente en materia energética y reducir el consumo de energías no renovables.

Para comenzar, se describe el proceso productivo de fabricación de papel para así comprender de dónde proviene el residuo a emplear en la planta de valorización energética. Además, se plantean distintas alternativas en cuanto a cómo valorizar dicho residuo, exponiendo sus ventajas y desventajas para, finalmente, escoger la más adecuada.

A continuación, se describe la planta: el funcionamiento del ciclo que sigue (ciclo Rankine) y los distintos elementos de la misma. Posteriormente, se procede a dimensionarla, dando valores a los distintos estados del ciclo.

Para finalizar, se lleva a cabo un estudio económico con el fin de conocer el *Tiempo de Retorno Simple* y los beneficios que podrían obtenerse en caso de llevar a cabo el proyecto, y se muestra un cronograma del mismo.

## **ABSTRACT:**

The energy supply to the paper mill through a biomass plant has the objective of ensure that the factory is self-sufficient in energy matter and reduce the consumption of non-renewable energies.

First, the productive process of papermaking is described so that where the waste that is going to be used in the power plant comes from is understood. Moreover, different alternatives are proposed in terms of how to value this waste, exposing its advantages and disadvantages to finally choose the appropriate one.

Then, the plant is described: the cycle that follows (Rankine cycle) and the different elements of it. Subsequently, the plant is sized, giving values to the different states of the cycle.

Finally, an economic study is carried out in order to know the *Payback* and the benefits that could be obtained in case of carrying out the project, and a schedule of it is shown.

## **LABURPENA:**

Biomasa-instalazioak, paper-fabrika energiaz hornitzeko, energiaren kontuetan, laguntza behar ez duen paper-fabrika lortzea eta energia-iturri ez berriztagarrien kontsumoa murriztea dauzka helburua.

Lehenik eta behin, paper fabrikazioaren produkzio-prozesua deskribatzen da, balorizazio energetikoa instalazioan erabiltzen den hondakina nondik etortzen den ulertzeko. Horretaz gain, aukera desberdinak azaltzen dira hondakin hori baloratzeko, abantailak eta desabantailak adieraziz, eta, egokiena hautatzeko.

Segidan, instalazioa deskribatzen da: jarraitzen duen zikloaren funtzionamendua (Rankine zikloa) eta horren elementuak. Ondoren, instalazioa dimentsionatzen da, zikloaren egoera desberdinei baloreak emanaz.

Amaitzeko, azterketa ekonomiko bat egiten da berreskuratze-epa jakiteko. Proiektu hau egitean, irabaz litezkeen mozkinak ere aztertzen dira, eta, era berean, bere kronograma erakusten da.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....  | <b>8</b>  |
| 1.1. <i>CONTEXTO</i> .....  | 8         |
| 1.2. <i>MARCO EUROPEO</i> .....   | 11        |
| <b>2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE FABRICACIÓN DEL PAPEL</b> ..... | <b>14</b> |
| <b>3. OBJETIVOS Y ALCANCE</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>4. ALTERNATIVAS</b> .....  | <b>18</b> |
| 4.1. <i>COMBUSTIÓN DIRECTA</i> .....  | 18        |
| 4.1.1. CALDERA DE LECHO FIJO O PARRILLA.....                                | 19        |
| 4.1.2. CALDERA DE LECHO FLUIDO .....  | 20        |
| 4.2. <i>GASIFICACIÓN</i> .....  | 22        |
| <b>5. ALTERNATIVA SELECCIONADA</b> .....                                    | <b>24</b> |
| <b>6. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA</b> .....                                    | <b>25</b> |
| 6.1. <i>FUNCIONAMIENTO DEL CICLO</i> .....                                  | 25        |
| 6.2. <i>ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN</i> .....                               | 28        |
| 6.2.1. CALDERA.....   | 29        |
| 6.2.2. GRUPO TURBINA-ALTERNADOR.....  | 29        |
| 6.2.3. CONDENSADOR.....   | 31        |
| 6.2.4. BOMBA.....   | 32        |
| 6.2.5. DESGASIFICADOR.....  | 34        |
| <b>7. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA</b> .....                               | <b>35</b> |
| <b>8. ESTUDIO ECONÓMICO</b> .....   | <b>38</b> |
| <b>9. CRONOGRAMA</b> .....  | <b>40</b> |
| <b>10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....                             | <b>41</b> |
| <b>11. FUENTES DE INFORMACIÓN</b> .....                                     | <b>42</b> |
| <b>ANEXOS</b> .....   | <b>45</b> |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1. GASES DE EFECTO INVERNADERO.....                                    | 9  |
| Ilustración 2. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN EL MUNDO Y EN ESPAÑA....             | 10 |
| Ilustración 3. CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA PRIMARIA .....                           | 10 |
| Ilustración 4. EMISIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR SECTOR .....  | 11 |
| Ilustración 5. POSICIÓN DE LOS PAÍSES EN 2012 RESPECTO DEL PROTOCOLO DE KIOTO..... | 12 |
| Ilustración 6. OBJETIVO 20/20/20.....  | 13 |
| Ilustración 7. SECCIÓN DE UN ÁRBOL.....  | 14 |
| Ilustración 8. CALANDRADO DEL PAPEL.....   | 16 |
| Ilustración 10. ESQUEMA DE CALDERA DE PARRILLA .....                               | 19 |
| Ilustración 11. IMAGEN DE CALDERA DE PARRILLA.....                                 | 20 |
| Ilustración 12. CALDERA DE LECHO FLUIDO .....                                      | 20 |
| Ilustración 13. CALDERA DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE.....                           | 21 |
| Ilustración 14. CALDERA DE LECHO FLUIDO CIRCULANTE .....                           | 22 |
| Ilustración 16. CALDERA DE PARRILLA EN FUNCIONAMIENTO.....                         | 24 |
| Ilustración 17. CICLO RANKINE .....  | 25 |
| Ilustración 18. PROCESOS DEL CICLO RANKINE.....                                    | 26 |
| Ilustración 19. CURVA DEL CICLO CON RENDIMIENTOS ISOENTRÓPICOS.....                | 27 |
| Ilustración 20. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN .....                                    | 28 |
| Ilustración 21. CALDERA DE BOMASA.....   | 29 |
| Ilustración 22. ESQUEMA DE LA TURBINA.....   | 30 |
| Ilustración 23. ESQUEMA DEL CONJUNTO TURBINA-ALTERNADOR.....                       | 31 |
| Ilustración 24. IMAGEN DEL CONDENSADOR.....  | 32 |
| Ilustración 25. ESQUEMA DEL CONDENSADOR.....                                       | 32 |
| Ilustración 26. BOMBA HIDRÁULICA.....  | 33 |
| Ilustración 27. DESGASIFICADOR .....   | 34 |
| Ilustración 28. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN .....                                    | 35 |
| Ilustración 29. ESTADOS DEL CICLO.....   | 36 |

## 1. INTRODUCCIÓN.

A lo largo de la historia, el ser humano ha ido explotando los distintos recursos que ofrece el planeta a conveniencia dependiendo de diversos intereses. Hasta ahora, el interés principal ha sido el económico, lo que ha llevado a que los combustibles fósiles sean los más empleados por ser abundantes y relativamente sencillos de explotar, aún siendo los más contaminantes.

Desde hace unos años, la concienciación por proteger y conservar el planeta ha ido en aumento, lo que supone sustituir el uso de energías contaminantes y finitas por las renovables. Es evidente que esto no se puede llevar a cabo de un día para otro por diversas razones. Cada empresa, incluso cada individuo, deberá aportar su granito de arena para llevarlo a cabo paulatinamente.

En el presente trabajo se propone el aprovechamiento de los residuos de una fábrica de papel integral, introduciéndolos en una planta de biomasa con el objetivo de producir energía eléctrica para, en la medida de lo posible, autoabastecer a la propia fábrica.

En primer lugar, se expone el contexto en el que se llevará a cabo el proyecto, tanto en el marco europeo como a nivel nacional. A continuación, se explicará brevemente el proceso productivo de fabricación del papel de cara a dar a conocer de donde provendrá la energía renovable producida. Posteriormente, se expondrán los objetivos del proyecto y el alcance del mismo y una serie de alternativas para el tratamiento de la biomasa producida en la fábrica, de entre las cuales se escogerá la más adecuada.

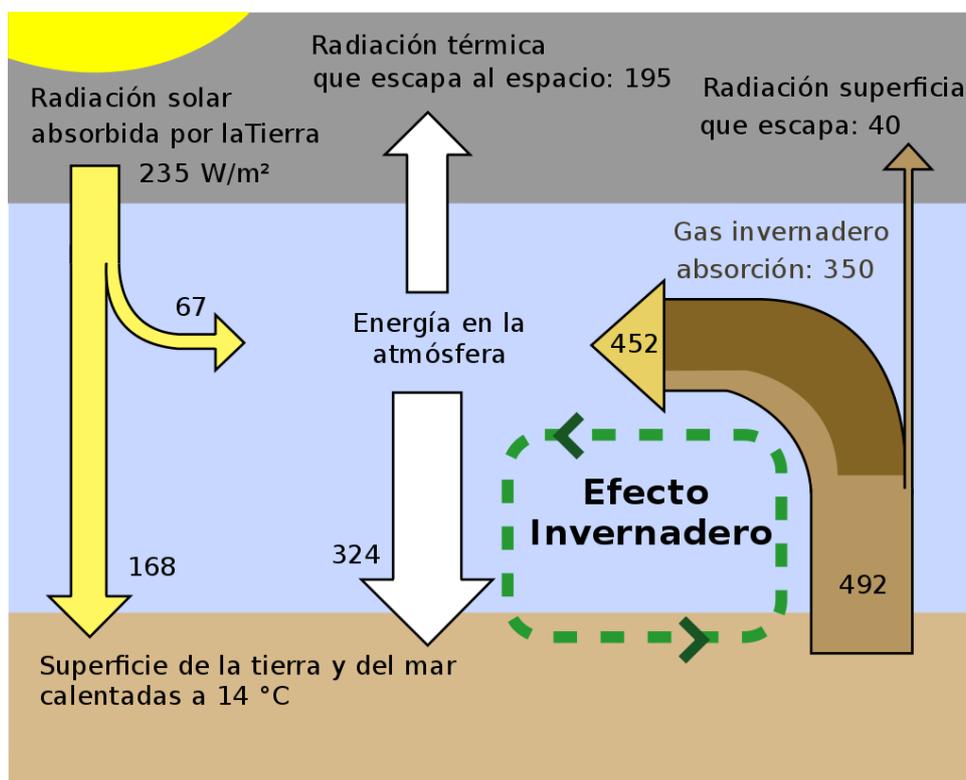
Se incluirá además una descripción de la planta de biomasa, describiendo todos los equipos necesarios y un estudio económico y un cronograma del proyecto y la producción de energía. Por último, se extraerán una serie de conclusiones y recomendaciones y se expondrá la bibliografía empleada en este trabajo.

### 1.1. CONTEXTO.

La concentración de gases de efecto invernadero de origen antropogénico cada vez es mayor por la utilización intensiva de combustibles fósiles y, como consecuencia, se está

produciendo un aumento de la temperatura media terrestre, conocido como Calentamiento Global. Por este motivo, controlar y, en la medida de lo posible, reducir las emisiones debería suponer una prioridad para la sociedad.

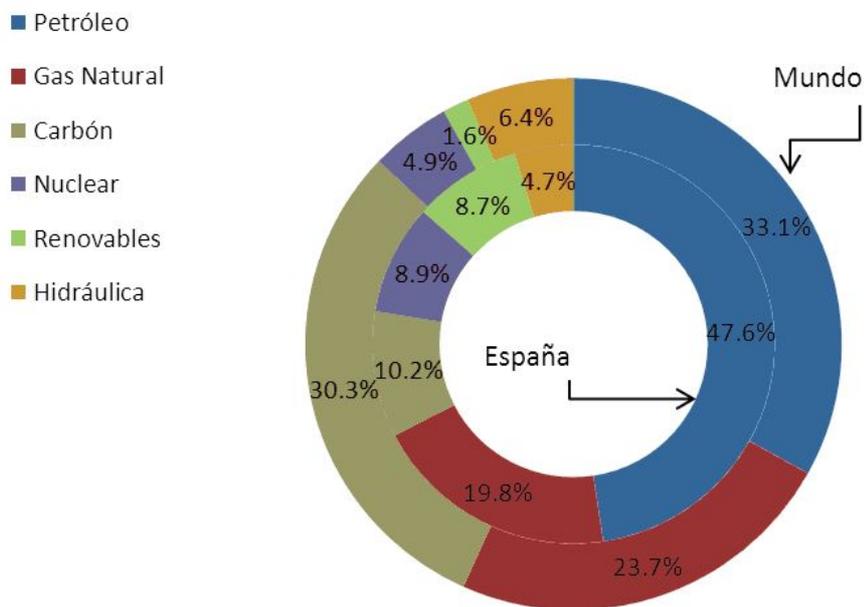
Los gases de efecto invernadero son gases atmosféricos que absorben y emiten radiación dentro del rango infrarrojo. La atmósfera, por el hecho de ser muy transparente para la luz visible pero mucho menos para la radiación infrarroja, produce para la superficie terrestre el mismo efecto que el techo de cristal de un invernadero. La luz solar llega sin grandes obstáculos hasta el suelo, lo calienta y se emiten rayos infrarrojos que, a diferencia de los rayos de luz, son absorbidos en gran parte por la atmósfera. Este fenómeno viene representado en la siguiente figura.



**Ilustración 1. GASES DE EFECTO INVERNADERO**

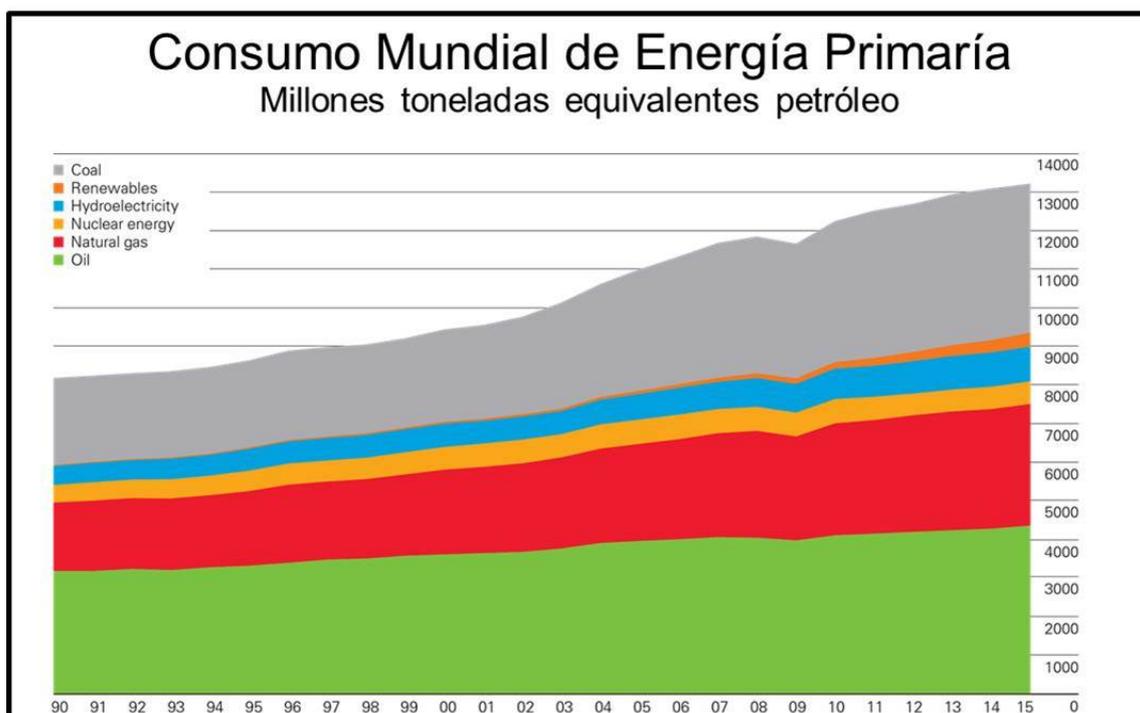
En el siguiente gráfico, se muestra el consumo de energía primaria, es decir, energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada, a nivel mundial y en España en función del tipo de fuente de energía. Se ve que solo el 8% de la energía mundial y el 13'4% en el caso de España es de origen renovable. Estos números van en aumento año tras año, sin embargo, se ve una clara y gran superioridad del petróleo (33'1% en el mundo y 47'6% en España), del gas natural (23'7% en el mundo y 19'8% en España) y del carbón (30'3% en el

mundo y 10'2% en España). En resto, hasta el 100% corresponden a la energía de origen nuclear y a la energía de origen hidráulico, también consideradas por muchos como renovables.



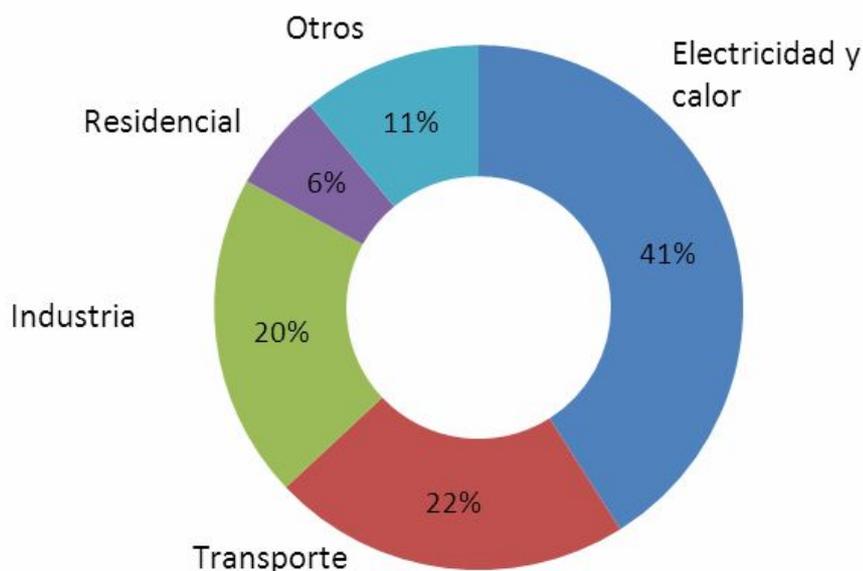
**Ilustración 2. CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN EL MUNDO Y EN ESPAÑA**

El consumo de energía primaria muestra un aumento progresivo en el tiempo, tal y como se muestra en el siguiente gráfico. Se puede afirmar que, a pesar de que el petróleo en la fuente de energía más explotada, su importancia en porcentaje a disminuido notablemente.



**Ilustración 3. CONSUMO MUNDIAL DE ENERGÍA PRIMARIA**

De cara a solucionar este problema, es importante saber de qué sectores provienen estas emisiones y en qué cantidad. Esto se muestra en el siguiente gráfico, donde se puede comprobar que la mayor parte (41%) se produce en los procesos de generación de electricidad y calor; seguido del transporte y de la industria, que suponen un 22% y un 20%, respectivamente.



**Ilustración 4. EMISIONES GLOBALES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO POR SECTOR**

## 1.2. MARCO EUROPEO.

En vista de la sensibilización por el cambio climático y las emisiones de CO<sub>2</sub> ha ido en aumento en las últimas décadas, cada país ha aportado su granito de arena en mayor o menor medida. El 11 de diciembre de 1997 los países más industrializados se comprometieron en Kioto, Japón, a un conjunto de medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, conformando el conocido como Protocolo de Kioto, pero no entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005. Para noviembre de 2009, eran 187 los estados que lo habían ratificado.

Este es un protocolo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero entre los que se encuentran el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Los otros tres son gases industriales fluorados: HFC, PFC y SF<sub>6</sub>.

Los gobiernos de dichos países pactaron una reducción de emisiones de al menos un 5% en promedio, tomando como referencia los niveles de 1990; objetivo a alcanzar entre 2008 y 2012. Se trata de un compromiso global y cada país tiene sus propios compromisos de reducción de emisiones, es decir, no significa que cada país se comprometa a reducir sus emisiones en un 5%.

En la concreción del Protocolo, la Unión Europea fue un agente especialmente activo y se comprometió a reducir sus emisiones totales medias en un 8%, otorgando a cada país un margen distinto en función de diversas variables económicas y medioambientales. España se comprometió a limitar el aumento de sus emisiones un máximo del 15% en relación al año base.

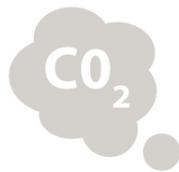
En el siguiente mapa se observa la posición de los diversos países en 2012 respecto del Protocolo de Kioto. Cuando este se firmó, Estados Unidos era el mayor emisor de gases e efecto invernadero y, sin embargo, nunca lo ratificó.



Ilustración 5. POSICIÓN DE LOS PAÍSES EN 2012 RESPECTO DEL PROTOCOLO DE KIOTO

Por otro lado, la Unión Europea fija nuevos objetivos en la Estrategia Europea de Desarrollo sostenible, el objetivo 20/20/20, que fija para 2020 los siguientes objetivos:

- 20% de energía a partir de fuentes renovables.
- 20% de mejora de eficiencia energética.
- 20% de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.



**20%**

LESS CO<sub>2</sub> EMISSIONS  
vs. 1990



**20%**

MORE RENEWABLE  
ENERGY USE



**20%**

LESS PRIMARY  
ENERGY USE

Ilustración 6. OBJETIVO 20/20/20

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE FABRICACIÓN DEL PAPEL.

El papel es un material compuesto por celulosa que se transforma en pasta en procesos mecánicos y químicos. Sin duda, la utilización del papel como medio para expresar y transferir ideas y pensamientos, ha sido de gran importancia para la comunicación a lo largo de la historia de la humanidad.

El papel es una estructura obtenida en base a fibras vegetales de celulosa, las cuales se entrecruzan formando una hoja resistente y flexible. Las propiedades de este, se agrupan en mecánicas y visuales. Entre las propiedades mecánicas se encuentran la rigidez, la resistencia y capacidad de absorción de agua, entre otros. No será lo mismo tener como objetivo un papel destinado a la escritura, que un papel de envolver, una cartulina o un cartón.

### El esqueleto de un árbol

Cada árbol tiene al menos un tronco que se inicia después de las raíces y termina en una copa de múltiples ramas. Desde su parte externa al interior, está formado por:

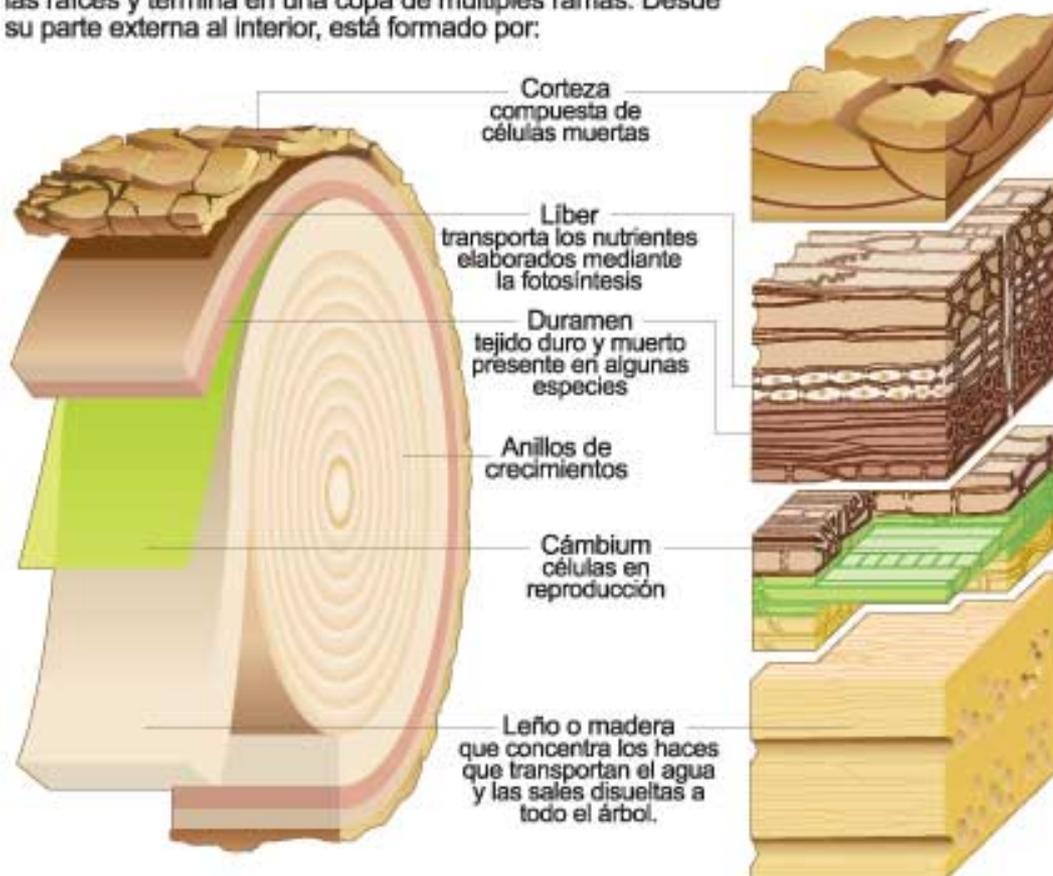


Ilustración 7. SECCIÓN DE UN ÁRBOL

Por otro lado, entre las propiedades visuales, se encuentran la blancura. El brillo o la opacidad, que convierten el papel en un medio apropiado para la escritura, por ejemplo. Otras propiedades importantes son el gramaje (peso en gramos por metro cuadrado de papel), la estabilidad dimensional (capacidad de mantener sus dimensiones originales al variar las condiciones ambientales o al verse sometido a esfuerzos) y la humedad.

El proceso de fabricación de papel comprende diversas etapas entre la tala del árbol y el producto final para consumo. Todo comienza haciendo la pasta de celulosa. Para ello, el primer paso es obtener la madera.

La madera es obtenida de manera sostenible de bosques cultivados para tal fin. Se eliminan todas las ramas, dejando únicamente el tronco principal, y se traslada en camiones a la fábrica. Una vez allí, se descortezan, es decir, se les quita toda la capa exterior. Se pica en pequeñas partes o astillas por una máquina llamada chipeadora y se acumula en grandes pilas a la espera de ser utilizadas. Las ramas y cortezas previamente mencionadas, serán la biomasa empleada en la planta de valorización energética, objetivo del presente trabajo.

Posteriormente, se lleva a cabo un tratamiento a base de productos químicos y agua formando una pasta en un gran recipiente denominado pulper. El objetivo es eliminar las fibras indeseables de la manera, como es el caso de la lignina, dejando únicamente la celulosa.

La pasta de celulosa se deposita en tambores donde se agregan productos químicos para blanquearlas, tales como dióxido de cloro, peróxido y soda cáustica. Una vez blanqueada, se pasa por una cinta transportadora que pasa por unos rodillos con calor para secarla.

Llegados a este punto, es el momento de comenzar a fabricar el papel. Se deja caer la pasta de celulosa sobre una tela donde se produce la formación de la hoja por el entrecruzamiento de las fibras, eliminándose a su vez el exceso de agua mediante presas por presión y succión.

La hoja de papel húmeda pasa por distintos grupos de cilindros secadores que le aplican calor para conferirle diferentes cualidades incluyendo peso, superficie, brillo o suavidad. En dichos rodillos se producen los procesos de calandrado y estucado: un cilindro de gran diámetro aplasta la hoja de papel para alisarlo y después se le aplica un baño de almidón con el cual se sella la superficie del producto. Posteriormente, se hace pasar el papel por unos

rodillos de acero para proporcionarle tersura y un espesor homogéneo para, finalmente, enrollarlo para ser bobinado y/o cortado a las medidas requeridas.

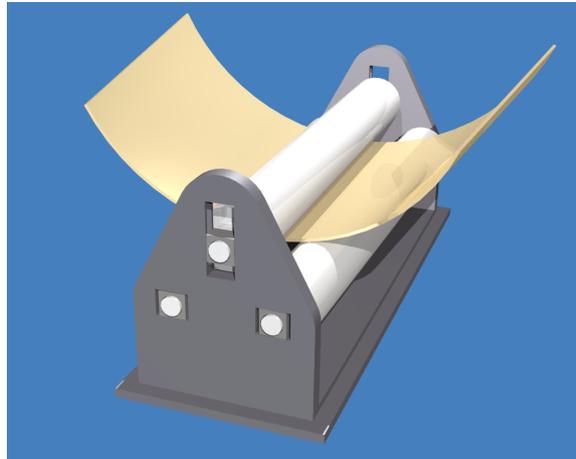


Ilustración 8. CALANDRADO DEL PAPEL

A continuación, se muestra un esquema del proceso productivo de fabricación del papel previamente descrito, con los distintos pasos a seguir.

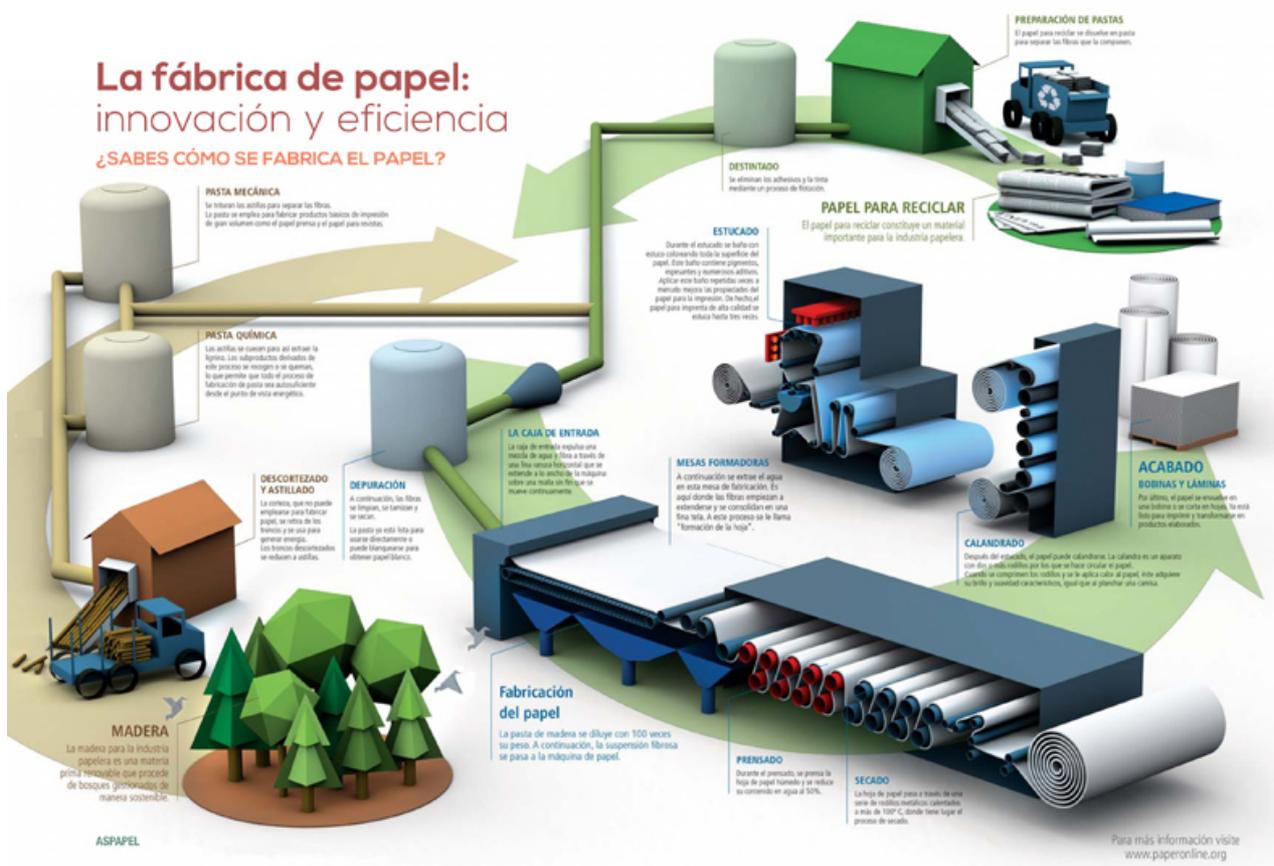


Ilustración 9. ESQUEMA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE FABRICACIÓN DEL PAPEL

### 3. OBJETIVOS Y ALCANCE.

El presente trabajo tiene dos objetivos principales. Por un lado, se quiere autoabastecer, en la medida de lo posible, con una planta de biomasa, a la fábrica de papel integral. El residuo empleado para tal fin serán las partes de la madera.

Por otro lado, al emplear biomasa como combustible, se cumpliría el segundo objetivo: reducir el consumo de energías no renovables como los combustibles fósiles.

El proyecto abarca las siguientes fases:

- Descripción del proceso de fabricación del papel.
- Estudio de las diferentes alternativas en cuanto al tipo de caldera.
- Elección de la alternativa más apropiada.
- Descripción de la planta de biomasa.
- Descripción del funcionamiento de la instalación.
- Descripción de los distintos elementos que conforman la instalación.
- Dimensionamiento de la planta.
- Estudio económico del proyecto.
- Planificación del proyecto.
- Análisis y recomendaciones una vez realizadas las fases previas.

## 4. ALTERNATIVAS.

Una vez obtenidos los residuos de la papelera, se emplearán como combustible. Para ello, se deberá escoger el tipo de caldera más adecuada para tal fin, en función de factores energéticos y económicos. Se intentará obtener la mayor eficiencia posible manteniendo una relación razonable con su precio.

A continuación, se muestran las alternativas a tener en cuenta a la hora de aprovechar la biomasa que nos ofrece nuestra planta. Se explicará el funcionamiento de cada tipo de caldera y se expondrán sus ventajas e inconvenientes. Finalmente, se escogerá la más adecuada de acuerdo a las necesidades de la planta.

### 4.1. COMBUSTIÓN DIRECTA.

La denomina combustión a la reacción química que se produce entre el oxígeno y un material oxidable, que va acompañada de un desprendimiento de energía térmica. Desde el punto de vista funcional, es el conjunto de procesos físico-químicos por los cuales se libera controladamente parte de la energía interna del combustible que se manifiesta al exterior en forma de calor, para ser aprovechado dentro de un horno o una caldera. En el caso que ocupa al presente proyecto, el combustible serán los residuos de la papelera.

Tradicionalmente, la biomasa se ha empleado en pequeñas calderas domésticas para la generación de calor. En general, se trata de sistemas de limitada eficiencia energética y de uso local que no requieren de un tratamiento previo complejo del combustible. Para su aprovechamiento industrial, sin embargo, ha sido necesario recurrir a instalaciones mayores, basadas en la generación de vapor a altas temperaturas. Atendiendo a las tecnología empleada, distinguimos dos tipos de calderas: la caldera de lecho fijo o parrilla y la caldera de lecho fluido.

Estos dos tipos de calderas se exponen a continuación, con sus respectivas descripciones, dejando en evidencia las diferencias entre ambas y, por lo tanto, las ventajas y desventajas de una respecto de la otra.

#### 4.1.1. CALDERA DE LECHO FIJO O PARRILLA.

La caldera de lecho fluido o de parrilla, es la caldera más sencilla, barata y común, ya que alrededor del 90% de las calderas son de este tipo debido a su fiabilidad y bajos costes de mantenimiento. Sin embargo, se generan muchos inquemados y las condiciones de humedad y granulometría son exigentes.

El combustible, en astillas o trozos de varios centímetros, se introduce sobre unas placas vibrantes o parrillas inclinadas, por las que avanza la biomasa según la demanda requerida. Por debajo de las parrillas, se realiza una primera inyección de aire para refrigerarlas y suministrar comburente. A su vez, por arriba se hace una segunda inyección de aire para favorecer la combustión de los elementos volátiles.

Al final de las parrillas, se recoge la ceniza del residuo que no se ha podido valorizar, pudiéndose emplear posteriormente con otros fines, como abono, por ejemplo. En las siguientes imágenes, se muestra un esquema del funcionamiento explicado y una imagen real de la caldera.

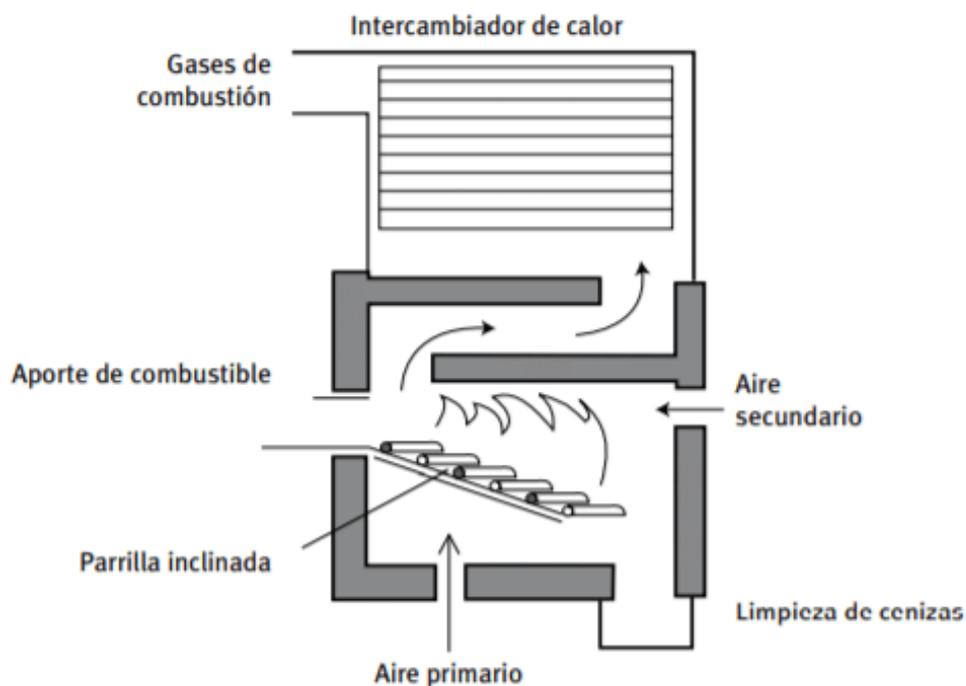


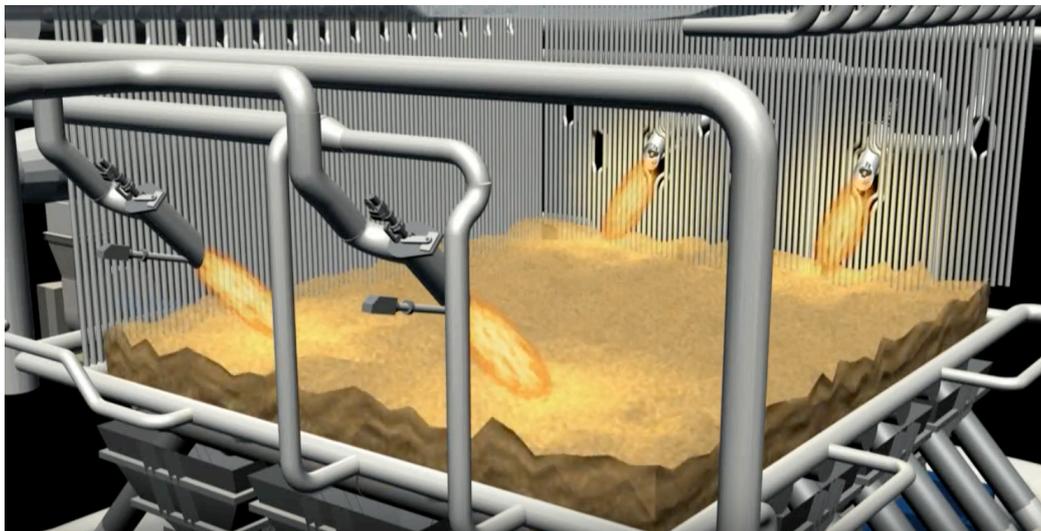
Ilustración 10. ESQUEMA DE CALDERA DE PARRILLA



**Ilustración 11. IMAGEN DE CALDERA DE PARRILLA**

#### **4.1.2. CALDERA DE LECHO FLUIDO.**

La combustión en lecho fluido se produce a través de inyección de aire con la que se mueve arena caliente que varía su densidad para controlar la temperatura en la caldera. El combustible se reduce a tamaños menores (milímetros) y se mantiene en suspensión junto a las partículas de arena, conformando el lecho. La mezcla de aire y arena en movimiento funciona como un líquido. Cuando la biomasa se ha quemado, los residuos caen por debajo al tener una densidad mayor. En la siguiente imagen se muestra una caldera de lecho fluido.

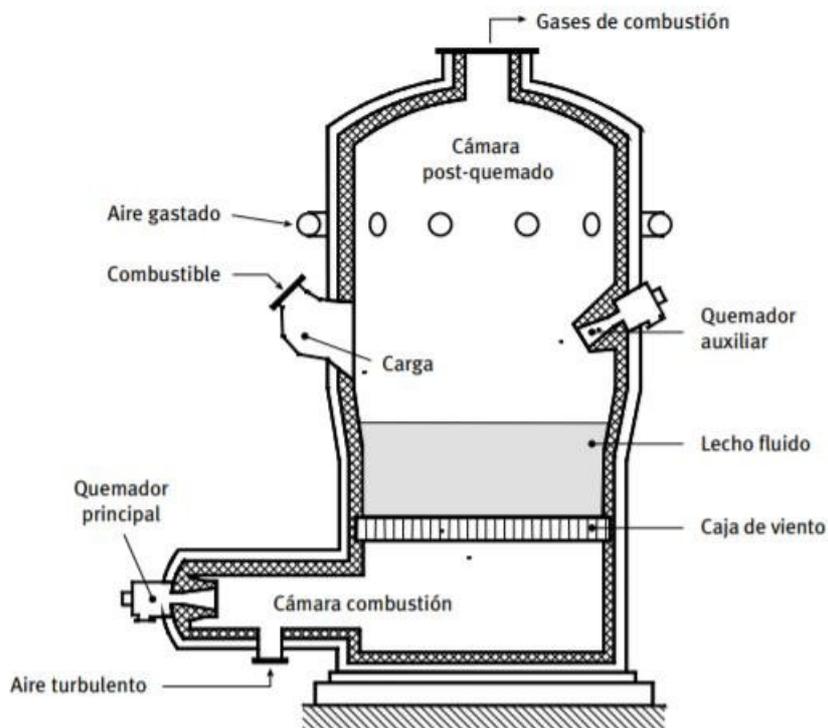


**Ilustración 12. CALDERA DE LECHO FLUIDO**

Existen dos tipos de calderas de lecho fluido:

### **CALDERA DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE.**

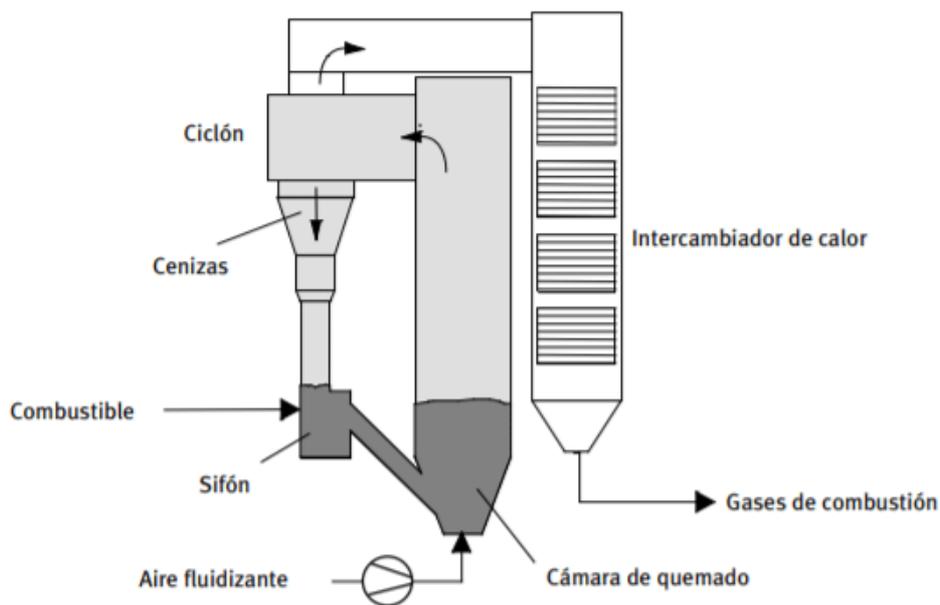
Se utilizan con combustibles con bajo poder calorífico y alta humedad. El combustible se inyecta al lecho de arena y perdura hasta la combustión completa de la biomasa, por lo que el lecho tiene una temperatura muy elevada. Son más complejas y caras pero, a su vez, controlan muy bien las emisiones y son muy eficientes.



**Ilustración 13. CALDERA DE LECHO FLUIDO BURBUJEANTE**

### **CALDERA DE LECHO FLUIDO CIRCULANTE.**

Se emplean con combustibles difíciles de quemar o con combustibles muy caros con el fin de extraerles la mayor energía posible. Se trata de un proceso lento, a baja temperatura, donde hay arena circulando a lo largo de toda la caldera. Son las más difíciles de manejar y las más caras, pero son muy eficientes y es el tipo de tecnología más avanzado, ya que se pueden quemar residuos de cualquier tamaño y granulometría.



**Ilustración 14. CALDERA DE LECHO FLUIDO CIRCULANTE**

## 4.2. GASIFICACIÓN.

La gasificación es un proceso termoquímico en el que un sustrato carbonoso, como es la biomasa, es transformado en un gas combustible mediante una serie de reacciones que ocurren en presencia de un agente gasificante ya sea aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno. La biomasa y el agente gasificante son los parámetros que determinan el mayor o menor contenido en energía (poder calorífico) del gas.

En esencia, la gasificación es el proceso de conversión de biomasa sólida en un gas combustible que contiene monóxido de carbono e hidrógeno por medio de un proceso termoquímico. Este proceso se cumple en una cámara cerrada y sellada que opera por debajo de la presión atmosférica.

Este proceso se desarrolla en varias etapas, comenzando por el secado. En esta primera etapa, el agua contenida en la biomasa es eliminada a una temperatura superior a los 100°C. Después se lleva a cabo la pirolisis, donde la biomasa experimenta una descomposición térmica en ausencia de oxígeno. Posteriormente, se introduce aire a temperaturas muy elevadas de entre 700°C y 2000°C, para llevar a cabo los procesos de oxidación y reducción. A continuación, se muestra un gasificador con sus diferentes etapas.

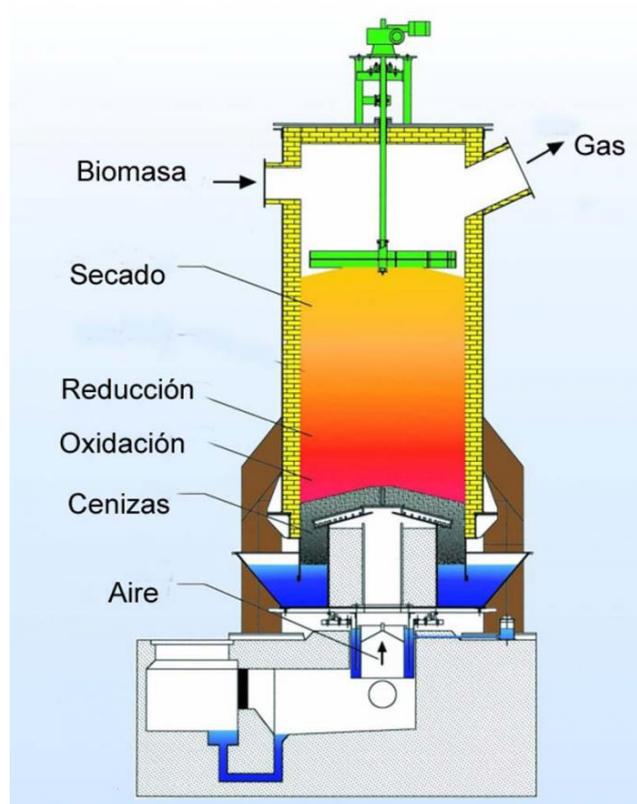


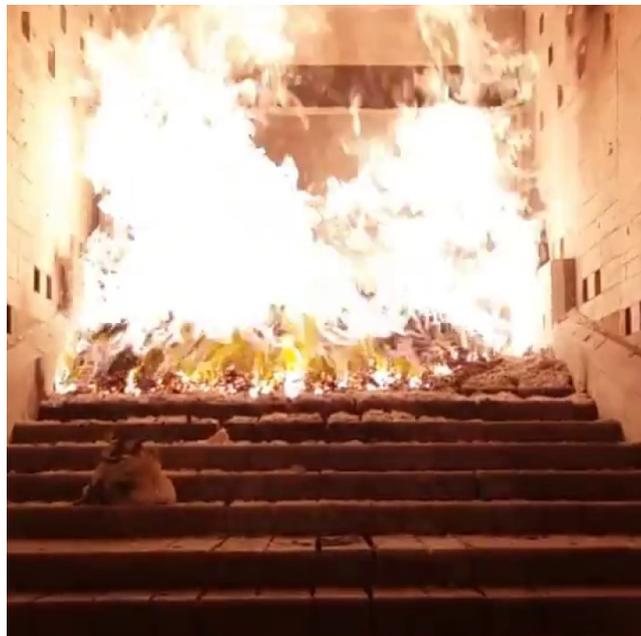
Ilustración 15. ESQUEMA DE UN GASIFICADOR

## 5. ALTERNATIVA SELECCIONADA.

En vista de las 3 opciones posibles, se escogerá la más adecuada teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes, tanto energéticos como económicos, de cada una de ellas. Estas se exponen a continuación.

Las calderas de lecho fluido controlan mejor las emisiones y son más eficientes que las de lecho fijo. Sin embargo, conllevan una serie de exigencias económicas. Las astillas a introducir, han de ser de menor tamaño y trocearlas acarrea un gasto. Su funcionamiento es más complejo y son más difíciles de manejar. La gasificación es aún más eficiente que las alternativas anteriores, pero también más costosa, tanto en la inversión inicial como en costes de mantenimiento.

Poniendo en una balanza lo antes mencionado y teniendo en cuenta que la biomasa es residuo de una fábrica de papel, se optará por la caldera de parrilla. En este tipo de calderas, la reducción en la eficiencia es muy pequeña en comparación con la gran reducción en costes de mantenimiento e inversión inicial.



**Ilustración 16. CALDERA DE PARRILLA EN FUNCIONAMIENTO**

## 6. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA.

### 6.1. FUNCIONAMIENTO DEL CICLO.

La planta de biomasa se va a basar en un ciclo Rankine. Inicialmente se expondrá el ciclo Rankine ideal para posteriormente extrapolarlo a la realidad. El ciclo Rankine ideal es un ciclo simple de vapor sin irreversibilidades, es decir, no existirán pérdidas de presión por rozamiento en la caldera y el condensador. En ausencia de irreversibilidades y sin transferencia de calor al entorno, los procesos en la turbina y la bomba serán isoentrópicos. A continuación, se muestra un ciclo Rankine con los componentes principales, que se expondrán posteriormente.

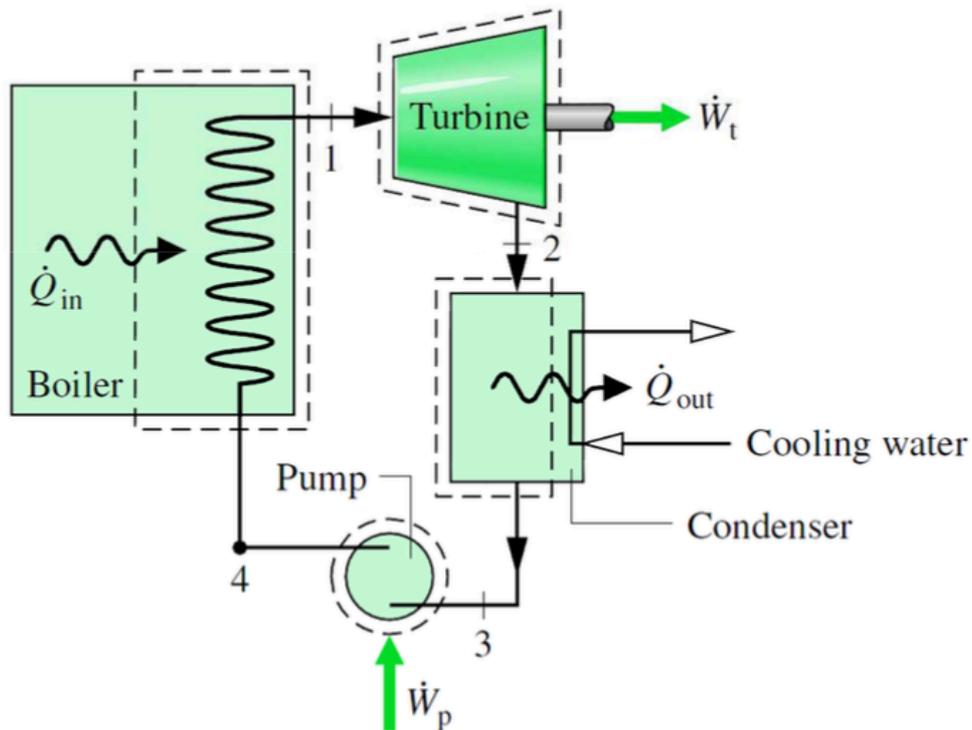
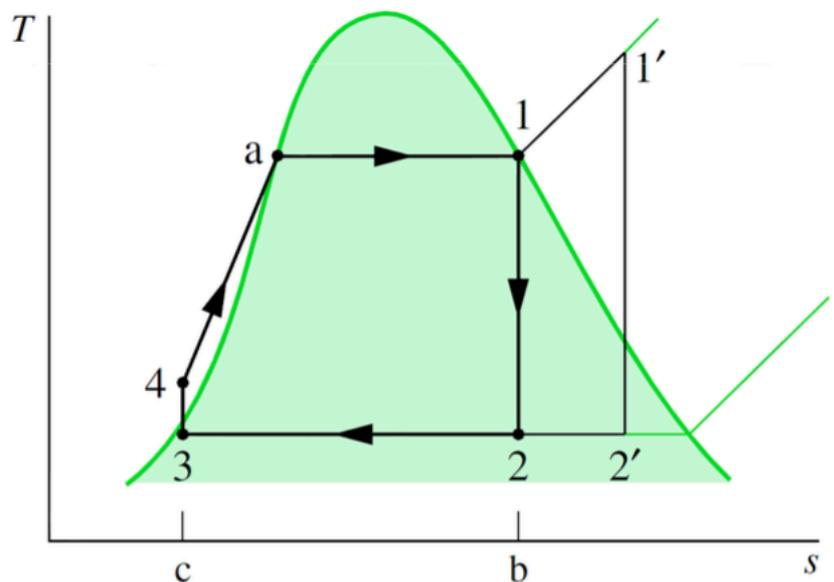


Ilustración 17. CICLO RANKINE

El ciclo Rankine ideal consta de los siguientes procesos:

- Proceso 1-2: Expansión isoentrópica en la turbina. La presión del líquido termodinámico disminuye hasta llegar a la presión del condensador. El vapor saturado que se extrae de la turbina es el encargado de transmitir la energía al transformador acoplado, convirtiéndola en energía eléctrica aprovechable.

- Proceso 2-3: Enfriamiento isobárico en el condensador. Se produce un intercambio de calor entre el fluido de trabajo y agua líquida que circula por el condensador. Al final del proceso, el fluido de trabajo está en forma de líquido saturado.
- Proceso 3-4: Compresión isoentrópica en la bomba. La presión aumenta hasta la presión de la caldera. Es necesario aplicar un trabajo para dicho proceso, pero es mucho menor que el obtenido en la turbina.
- Proceso 4-1: Calentamiento isobárico en la caldera de biomasa. Por medio de la combustión del residuo, el fluido de trabajo se evapora hasta encontrarse en forma de vapor saturado.



**Ilustración 18. PROCESOS DEL CICLO RANKINE**

Al ser procesos internamente reversibles, las áreas bajo las curvas representan el intercambio de calor por unidad de masa.

CALOR ABSORBIDO POR LA CALDERA A CIERTA TEMPERATURA MEDIA:

$$\left(\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}\right)_{int rev} = \int_4^1 T ds = \text{área } 1 - b - c - 4 - a - 1 = \overline{T}_{in}(s_1 - s_4)$$

CALOR CEDIDO EN EL CONDENSADOR:

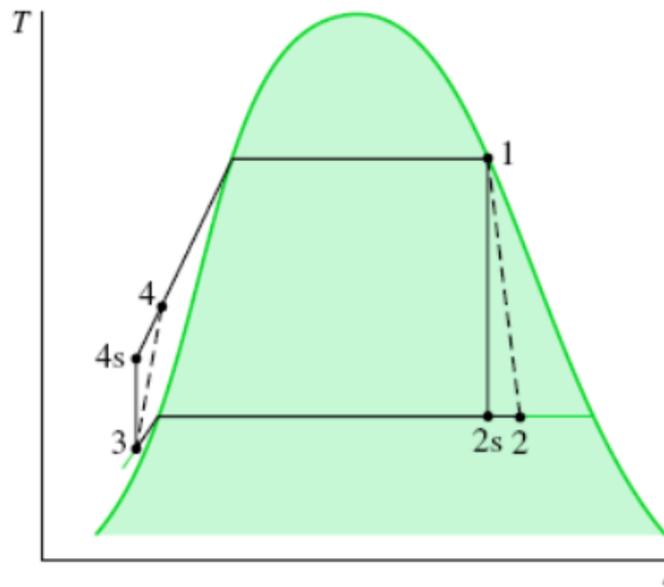
$$\left(\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}\right)_{int rev} = T_{out}(s_2 - s_3) = \text{área } 2 - b - c - 3 - 2 = T_{out}(s_1 - s_4)$$

**RENDIMIENTO TÉRMICO:**

$$\eta_{ideal} = 1 - \frac{\left(\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}}\right)_{int rev}}{\left(\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}}\right)_{int rev}} = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

**PRINCIPALES IRREVERSIBILIDADES Y PÉRDIDAS:**

- La principal irreversibilidad está asociada con la expansión en la turbina. El calor transferido al ambiente por la turbina es normalmente de importancia secundaria.
- El trabajo requerido por la bomba para vencer los efectos del rozamiento, también reduce el trabajo neto producido por la planta. En ausencia de transferencia de calor con el ambiente, la entropía crece a través de la bomba.



**Ilustración 19. CURVA DEL CICLO CON RENDIMIENTOS ISOENTRÓPICOS**

**RENDIMIENTOS ISOENTRÓPICOS**

TURBINA

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

BOMBA

$$\eta_p = \frac{\left(\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}}\right)_s}{\left(\frac{\dot{W}_p}{\dot{m}}\right)} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$$

- Las fuentes más significativas de irreversibilidad están asociadas con la combustión del combustible y la consiguiente transferencia de calor desde los productos de combustión calientes al fluido de trabajo del ciclo.
- A pesar de la gran cantidad de energía que retira el agua de refrigeración, su utilidad es limitada. Para condensadores en los que el vapor condensa a una temperatura cercana a la del ambiente tiene una utilidad limitada (poca exergía).
- Pérdidas de calor a través de las superficies de los equipos.
- Efectos de rozamiento que provocan caídas de presión en el fluido.

## 6.2. ELEMENTOS DE LA INSTALACIÓN.

A continuación, se expone la descripción de los diferentes elementos principales de la instalación: la caldera, la turbina de gas, el condensador, la bomba, el desgasificador y el transformador. Tal y como se ha expuesto anteriormente, la instalación seguirá un ciclo de Rankine simple prácticamente con los mismos elementos, a excepción del desgasificador que se introducirá para optimizar el funcionamiento y evitar ciertas complicaciones que se expondrán posteriormente.

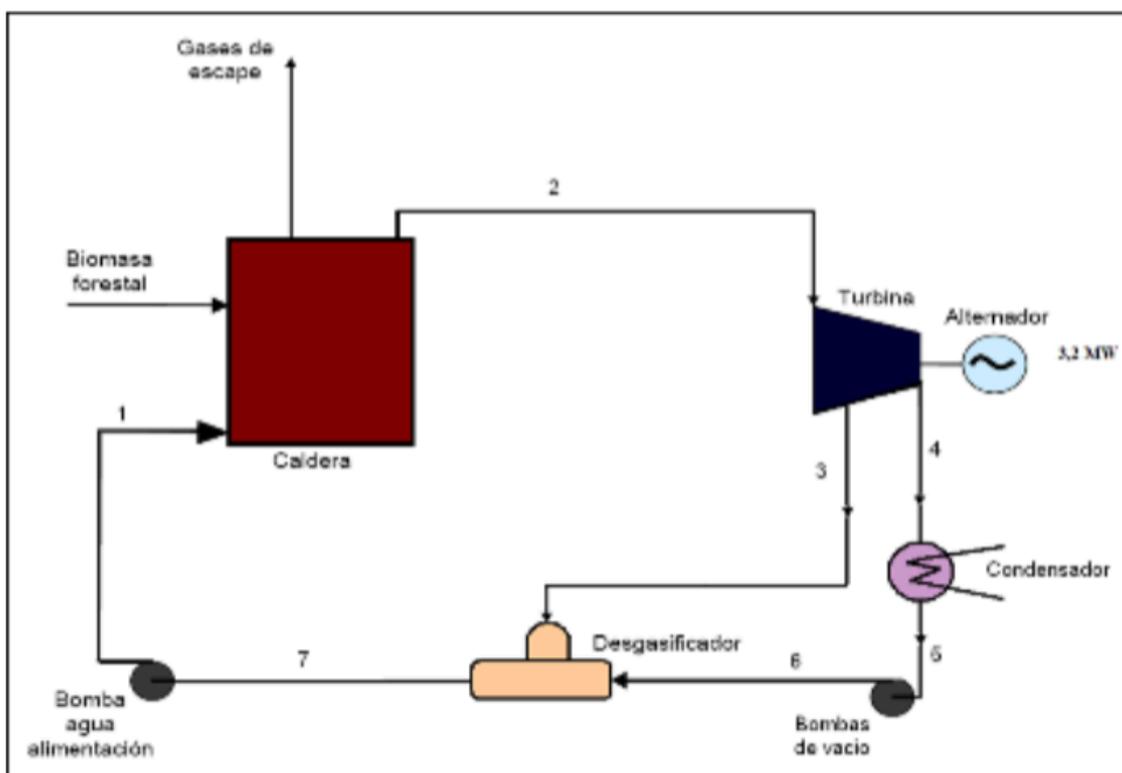


Ilustración 20. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN

### 6.2.1. CALDERA.

En la caldera se lleva a cabo la combustión de la biomasa. Tal y como se exponía en el apartado 5. *Alternativa Seleccionada*, de acuerdo al tipo de residuo y a los requerimientos energéticos y económicos, la caldera será de tipo parrilla.

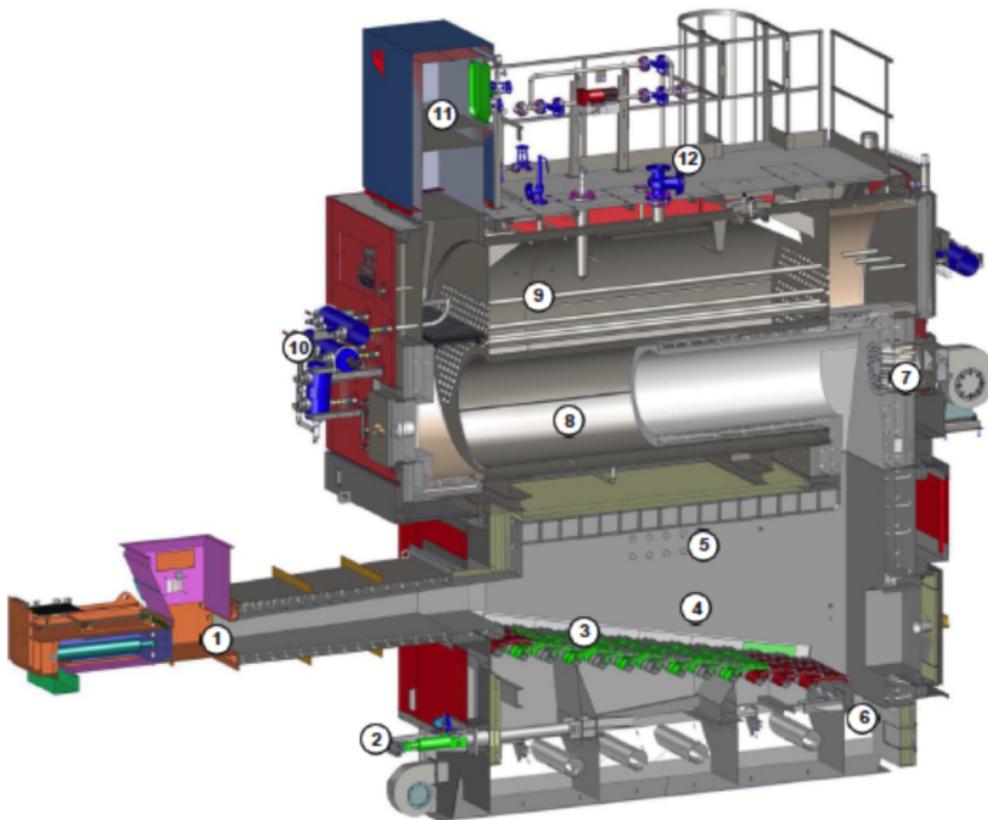


Ilustración 21. CALDERA DE BOMASA

Las astillas entran en la caldera y se lleva a cabo la quema de las mismas. Esta combustión calienta las tuberías, colocadas a una altura suficiente como para que los humos lleguen en estado gas y no magma, por las que circula el fluido de trabajo provocando su evaporación. Las cenizas caen por gravedad por las placas inclinadas de la parrilla y se extraen.

### 6.2.2. GRUPO TURBINA-ALTERNADOR.

La turbina de vapor es una turbomáquina 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 (vapor) y el rodete, componente principal de la turbina, que cuenta con palas o álabes para realizar el intercambio energético.

En una turbina se pueden distinguir dos partes principales: el rotor y el estator. El rotor constituye la parte móvil de la turbina y está formado por ruedas de álabes unidas al eje. El estator también está formado por álabes, no unidos al eje si no a la carcasa de la turbina.

El vapor de agua producido en la caldera se encuentra a gran presión y velocidad. A través de unas toberas se conduce el vapor hasta la turbina, golpeando los álabes y haciendo girar el rotor.

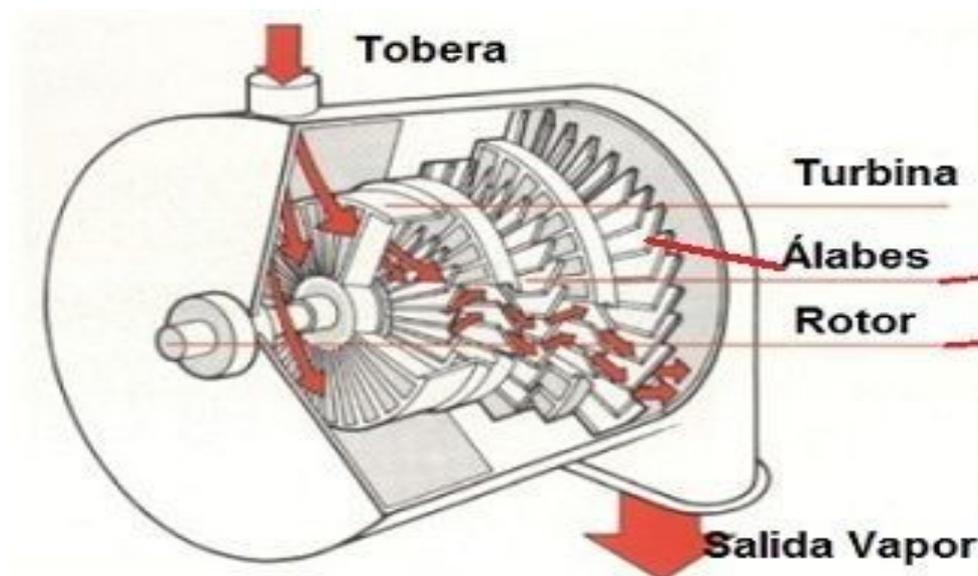


Ilustración 22. ESQUEMA DE LA TURBINA

El rotor se encuentra acoplado a un generador de electricidad. Un generador eléctrico es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en eléctrica.

El generador eléctrico está formado por una o más bobinas de hilos de cobre (enrollamientos de hilo de cobre en un núcleo) y por imanes que generan un campo magnético muy potente. Las bobinas giran en el interior del campo magnético generado por los imanes, transformando esta energía mecánica de rotación en eléctrica. De este modo, se alcanzará el objetivo de obtener energía eléctrica de la combustión de biomasa.

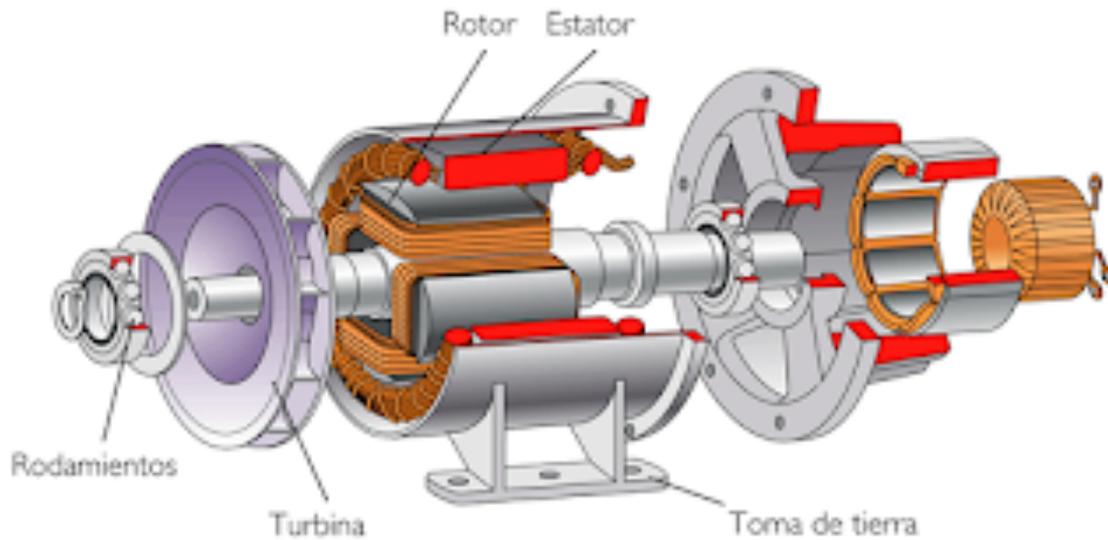


Ilustración 23. ESQUEMA DEL CONJUNTO TURBINA-ALTERNADOR

### 6.2.3. CONDENSADOR.

Una vez que el vapor sale de la turbina, se lleva al condensador. La función principal de este es ser el foco frío o sumidero de calor dentro del ciclo termodinámico, es decir, mediante un intercambio de calor entre el fluido de trabajo y otra corriente de agua, el primero se enfría y pasa de fase gas a fase líquida.

El propósito del condensador es provocar el cambio de estado del vapor a la salida de la turbina para así obtener máxima eficiencia y obtener el vapor condensado en forma de agua pura de regreso a la caldera para repetir nuevamente el ciclo.

Por otro lado, este proceso provoca la reducción de la presión a la salida del condensador, incluso por debajo de la atmosférica, por lo que el salto de presión es mayor y, por lo tanto, el rendimiento y la potencia de la turbina aumentan.

Las condiciones en el interior del condensador son de saturación, es decir, está a la presión de saturación correspondiente a la temperatura de condensación del vapor.



Ilustración 24. IMAGEN DEL CONDENSADOR

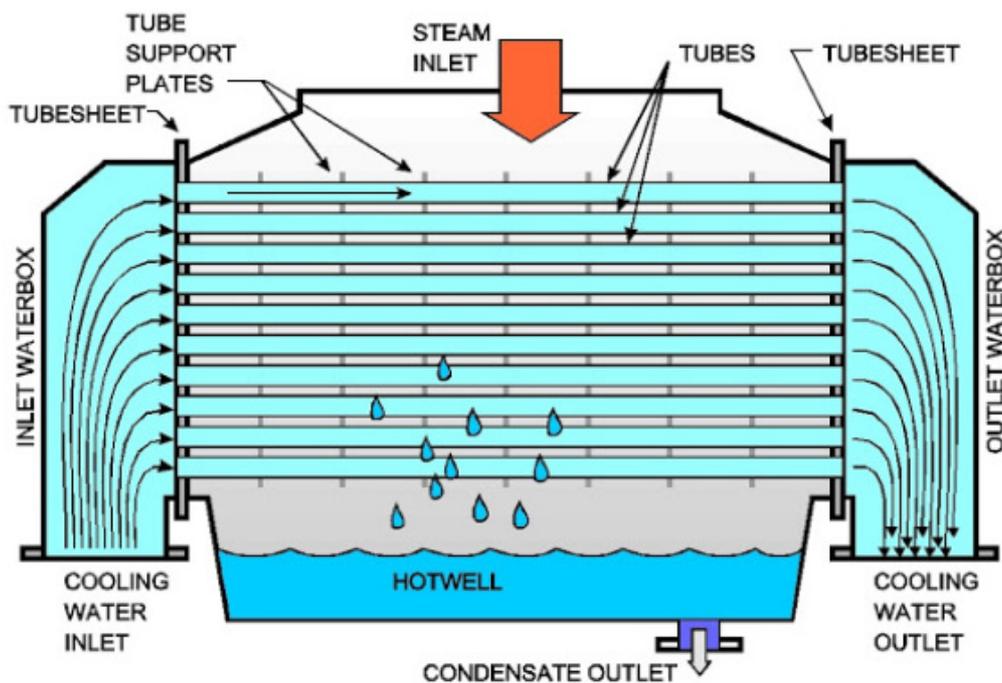


Ilustración 25. ESQUEMA DEL CONDENSADOR

#### 6.2.4. BOMBA.

Tal y como se ha expuesto, a la salida del condensador se reduce la presión del fluido de trabajo. Previamente a volver a introducirlo en la caldera, será favorable aumentar de nuevo la presión para tener un consumo energético menor que si se introdujese a presión reducida directamente en la caldera o en un compresor. Además, será necesario impulsar el

fluido desde su posición hasta la posición deseada. Para ello, se introduce una bomba hidráulica.

Una bomba hidráulica es una máquina capaz de transformar la energía con la que funciona (generalmente eléctrica o mecánica) en energía del fluido. Esto es, suministra al fluido el caudal y la presión necesarias.

La base de funcionamiento de estas bombas se basa en la hidrostática, en donde una variación de volumen genera una variación de presión. Constan de cilindros que aspiran líquido mediante unas aspas que al girar generan una corriente de succión. A continuación, unos pistones empujan el fluido, comprimiéndolo y dándole el empuje necesario para alcanzar la presión para realizar determinado trabajo.



**Ilustración 26. BOMBA HIDRÁULICA**

Tal y como se observa en la *Ilustración 20*, el sistema dispone de dos bombas. Una de vacío entre el condensador y el desgasificador y otra de agua de alimentación entre el desgasificador y la caldera para reiniciar el proceso. Ambas tienen los objetivos previamente expuestos.

### 6.2.5. DESGASIFICADOR.

Parte del fluido de trabajo que sale de la turbina, pasa al condensador, y de ahí al desgasificador a través de una bomba. El resto va directamente al desgasificador.

Los desgasificadores térmicos se utilizan para la eliminación del oxígeno presente en el agua de alimentación. Constan de dos cuerpos. El cuerpo superior donde se realiza la desgasificación y el cuerpo inferior donde se almacena el agua desgasificada.

El cuerpo superior está construido en acero inoxidable y consta de dos zonas de desgasificación y de un dispositivo para la purga de incondensables. El agua a desgasificar se introduce en la cabeza desgasificadora por la parte superior, a través de una boquilla pulverizadora, que atomiza el agua en el seno de la propia cabeza desgasificadora. El agua alcanza rápidamente la temperatura de servicio, y es realizada la primera desgasificación, donde se elimina la mayor parte del oxígeno.

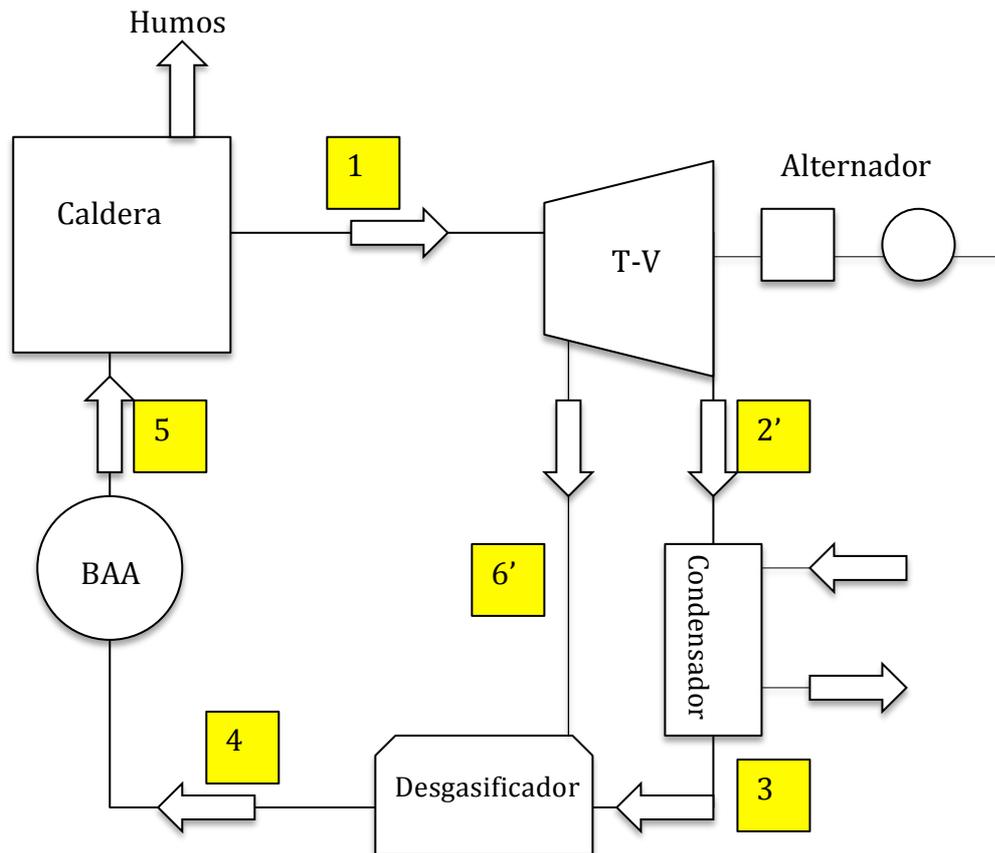
Posteriormente, el agua pasa a la segunda zona de desgasificación. Esta cámara de acero inoxidable consta de dos cuerpos concéntricos. El interior está perforado para permitir el paso del vapor, que en ascensión hacia la cabeza desgasificadora, se pone en contacto por segunda vez con el agua que baja a contracorriente. Esta agua burbujea y reduce aún más el contenido en gases incondensables. Por último, el agua desgasificada en su camino descendente pasa al depósito de almacenamiento.



Ilustración 27. DESGASIFICADOR

## 7. DIMENSIONAMIENTO DE LA PLANTA.

Se va a realizar un dimensionamiento de la planta de valorización energética de los residuos de la papelera. Para ello, de acuerdo a la cantidad de residuo del que se dispondrá y a la energía que se desea producir, se darán unos valores aproximados de los principales parámetros de la instalación.



**Ilustración 28. ESQUEMA DE LA INSTALACIÓN**

Sobre estas líneas se muestra el esquema de la instalación y se dispone de los siguientes datos:

### **DATOS DE DISEÑO:**

- $P_1=60$  bar
- $T_1=450$  °C
- $P_c= P_2= P_2'= P_3=0'1$  bar
- $P_D=3$  bar
- $T_D=105$  °C

- $T_{in}=17^{\circ}\text{C}$
- $T_{out}=22^{\circ}\text{C}$

#### DATOS DE PARTIDA:

- Cantidad de residuo: 43.500 toneladas/año
- $\text{PCI}=13.000 \text{ kJ/kg}$

#### DATOS DEL FABRICANTE:

- CALDERA
  - $\eta_c=0'84$
- TURBINA DE VAPOR
  - $\eta_s=0'7$
  - $\eta_M=0'9$
  - $\eta_E=0'96$
- BOMBA
  - $\eta_B=0'6$

#### DISPONIBILIDAD DE LOS EQUIPOS:

El fabricante se compromete a que los equipos estén trabajando 8000 horas al año. Un año tiene 8760 horas. Las 760 horas restantes se dedicarán a mantenimiento de los componentes.

| Sort | $P_i$ | $T_i$ | $h_i$ | $s_i$  | $x_i$ |
|------|-------|-------|-------|--------|-------|
| [0]  | 0,1   |       | 2100  | 6,633  |       |
| [1]  | 70    | 450   | 3287  | 6,633  |       |
| [2]  | 0,1   |       | 2456  | 7,749  |       |
| [3]  | 0,1   |       | 191,8 | 0,6493 | 0     |
| [4]  | 3     | 105   | 438,9 | 1,363  |       |
| [5]  | 70    |       | 438,9 | 1,341  |       |
| [6]  | 3     |       | 2792  | 7,149  |       |
| [7]  | 3     |       | 2579  | 6,633  |       |

Ilustración 29. ESTADOS DEL CICLO

Con toda esta información, se han realizado los cálculos pertinentes con el programa de cálculo EES. Estos se muestran en el apartado de *Anexos*. Así, se han obtenido los siguientes resultados:

Masa de vapor generada en la caldera:

$$\eta_c = \frac{m_v \cdot (h_1 - h_5)}{m_{madera} \cdot PCI} \rightarrow m_v = 5'291 \frac{kg}{s}$$

Trabajo necesario para la bomba:

$$W_B = \frac{m_v \frac{kg}{s} \cdot 0'001 \frac{m^3}{kg} \cdot (P_5 - P_4) \frac{kg}{m \cdot s^2}}{\eta_B} \rightarrow W_B = 59'08 \text{ kW}$$

Trabajo generado en la turbina:

$$W = m_v \cdot (h_1 - h_{2s}) \cdot \eta_S \cdot \eta_M \cdot \eta_E \rightarrow W = 3.798 \text{ kW}$$

$$W_e = W \cdot \frac{8000}{1000} \rightarrow W_e = 30.381 \frac{MWh}{año}$$

## 8. ESTUDIO ECONÓMICO.

Acorde a la potencia que se va a producir, que tal y como se ha expuesto en el apartado anterior es de 3.798 kW, se dispone de un presupuesto inicial de 15.600.000 €, desglosado del siguiente modo:

- Caldera: 4.500.000 €.
- Grupo Turbina-Alternador: 4.100.000 €.
- Equipos auxiliares: 1.500.000 €.
- Electrónica y Control: 900.000 €.
- Obra civil: 1.700.000 €.
- Montaje Mecánico: 1.600.000 €.
- Montaje Eléctrico: 1.300.000 €.

Con esta información, se procede a realizar el estudio económico:

### INGRESOS:

Los ingresos anuales por Energía Eléctrica serán de:

$$3.798 \text{ kW} \cdot 8000 \frac{\text{h}}{\text{año}} \cdot 90 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = 2.734.560 \text{ €}$$

### GASTOS:

- La obtención de la biomasa no supondrá ningún gasto puesto que proviene de la propia empresa de fabricación de papel.
- OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO: 1.600.000 €

El ahorro neto será la diferencia entre los ingresos y los gastos:

$$\text{Ahorro neto} = \text{Ingresos} - \text{Gastos} = 2.734.560 - 1.600.000 = 1.134.560 \text{ €}$$

Por tanto, solo queda por calcular el “Pay- Back” o TRS (Tiempo de Retorno Simple). Se trata de un cálculo aproximado del tiempo que se tardará en recuperar el desembolso inicial invertido en el proceso productivo del proyecto.

Este valor vendrá dado por la siguiente ecuación:

$$TRS = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Ahorro neto}} = \frac{15.600.000\text{€}}{1.134.560 \frac{\text{€}}{\text{año}}} = 13'75 \text{ años}$$

Los cálculos indican que la inversión se amortizará en 13 años y 9 meses. Sin embargo, el uso de energías renovables es subvencionado por los gobiernos a fondo perdido.

## 9. CRONOGRAMA.

El proyecto durará 24 meses desde que se acepte la rentabilidad del mismo hasta la puesta en marcha de la central. Se comenzará por la ingeniería básica, con una duración de 3 meses. Después se llevarán a cabo simultáneamente 3 hitos de distintas duraciones: la ingeniería de detalle (12 meses), la compra de los equipos previamente expuestos (10 meses) y la obra civil en el emplazamiento donde se ubicará la central (5 meses).

Una vez finalizada la ingeniería de detalle se comenzará con el montaje mecánico (3 meses), seguido del montaje eléctrico (3 meses) y finalizando con la puesta en marcha (3 meses).

Se muestra a continuación el cronograma con los hitos diferenciados y su duración a lo largo del tiempo mediante un diagrama de Gantt:

| HITOS                 | TIEMPO     |             |
|-----------------------|------------|-------------|
|                       | Primer Año | Segundo Año |
| INGENIERÍA BÁSICA     | 3 MESES    |             |
| INGENIERÍA DE DETALLE | 12 MESES   |             |
| COMPRA DE EQUIPOS     | 10 MESES   |             |
| OBRA CIVIL            | 5 MESES    |             |
| MONTAJE MECÁNICO      |            | 3 MESES     |
| MONTAJE ELÉCTRICO     |            | 3 MESES     |
| PUESTA EN MARCHA      |            | 3 MESES     |
| PROYECTO              | 24 MESES   |             |

Ilustración 30. CRONOGRAMA DEL PROYECTO

## 10. CONCLUSIÓN.

En vista de los resultados, se puede concluir que el proyecto cumple con los objetivos planteados en un principio. La planta de biomasa, que empleará los residuos de la propia fábrica de papel, producirá, tal y como se ha visto en el apartado 7. *Dimensionamiento de la planta*, 3'798 MW de potencia. Esto significa que no precisará tanta energía eléctrica de la red como antes, pudiendo autoabastecerse en la medida de lo posible.

Por otro lado, es evidente que este autoabastecimiento mediante energías renovables, contribuye a reducir el consumo de energías no limpias, alcanzándose así el segundo objetivo del trabajo.

Sin embargo, además de cumplir con los objetivos medioambientales y energéticos, se han de contemplar también los objetivos económicos. Gracias al análisis que se ha llevado a cabo en el apartado 8. *Estudio Económico*, se sabe que el TRS será menor de 14 años, con una inversión inicial de 15'6 millones de euros, unos ingresos anuales de 2'74 millones de euros y unos gastos anuales de 1'6 millones de euros en operación y mantenimiento.

Con todo esto, se concluye que, cumpliendo con los objetivos inicialmente propuestos, además el proyecto saldrá rentable y será acertado llevarlo a cabo.

## 11. FUENTES DE INFORMACIÓN.

- Icarito. Educación tecnológica, Sociedad y tecnología. Proceso productivo del papel.  
<http://www.icarito.cl/2010/08/74-9281-9-2-el-papel0-047619.shtml/>
- La Prestampa. Una trama para artes gráficas. Proceso de fabricación del papel.  
14/10/2014 Makertan. <https://laprestampa.com/el-proceso-grafico/materiales-productos-y-soportes/fabricacion-del-papel/>
- Aspapel. El papel, cómo se hace. <http://www.aspapel.es/el-papel/como-se-hace>
- LITEC. Laboratorio de investigación en tecnologías de la combustión. Combustión de biomasa. S. Jiménez. 2012.  
<http://www.energia2012.es/sites/default/files/Combustión%20de%20biomasa.pdf>
- Naukas. Energía sin CO2 un problema presente. Reducción de emisiones de CO2.  
18/12/2012. <https://naukas.com/2012/12/18/energia-sin-co2-un-problema-presente-reduccion-de-emisiones-de-co2/>
- Wikipedia. Consumo y recursos energéticos a nivel mundial. 17/06/2019.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Consumo\\_y\\_recursos\\_energéticos\\_a\\_nivel\\_mundial](https://es.wikipedia.org/wiki/Consumo_y_recursos_energéticos_a_nivel_mundial)
- Wikipedia. Gases de efecto invernadero. 13/06/2019.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Gas\\_de\\_efecto\\_invernadero](https://es.wikipedia.org/wiki/Gas_de_efecto_invernadero)
- Wikipedia. Protocolo de Kioto. 05/07/2019.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo\\_de\\_Kioto](https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto)
- ResearchGate. Centrales de biomasa: tipos de caldera y caso práctico. Manuel Domínguez. 10/2018.  
[https://www.researchgate.net/publication/328307481\\_CENTRALES\\_DE\\_BIOMASA\\_TIPOS\\_DE\\_CALDERA\\_Y\\_CASO\\_PRACTICO](https://www.researchgate.net/publication/328307481_CENTRALES_DE_BIOMASA_TIPOS_DE_CALDERA_Y_CASO_PRACTICO)
- Wikipedia. Gasificación. 21/11/2018. <https://es.wikipedia.org/wiki/Gasificación>

- Gasificación de biomasa. Estudios teórico-experimentales en lecho fijo. Juan Fernando Pérez Bayer. [https://books.google.es/books?id=SNMdS-ONUbgC&pg=PA75&lpg=PA75&dq=devolatilizadas&source=bl&ots=jplTAQNYe5&sig=ACfU3U1UnE7tOL-82j-FEUQV\\_HV1JJCdDw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiO-efUosbhAhWsAWMBHQ9TAeMQ6AEwB3oECACQAQ#v=onepage&q=devolatilizadas&f=false](https://books.google.es/books?id=SNMdS-ONUbgC&pg=PA75&lpg=PA75&dq=devolatilizadas&source=bl&ots=jplTAQNYe5&sig=ACfU3U1UnE7tOL-82j-FEUQV_HV1JJCdDw&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiO-efUosbhAhWsAWMBHQ9TAeMQ6AEwB3oECACQAQ#v=onepage&q=devolatilizadas&f=false)
- Universidad Tecnológica de Pereira. Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/7229/4237>
- Wikipedia. Turbina de Vapor. 13/07/2019. [https://es.wikipedia.org/wiki/Turbina\\_de\\_vapor](https://es.wikipedia.org/wiki/Turbina_de_vapor)
- Servitec. Calderas de vapor. Calderas de biomasa. <https://www.calderasvapor.com/calderas-biomasa/>
- Wikipedia. Generador eléctrico. 07/07/2019. [https://es.wikipedia.org/wiki/Generador\\_eléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Generador_eléctrico)
- Tecnoscar 2018. TIN I. 29/11/2017. [https://tecnoscar2012.blogspot.com/2017/11/turbina-alternador\\_29.html](https://tecnoscar2012.blogspot.com/2017/11/turbina-alternador_29.html)
- Área Tecnología. ¿Qué es una turbina de vapor? <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbina-de-vapor.html>
- Wikipedia. Condensador termodinámico. 10/12/2018. [https://es.wikipedia.org/wiki/Condensador\\_\(termodinámica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Condensador_(termodinámica))
- RENOVETEC. Ciclo agua-vapor. Condensador. Santiago García Garrido. 2016. <http://www.cicloaguavapor.com/condensador>

- CómoFunciona. Cómo funciona una bomba hidráulica. <http://como-funciona.co/una-bomba-hidraulica/>
- Youtube. Funcionamiento de una bomba hidráulica. Canal: Fedor Bancoff.  
<https://www.youtube.com/watch?v=SovFT4kqjLE>
- Cerney. Thermal Energy Engineering and Manufacturing. Equipos complementarios. Desgasificador. <https://www.cerney.es/productos/equipos-complementarios/desgasificador>

## ANEXOS

### "Datos del proceso"

m\_madera=1,38 {kg/s}  
t=8000 {h}  
PCI=13000 {kJ/kg}  
v=0,001 {m<sup>3</sup>/kg}

### "Datos diseño"

T\_in=17  
T\_out=22

### "Datos de fabricación"

n\_c=0,84  
n\_s=0,7  
n\_m=0,9  
n\_e=0,96  
n\_b=0,6

### "Estado 1"

P[1]= 70  
T[1]=450  
h[1]= enthalpy(water;T=T[1]; P=P[1])  
s[1]=entropy(water;T=T[1]; P=P[1])

### "Estado 2s"

P[0]=0,1  
s[0]=s[1]  
h[0]=enthalpy(water;P=P[0];s=s[0])

### "Estado 2"

P[2]=0,1  
n\_s=(h[1]-h[2])/(h[1]-h[0])  
s[2]=entropy(water;P=P[2];h=h[2])

### "Estado 3"

P[3]=0,1  
x[3]=0  
h[3]=enthalpy(water;P=P[3];x=x[3])  
s[3]=entropy(water;P=P[3];x=x[3])

### "Estado 4"

T[4]=105  
P[4]=3  
h[4]= 4,18\*T[4]  
s[4]=entropy(water;T=T[4];P=P[4])

### "Estado 5"

h[5]=h[4]  
P[5]=70  
s[5]=entropy(water;P=P[5];h=h[5])

### "Estado 6s"

P[7]=3  
s[7]=s[1]  
h[7]=enthalpy(water;P=P[7];s=s[7])

### "Estado 6"

P[6]=3  
n\_s=(h[1]-h[6])/(h[1]-h[7])

$s[6]=\text{entropy}(\text{water};P=P[6];h=h[6])$

"Masa de vapor generada en la caldera"

$n\_c=(m\_v*(h[1]-h[5]))/(m\_madera*PCI)$

"Trabajo generado en la turbina"

$W=m\_v*(h[1]-h[0])*n\_s*n\_m*n\_e$

$W\_e=W*8000/1000$

"Masa de agua del condensador"

$m\_v*(h[2]-h[3])=m\_w*4,18*(T\_out-T\_in)$

"Masa extraida de la turbina para el desgasificador"

$m\_v2*h[3]+m\_v1*h[6]=m\_v*h[4]$

$m\_v=m\_v2+m\_v1$

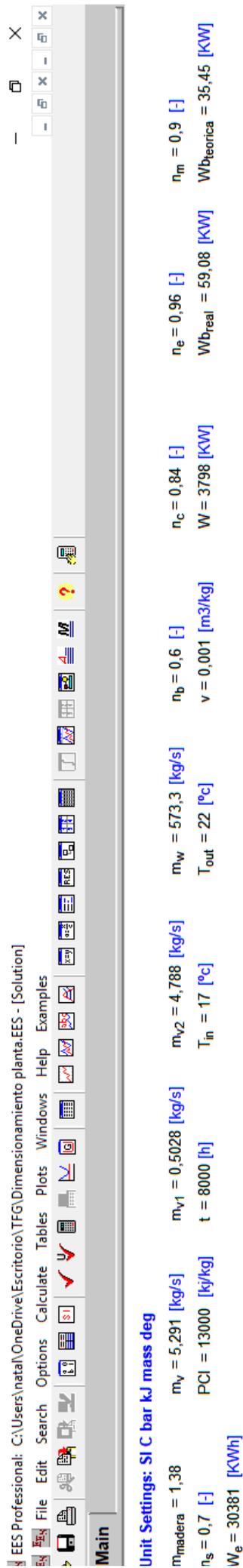
"Trabajo necesario para la bomba"

$Wb\_teorica=m\_v*v*(P[5]-P[4])*(10^5)*(1/1000)$

$Wb\_real=Wb\_teorica/n\_b$

|      | 1     | 2     | 3     | 4      | 5     |
|------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Sort | $P_i$ | $T_i$ | $h_i$ | $s_i$  | $x_i$ |
| [0]  | 0,1   |       | 2100  | 6,633  |       |
| [1]  | 70    | 450   | 3287  | 6,633  |       |
| [2]  | 0,1   |       | 2456  | 7,749  |       |
| [3]  | 0,1   |       | 191,8 | 0,6493 | 0     |
| [4]  | 3     | 105   | 438,9 | 1,363  |       |
| [5]  | 70    |       | 438,9 | 1,341  |       |
| [6]  | 3     |       | 2792  | 7,149  |       |
| [7]  | 3     |       | 2579  | 6,633  |       |

**Resultados:**



EES Professional: C:\Users\natal\OneDrive\Escritorio\TFG\Dimensionamiento planta.EES - [Solution]  
 File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples  
 Main  
**Unit Settings: SI C bar kJ mass deg**  
 $m_{madera} = 1,38$      $m_v = 5,291$  [kg/s]     $m_{v1} = 0,5028$  [kg/s]     $m_{v2} = 4,788$  [kg/s]     $m_w = 573,3$  [kg/s]     $n_c = 0,84$  [-]     $n_e = 0,96$  [-]     $n_m = 0,9$  [-]  
 $n_s = 0,7$  [-]    PCI = 13000 [kJ/kg]    t = 8000 [h]     $T_{in} = 17$  [°C]     $T_{out} = 22$  [°C]     $W = 3798$  [KW]     $W_{breal} = 59,08$  [KW]     $W_{bteorica} = 35,45$  [KW]  
 $W_e = 30381$  [KWh]     $v = 0,001$  [m<sup>3</sup>/kg]

Click on this line to see the array variables in the Arrays Table window

15 potential unit problems were detected.

Check Units

Calculation time = , 1 sec.