

Escuela Politécnica de  
Ingeniería de Minas y Energía  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*TRABAJO DE FIN DE GRADO*

**CARACTERIZACIÓN DE COMBUSTIBLES  
ALTERNATIVOS Y ESTUDIO DE CO-COMBUSTIÓN  
PARA SOLVAY TORRELAVEGA**  
**(CHARACTERIZATION OF ALTERNATIVE FUELS AND CO-  
FIRED RESEARCH FOR SOLVAY TORRELAVEGA)**

GRADO EN INGENIERIA DE LOS RECURSOS ENERGETICOS

Alumno: José Manuel Lavín García  
Coordinador: Raúl Husillos Rodríguez  
Tutor académico: Pablo Castro Alonso  
Tutor profesional: Carlos Aladjem Talvy

Septiembre-2017



## Agradecimientos

Me gustaría en primer lugar agradecer a la Universidad de Cantabria toda la ayuda recibida, conocimientos y capacidades adquiridas gracias al personal y profesorado de la Escuela Politécnica de Minas y Energía. En especial a mi tutor de Trabajo de Fin de Grado, Pablo castro, y al coordinador de Proyectos, Raúl Husillos, por la atención y ayuda facilitada en el presente trabajo.

Además, me gustaría también agradecer a Solvay Química S.L. y su equipo de personal, en especial a Carlos Aladjem, los cuales ayudaron aportándome nuevos conocimientos y la ayuda necesaria para la realización de este estudio, además de la confianza depositada en mi durante todo el tiempo que estuve con ellos realizando mis prácticas profesionales. También mis agradecimientos a Santiago Salguero, al facilitarme también posteriormente, la ayuda y datos necesarios tras mi marcha.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mis padres y hermanos y al resto de mi familia, a mi novia y a mis buenos amigos por su ayuda, cariño, apoyo y motivación recibidos durante todo este tiempo.

A todos, muchas gracias.

## Índice

1. Introducción .....	6
1.1 Problemática del cambio climático .....	6
1.1.1 Acción antrópica en el cambio climático.....	7
1.1.2 Combustibles fósiles.....	8
1.1.3 Consecuencias del cambio climático.....	9
1.2 Medidas frente al cambio climático .....	10
1.2.1 Uso de energías renovables .....	10
1.2.2 Protocolo de Kioto.....	11
1.3 Objetivos energéticos 2020.....	11
1.3.1 Unión Europea.....	11
1.3.2 España .....	12
2. Objetivos y alcance.....	13
3. Estado del arte.....	14
3.1 Estudio teórico .....	14
3.1.1 Biomasa .....	14
3.1.2 Estructura de la biomasa .....	16
3.1.3 Composición química de la biomasa .....	17
3.1.4 Poder calorífico.....	18
3.1.4.1 Poder calorífico superior (PCS).....	18
3.1.4.2 Poder calorífico inferior (PCI) .....	19
3.1.5 Tipos de biomasa.....	19
3.1.5.1 Residuos forestales.....	19
3.1.5.2 Residuos agrícolas leñosos y herbáceos.....	20
3.1.5.3 Cultivos energéticos .....	20
3.1.5.4 Biomasa residual de origen industrial .....	20
3.1.5.5 Residuos urbanos. ....	20
3.1.5.6 Residuos animales .....	21
3.1.6 Ventajas y desventajas .....	22
3.1.6.1 Ventajas.....	22
3.1.6.2 Desventajas .....	23
3.1.7 Usos de la biomasa.....	24
3.1.7.1 Calor y producción de vapor .....	24

---

3.1.7.2 Eléctrico .....	25
3.1.7.3 Combustibles líquidos. Biocombustibles.....	30
3.1.8 Marco legal y económico de las plantas de generación de energía eléctrica a partir de biomasa .....	31
3.2 Estudio práctico.....	34
3.2.1 Ensayos anteriores Solvay Torrelavega .....	34
3.2.1.1 Pruebas 2006.....	34
3.2.1.2 Prueba 2008 .....	37
3.2.2 Otros ensayos .....	39
3.2.2.1 Central térmica Velilla del Rio Carrión .....	39
4. Descripción del medio: Solvay Torrelavega.....	41
4.1 Localización .....	41
4.2 Justificación de alternativas .....	42
4.3 Descripción del medio .....	42
4.3.1 Planta térmica de carbón .....	42
4.3.1.1 Tolvas de descarga de carbón .....	43
4.3.1.2 Silos.....	45
4.3.1.3 Calderas .....	45
4.3.1.4 Tolvas de las calderas y pulverizadores.....	47
4.3.1.5 Quemador .....	48
4.3.1.6 Hogar de la caldera.....	49
4.3.1.7 Sobrecalentadores.....	49
4.3.1.8 Economizador.....	50
4.3.1.9 Calderín .....	50
4.3.1.10 Intercambiador de gases (calentador de aire) .....	50
5. Metodología .....	51
5.1 Caracterización de combustibles alternativos para Solvay Torrelavega.....	51
5.1.1 Combustibles alternativos cercanos a Torrelavega.....	52
5.1.1.1 localización .....	52
5.1.1.2 Biomasa en Cantabria.....	53
5.1.2 Parámetros sobre los que gira la caracterización .....	54
5.1.2.1 Disponibilidades .....	54
5.1.2.2 Logística.....	55

5.1.2.3 Naturaleza del combustible y proceso de producción .....	55
5.1.2.4 Análisis químico, granulométrica y factor de emisión .....	56
5.1.2.5 Índices de control .....	57
5.1.2.6 Coste del combustible .....	60
5.1.3 Análisis instalación de una trituradora.....	61
5.1.4 Resumen caracterización .....	61
5.2 Pruebas de co-combustión.....	62
5.2.1 Plan INNOVA 2016.....	62
5.2.2 Evaluación de la descarga.....	62
5.2.3 Dosificación desde el silo.....	63
5.2.4 Comportamiento en los molinos y tolvas.....	64
5.2.5 Comportamiento en el hogar de la caldera.....	64
5.2.6 Emisiones.....	65
6. Resultados .....	66
6.1 Caracterización de combustibles.....	66
6.1.1 Combustibles encontrados.....	66
6.1.1.1 Orujillo .....	66
6.1.1.2 Residuos del pino .....	67
6.1.1.3 Eucalipto .....	70
6.1.1.4 Arbustos energéticos.....	71
6.1.1.5 Combustible Sólido Recuperado (CSR).....	73
6.1.2 Localización de los centros de producción y logística empleada .....	74
6.1.3 Análisis químico, granulométrico y factor de emisión .....	75
6.1.4 Índices de control .....	83
6.1.5 Disponibilidades .....	88
6.1.6 Precios .....	91
6.1.7 Trituradora .....	92
6.2 Resultados de las pruebas.....	94
6.2.1 Pruebas con astilla “francesa” .....	94
6.2.1.1 Análisis de las muestras recibidas .....	94
6.2.1.2 Recepción y descarga de astilla “francesa” .....	95
6.2.1.3 Dosificación desde los silos .....	99
6.2.1.4 Combustión en la caldera.....	100

---

6.2.2 Prueba con astilla de Toranzo .....	102
6.2.2.1 Análisis de la muestra recibidas .....	102
6.2.2.2 Recepción y descarga de la astilla 3 “Toranzo” .....	102
6.2.3 Prueba con orujillo .....	103
6.2.3.1 Análisis de las muestras recibidas .....	103
6.2.3.2 Recepción y descarga de orujillo .....	104
6.2.3.3 Dosificación de orujillo .....	105
6.2.3.4 Combustión .....	105
6.2.4 Impacto ambiental .....	105
6.2.4.1 Reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> .....	105
6.2.4.2 Control de valores límites de emisión .....	106
7. Conclusiones.....	107
7.1 Conclusiones de la caracterización.....	107
7.2 Conclusiones de las pruebas .....	107
7.3 Conclusiones ambientales.....	108
8. Bibliografía.....	109
9. Anexo.....	112
9.1.1 Índice de tablas.....	112
9.1.2 Índice de imágenes.....	113
9.1.3 Índice de gráficas.....	115
9.1.4 Índice de formulas.....	115

## 1. Introducción

### 1.1 Problemática del cambio climático

El clima en el planeta Tierra nunca se ha mantenido estático, sino que ha ido variando en consecuencia con las alteraciones del balance energético del planeta. Esto es debido a la gran variedad de factores producidos en todas las escalas temporales, desde decenas de milenios hasta millones de años.

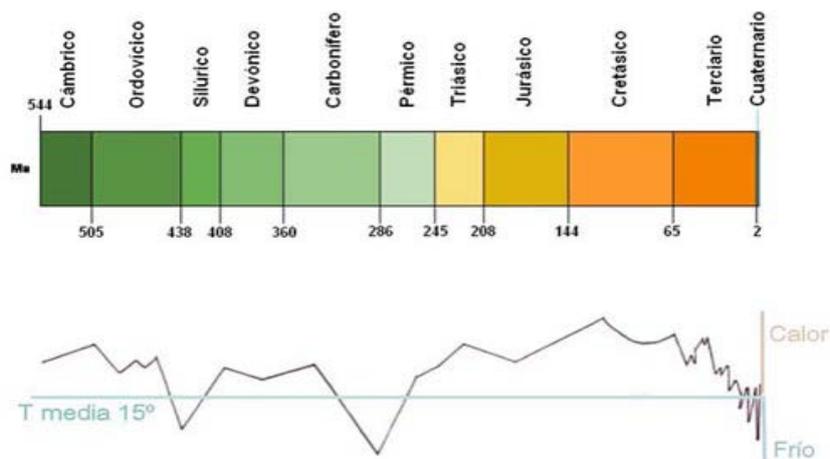


Ilustración 1. Evolución de la temperatura media a lo largo de la historia de la Tierra (fuente: <http://www.ccpems.exactas.uba.ar/cms/>)

EL cambio climático es conocido como la variación del clima global de la Tierra. Este fenómeno es debido tanto a acciones naturales como acciones humanas y tiene efectos sobre parámetros climáticos tales como las precipitaciones, la temperatura, nubosidad, etc.

El efecto invernadero se produce por la acción de la radiación solar al quedar retenida ésta por parte de una capa de gases de la atmósfera. Los rayos del sol calientan la superficie de la tierra y gases como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nítrico o el metano ayudan a que esta energía en forma de calor escape fuera de la atmósfera.

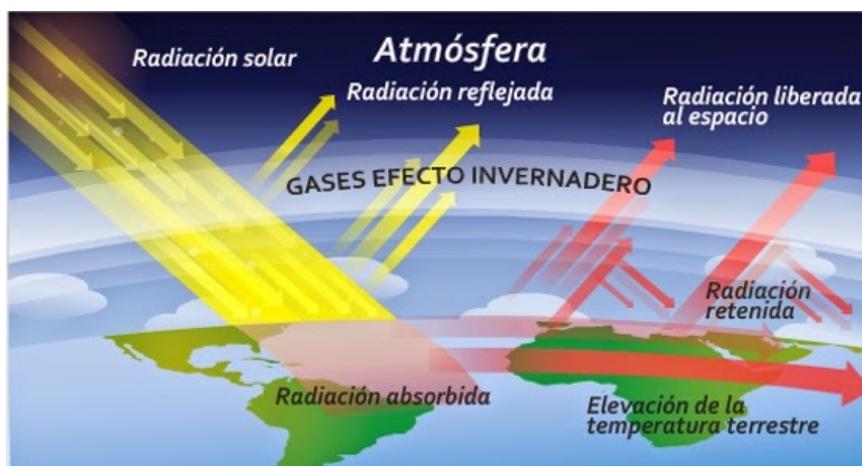


Ilustración 2. Efecto de los gases de efecto invernadero (fuente: <http://www.habanaradio.cu>)

Este fenómeno, producido por los gases de efecto invernadero mencionados en el párrafo anterior, posee un doble juicio ya que, por un lado, en las proporciones acertadas permiten las condiciones adecuadas para que exista la vida (sin ellos el clima sería demasiado frío), y por otro lado, un exceso de estos gases puede producir la situación a la que se enfrenta el planeta en actualmente, ayudando a producirse un aumento global de la temperatura que puede atentar contra las vida de los seres que lo habitan.

### 1.1.1 Acción antrópica en el cambio climático

El ser humano se ha convertido en uno de los agentes climáticos de mayor peso, haciéndolo relativamente en un periodo de tiempo pequeño si se compara con la edad de la Tierra.

La influencia del ser humano sobre el cambio climático comenzó en la antigüedad, la conversión de masas forestales en tierras de cultivo y pastoreo implicó una gran deforestación. Aunque en este caso, el influjo no tenía grandes repercusiones debido al ciclo cerrado del carbono. En este ciclo se intercambia el carbono entre la biosfera, la litosfera, la hidrosfera y la atmosfera de la Tierra, así que en este aspecto la acción antrópica no tuvo gran significación sobre el calentamiento global.

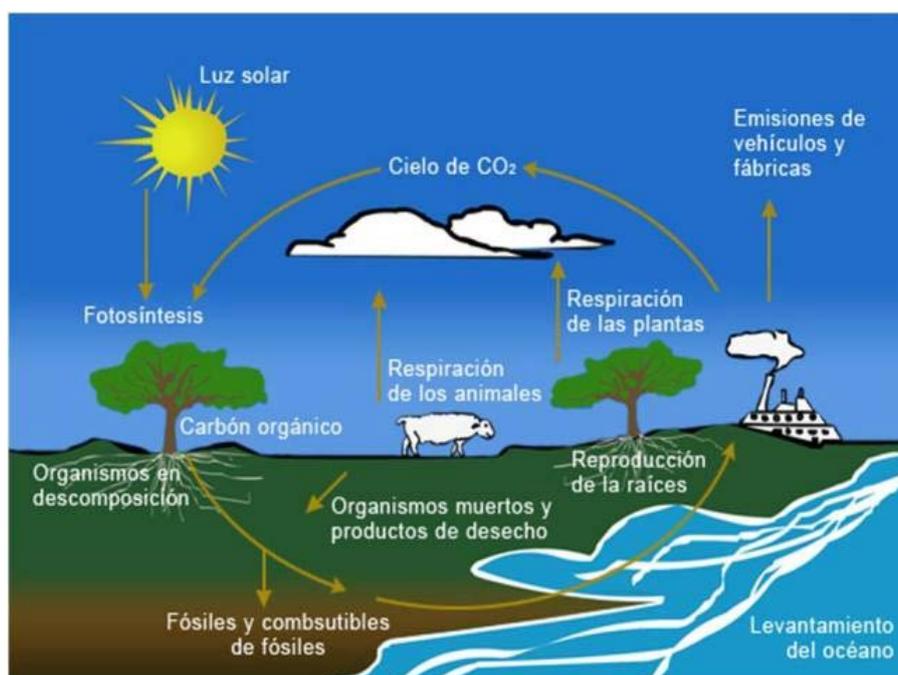


Ilustración 3: Ciclo del carbono (fuente: [www.emaze.com](http://www.emaze.com))

La clave histórica, que marcó el claro inicio del cambio climático motivado por la acción del hombre fue la revolución industrial [Revista "Nature", artículo "Robust global ocean cooling trend for the preindustrial Common Era. Helen V. McGregor et al. Nature Geoscience"]. Diversos investigadores han afirmado en que en esta etapa de la humanidad no solo hubo un gran cambio en la sociedad y economía, sino que la implantación de una nueva tecnología (la máquina de vapor), para satisfacer las necesidades energéticas (principalmente térmicas) de las nuevas

industrias en auge, supuso tener que combustionar un recurso fósil como es el carbón, el cual, tras ser quemado, libera CO<sub>2</sub> y vapor de agua, además de otros compuestos.



*Ilustración 4. Máquina de vapor, símbolo de la revolución industrial (fuente: Google imágenes)*

Esta tendencia ha ido aumentando hasta la actualidad. Las necesidades energéticas actuales implican la utilización de multitud de recursos, tanto renovables como no renovables, y es necesario establecer una forma de desarrollo sostenible la cual permita no agravar la situación actual.

### 1.1.2 Combustibles fósiles

Los combustibles fósiles son aquellos producidos por la descomposición parcial de la materia orgánica de hace millones de años. Las condiciones de presión y temperatura adecuadas sumado a la acción bacteriana en ausencia de aire sobre restos de materia orgánica, tanto animal como vegetal, originó la formación de estos materiales.

Los principales combustibles hallados en la naturaleza son: petróleo, carbón, gas natural y gases licuados del petróleo. Son la fuente de energía más utilizada, desde prácticamente la industrialización del hombre hasta día de hoy y han sido la base de desarrollo de economías y sociedades.

Producen un gran problema medioambiental y social, siendo estos algunos de los problemas más relevantes:

- **Efecto invernadero.** La combustión de combustibles fósiles libera a la atmósfera principalmente dióxido de carbono. Compuesto químico que, como se ha visto, contribuye al aumento de la temperatura terrestre y por lo tanto al cambio climático.

- **Agotamiento de los recursos fósiles.** Las reservas de combustibles fósiles no son ilimitadas, el ritmo de consumo existente es mucho mayor que el que se necesita para volver a producir otra vez combustible fósil.
- **Lluvia acida.** Otro efecto producido por la combustión de combustibles fósiles es la liberación a la atmosfera de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno. Éstos se condensan con el vapor de agua de la atmosfera formando ácido sulfúrico y ácido nítrico. Al condensarse y caer en forma de precipitación, causa daños en vegetación, infraestructuras, contaminación del agua y de la tierra, etc.



*Ilustración 5: Efectos de la lluvia ácida (fuente: <http://ecologiahoy.net>)*

- **Conflictos bélicos y desigualdades sociales.** La localización de los principales puntos de extracción y yacimientos de combustibles fósiles se encuentra en sitios concretos. El control y dominio de estos yacimientos puede llegar a causar conflictos bélicos de escala internacional, así como también diferencias entre ricos y pobres.

Por esta razón, resulta de interés encontrar fuentes de energía alternativas capaces de competir con los recursos convencionales.

### 1.1.3 Consecuencias del cambio climático

El cambio climático es un problema que afecta a todo el mundo sin importar la situación geográfica. El impacto que tiene es enorme, las predicciones hablan de problemas relacionados con la escasez de agua potable, derretimiento de las masas de hielo existentes en los casquetes polares que contribuiría al aumento del nivel del mar, cambios en las condiciones para la producción de alimentos además de inundaciones, sequías, olas de calor, etc.

Además de lo anterior, también existiría una clara afección a los ecosistemas, extinción de animales y plantas, ya que muchas especies no dispondrán del tiempo suficiente para adaptarse a los cambios. La salud de millones de personas podría ser vulnerable a enfermedades como la malaria, la desnutrición y otras transmitidas por el agua.

España es un país, que, debido a su situación geográfica y características socioeconómicas, sería muy propenso a verse afectado por el cambio climático.

Resulta irreal la opción de suspender totalmente las emisiones de efecto invernadero, pero sí que pueden ajustar o regular para así, reducir la huella de carbono <sup>1</sup>que pueda tener una actividad concreta. Por la razón anterior, es necesario la búsqueda de alternativas que puedan ayudar a reducir las emisiones.

## 1.2 Medidas frente al cambio climático

Como se ha visto en el apartado anterior, el problema de cambio climático es a escala global a afecta a todos los seres vivos del planeta. La búsqueda de medidas que consigan eliminarlo o, por lo menos, a atenuarlo es esencial.

Existen distintas opciones, desde las más básicas o sencillas como utilizar transporte público, tecnologías de alumbrado LED (en iluminación) o reciclar y reutilizar, hasta otras más complejas como establecer políticas que beneficien la implantación de mejoras en eficiencia energética, implantación de fuentes de energía renovable o aumentar el ciclo de vida de algunos componentes, como por ejemplo: la gestión de residuos con fines energéticos, ayudando así solventar dos problemas sociales y económicos como son la obtención de energía o la producción excesiva de residuos.

### 1.2.1 Uso de energías renovables

Una de las principales alternativas es la sustitución del uso de fuentes de energía basadas en combustibles fósiles por otras energías de origen renovable.

La ventaja principal de usar energías renovables es claramente medioambiental. Las principales fuentes de energías renovables son:

- Biocarburantes
- Biomasa
- Eólica
- Geotérmica
- Marina
- Mini eólica
- Minihidráulica
- Solar Fotovoltaica
- Solar Térmica
- Solar Termoeléctrica



Ilustración 6: Fuentes de energía renovables (fuente: <http://icasasecologicas.com>)

Huella de carbono<sup>1</sup>: “Totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) que son emitidos por efecto directo o indirecto de la acción de un individuo, organización evento o producto” (Real Decreto 163/2014,

En función del uso o destino que sea necesario, se optará por un tipo u otro atendiendo a las condiciones del entorno y a la necesidad.

### 1.2.2 Protocolo de Kioto

El protocolo de Kioto es un acuerdo internacional cuyo objetivo prioritario es reducir la intensidad de emisión de gases de efecto invernadero, tales como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el gas metano (CH<sub>4</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

Este protocolo fue elaborado por las Naciones Unidas el 11 de diciembre de 1997 en la ciudad que le da nombre; Kioto (Japón), pero no entró en vigor hasta 2005. Para 2009, 187 países lo habían ratificado a excepción de Estados Unidos, país el cual es uno de los mayores contribuidores a las emisiones de efecto invernadero.

Posteriormente se estableció un segundo periodo de Protocolo desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de diciembre de 2013. En este segundo periodo se denotó un compromiso débil por parte de los países industrializados como Rusia, Estados Unidos o Canadá, los cuales no respaldaron la segunda prórroga.

## 1.3 Objetivos energéticos 2020

Dentro de los objetivos energéticos para 2020 es necesario hablar sobre los planteados por la Unión Europea y los planteados por España.

### 1.3.1 Unión Europea

La Unión Europea en su movimiento de acción por el clima ha establecido una serie de estrategias y objetivos climáticos [[https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es)] encaminados a conseguir gracias a un paquete de medidas sobre el clima y la energía hasta el año 2020.

Este paquete de medidas trata contenido legislativo vinculante que garantiza el cumplimiento de los objetivos climáticos para dicho año. Los objetivos principales son:

- Reducción del 20 % de emisiones de efecto invernadero (dato de referencia año 1990).
- 20 % de energías renovables en cada país de la Unión Europea.
- 20% en mejora de la eficiencia energética.

Estas metas figuran de igual modo como unos de los objetivos principales de la estrategia para conseguir un crecimiento sostenible, inteligente e integrador para 2020. Estos objetivos serán alcanzados actuando en diferentes ámbitos:

- Establecer un régimen de comercio de derechos de emisión (RCDE) para reducir las emisiones de la industria, la generación de electricidad y del sector de la aviación.
- Objetivos específicos para cada país. Dependerá del nivel de desarrollo de cada uno. Estos influirán sobre el uso de energías renovables o reducción de emisiones.
- Innovación. Gracias al desarrollo de nuevas tecnologías bajas en carbono.
- Medidas que aumenten la eficiencia energética.

### 1.3.2 España

España ha firmado abiertamente limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero tanto con las Naciones Unidas como con la Unión Europea.

Desde 2008 se creó un plan para reducir las emisiones hasta 2016. En 2013, España se comprometió, a través del Paquete Europeo de Energía y Cambio Climático, a cumplir los objetivos a alcanzar para 2020 en materia de energía renovable, eficiencia energética y reducción de gases de efecto invernadero fijados en dicho paquete.

Este periodo comprendido entre 2013 y 2020, coincide además con en el segundo periodo del compromiso del Protocolo de Kioto, en el cual, la Unión Europea se ha comprometido a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta un 20%.

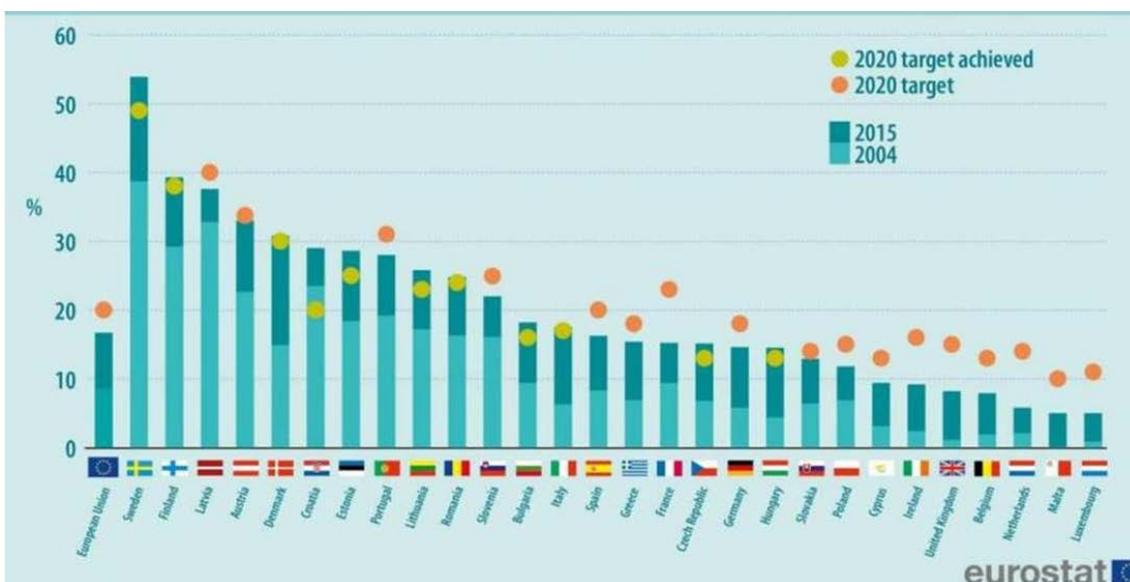


Ilustración 7: Objetivos energéticos para 2020 UE (fuente: Eurostat)

La situación de España respecto a energías renovables está por debajo de ese 20%, por lo que, para alcanzarlo, se realizan subastas de potencia eléctrica (2000-3000 MW, dependiendo de las bases de la subasta) en las que se puja con porcentaje de reducción del valor estándar de la inversión (de cada tecnología). Mediante un proceso de casación, se obtiene la potencia asignada a cada nueva instalación, la retribución a la inversión para cada instalación tipo y el sobrecoste para el sistema [fuente: “Orden ETU/315/2017, de 6 de abril, por la que se regula el procedimiento de asignación del régimen retributivo específico en la convocatoria para nuevas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, convocada al amparo del Real Decreto 359/2017, de 31 de marzo, y se aprueban sus parámetros retributivos”].

## 2. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este trabajo es estudiar la implantación del proceso de co-combustión de combustibles alternativos junto al carbón en la planta térmica de Solvay Torrelavega para reducir la intensidad de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y, previamente a esto, búsqueda de estos combustibles en las cercanías del complejo fabril.

La consecución de estos objetivos se hará siempre y cuando se encuentre la solución más económica y simple evitando grandes modificaciones en las instalaciones y desembolsos económicos innecesarios.

La problemática ambiental ligada a las emisiones de efecto invernadero producidas por la combustión de combustibles fósiles hace necesario la búsqueda de soluciones alternativas a fin de evitar dichos problemas. Por esta razón, la opción de llevar a cabo la co-combustión de combustibles alternativos se plantea como una de las más interesantes ya que, entre las diferentes alternativas existentes, es la más económica debido a que utiliza la infraestructura usada para el carbón (caldera, turbinas, etc.).

La sustitución de biomasa por carbón permite así alcanzar el objetivo medioambiental ya que, de este modo, se reducen la Intensidad de Emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) al tener, como se ve más adelante en el trabajo, la biomasa balance neutro de emisiones.

Para llevar a cabo este trabajo se establece una descomposición de tareas a fin de dividir en tantas partes como sea posible para obtener una mejor solución:

- **Análisis de mercado y búsqueda de combustibles alternativos** cercanos a Torrelavega. El análisis de mercado girará en torno a tres principales variables de entrada: **calidad**; combustible que evite problemas en cuanto a logística y combustión, **cantidad**; asegurar demanda energética de la planta y, por último, **precio**; el que asegure un coste de energía más competitivo con el carbón actualmente (coste de CO<sub>2</sub>= 5 €/ton CO<sub>2</sub>).
- Estudio del **método empleado para realizar la sustitución de carbón**. La co-combustión, a priori, no implica grandes modificaciones para conseguir sustituir un pequeño porcentaje de combustible, pero si necesita examinar los problemas en la instalación ligados al uso de un combustible para el que no han sido diseñada y ver, si fuera necesario, alguna pequeña modificación de la infraestructura.
- Estudio del funcionamiento de la caldera durante las pruebas. Para saber qué porcentaje de sustitución máximo permite la caldera alcanzar se dosifica de menor a mayor concentración. Consiguiendo de esta manera, la determinación del porcentaje máximo admisible por la caldera.
- Estudio de alternativas que permiten conseguir un precio de combustible por unidad de energía lo más competitivo posible con el precio del carbón actualmente (5€/ton CO<sub>2</sub>): Secado o triturado.

### 3. Estado del arte

Previo a la realización del estudio es necesario investigar sobre la biomasa en general y sobre estudios parecidos realizados con anterioridad, dentro y fuera de Solvay.

#### 3.1 Estudio teórico

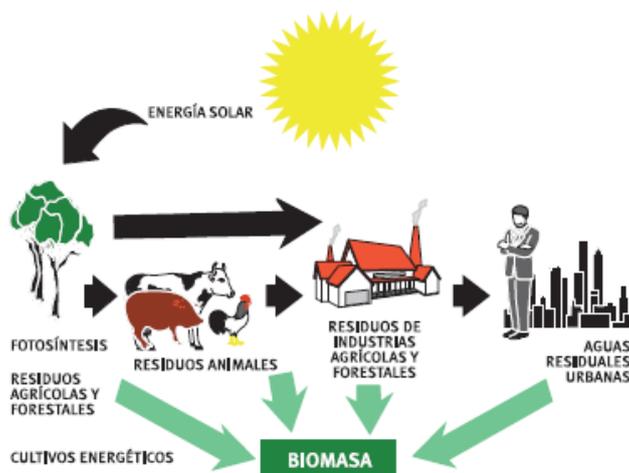
##### 3.1.1 Biomasa

Según el Real Decreto 815/2013, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales, y la norma CEN/TS 14588, se define como biomasa *“Los productos compuestos por materia vegetal de origen agrícola o forestal que puedan ser utilizados como combustible para valorizar su contenido energético. Además de los siguientes residuos:*

1. *Residuos vegetales de origen agrícola y forestal.*
2. *Residuos vegetales procedentes de la industria de elaboración de alimentos (si se recupera el calor generado).*
3. *Residuos vegetales fibrosos procedentes de la producción de pulpa virgen y de la producción de papel a partir de la pulpa, si se coincineran en el lugar de producción y se recupera el calor generado*
4. *Residuos de corcho.*
5. *Residuos de madera, con excepción de aquellos que puedan contener compuestos organohalogenados o metales pesados como consecuencia de algún tipo de tratamiento con sustancias protectoras de la madera o de revestimiento y que incluye, en particular, los residuos de madera procedentes de residuos de la construcción y derribos”.*

En un sentido más concreto, se entenderá como biomasa, *“aquella materia orgánica susceptible de aprovecharse energéticamente”* [Manuales de energías renovables. Energía de la biomasa IDAE]. La realidad es que la definición de la biomasa es aún más amplia, ya que se trata de un vector energético que, en un corto plazo, puede llegar a ser un combustible básico para la sociedad con ciertas ventajas desde un punto de vista no solo energético, sino también medioambiental y económico, ayudando al desarrollo sostenible.

La definición de biomasa abarca un gran número de materias primas, de distinto origen y composición: residuos de aprovechamientos agrícolas y forestales, residuos de podas, residuos de industria forestal y agrícola, residuos de origen animal y humano, etc. Esta heterogeneidad es una de las principales características de la biomasa.

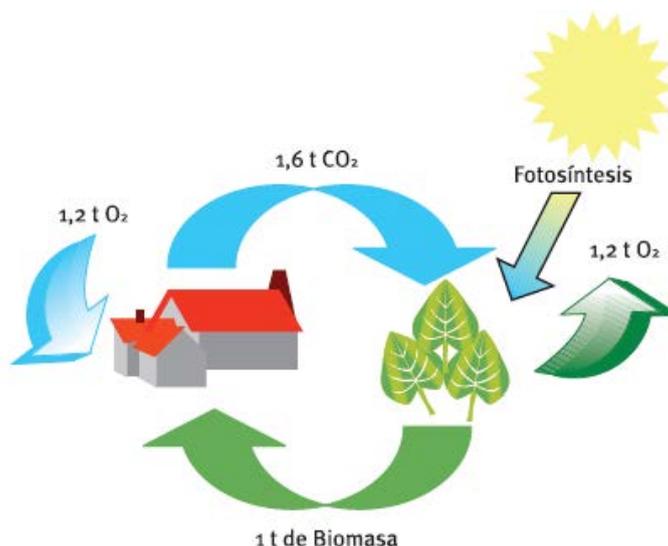


*Ilustración 8. Generación de biomasa (fuente: IDAE)*

Debido a que muchos tipos de biomasa, como las plantaciones agrícolas y forestales, pueden ser cultivadas y cosechadas cíclicamente, su uso como biocombustible puede ser entendido como renovable.

Desde un punto de vista energético, la biomasa es un combustible caracterizado por tener un bajo contenido en carbono, alto contenido en oxígeno y alto contenido en materias volátiles. El poder calorífico depende fundamentalmente el tipo que se trate y al igual que el contenido en humedad.

En cuanto a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero originadas por la combustión de biomasa, se considera que tienen balance neutro de emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ya que se cierra el ciclo de carbono. Las plantas durante su vida, para realizar la fotosíntesis, absorben  $\text{CO}_2$  y luz solar, convirtiendo el  $\text{CO}_2$  en oxígeno y fijando el carbono en su composición. Al ser combustionadas liberan de nuevo el  $\text{CO}_2$  que absorbieron durante su vida.



*Ilustración 9. Ciclo de  $\text{CO}_2$  (Fuente: IDAE)*

Las combustiones de cualquier combustible fósil (carbón, gas, petróleo, etc.) libera a la atmosfera CO<sub>2</sub> que es considerado el mayor contribuidor de calentamiento global.

En cuanto a costes, los costes de instalación asociados a plantas que utilicen biomasa como combustible principal son superiores a sus semejantes para instalaciones de combustibles convencionales. En cambio, en lo que se refiere a gastos de costes de operación o explotación de plantas de biomasa, dependiendo del uso que se le dé a la planta y el combustible renovable empleado pueden quedar en ventaja o desventaja respecto a las convencionales.

### 3.1.2 Estructura de la biomasa

La biomasa de origen vegetal o forestal está compuesta por casi tres cuartas partes de agua y el resto está constituido por materia seca, formada a su vez tanto por compuestos orgánicos como inorgánicos. La composición de la biomasa es importante, porque no siempre es igual, dependiendo de varios factores puede verse alterada (clima, lugar, tipo de ser vivo de donde proviene). Además, la composición también definirá la finalidad energética a la cual irá destinada, es decir, el uso que recibirá.

La biomasa rica en carbohidratos es destinada a la generación de biocombustibles debido a que gran parte de los carbohidratos que la forman son glucosa. Esta glucosa está formada por moléculas de azúcar unidas entre si por cadenas de polímeros. En muchas de las plantas este contenido viene determinado por su contenido en almidón (cuya composición principal está formada por glucosa). Los enlaces de glucosa con hidrogeno dan lugar a fibras impermeables constituyendo así fibras impermeables que forman las paredes de las fibras vegetales.

Otros tipos de biomasa, como las de tipo herbáceas, tienen una composición principalmente formada por lignina o celulosa. Esta variedad contiene valores de entre 30-50 % de celulosa, 20-30% de hemicelulosa y 20-30% de lignina aproximadamente.

La hemicelulosa es parte de las paredes de las células vegetales, recubre la superficie de las fibras de celulosa y permitiendo los enlaces entre ellas.

La lignina es un polímero natural, presenta un elevado peso molecular resultado de la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos. Estos se ordenan de forma aleatoria dando origen a una estructura tridimensional que proporciona rigidez a la pared celular.

La composición química de algunos ejemplos de biomasa viene recogida en la siguiente tabla:

*Tabla 1: Composición de diferentes ejemplos de biomasa (fuente: ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo)*

Muestra	% Extraíbles	%Holocelulosa	% Celulosa	% Hemicelulosa	%Lignina
Raspón de vid	39.34	37 ± 8	34.82	10.77	42.5 ± 0.3
Harina de granilla de uva	9.82	63 ± 3	45 ± 5	19 ± 4	55.1 ± 0.7
Hueso de almazara seco y sin pulpa	2.30	88 ± 1	61 ± 2	27 ± 2	33.2 ± 0.9
Hueso de extractora	36.84	73.4 ± 0.4	41 ± 5	32 ± 5	34 ± 3
Hueso de almazara (ar)	7.99	89 ± 1	55 ± 10	34 ± 10	34.7 ± 0.5
Orujillo extractado	67.79	53 ± 10	26 ± 5	33.2 ± 0.8	40 ± 1
Pellets de poda de olivo	13.51	81.5 ± 0.6	67.4 ± 0.4	14.2 ± 0.7	32 ± 1
Orujo de uva	26.06	42 ± 4	25.64	20.13	47 ± 2
Pellets de orujillo extractado	55.96	64 ± 4	32 ± 4	32 ± 3	38.1 ± 0.5

### 3.1.3 Composición química de la biomasa.

La biomasa, al ser un compuesto biológico, tiene una composición a base de, principalmente, carbono (C), oxígeno (O), hidrógeno (H) y nitrógeno (N). El carbono es el componente químico que determina la liberación de energía por parte del combustible. También, el nitrógeno forma parte en el aporte de energía al proceso de oxidación, que, junto al carbono, determinan el poder calorífico inferior del combustible.

La composición química tiene efectos sobre el comportamiento del combustible y las emisiones asociadas a su combustión. Los elementos químicos que tienen mayor efecto con respecto a emisiones perjudiciales en la combustión son: el nitrógeno (N), el cloro (Cl), el potasio (K), el azufre (S) y el contenido en cenizas.

- **Nitrógeno (N):** el contenido en la mayoría de combustibles sólidos, como la madera, es relativamente bajo. Este elemento químico implica la formación de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) que se forman en gases no atrapados en las cenizas durante la combustión.
- **Cloro (Cl):** los combustibles sólidos leñosos tienen un contenido en cloro bastante bajo, en cambio, los que son derivados de la paja o cereales alcanzan valores notablemente elevados. Este elemento químico implica la formación de ácido clorhídrico (HCl) y dioxinas/furanos. La mayor parte del Cl está vinculado a las cenizas volantes (40-95 %), sin embargo, el resto de contenido forma de HCl, el cual, al adherirse a otros compuestos durante y condensar, produce efectos corrosivos en las piezas metálicas de calderas y chimeneas.
- **Potasio (K):** El efecto principal del potasio es reducir el punto de fusión de las cenizas, favoreciendo así, la formación de escorias e incrustaciones en las superficies de los sobrecalentadores de la caldera, reduciendo la transferencia de calor.
- **Azufre (S):** en comparación con los combustibles fósiles carbonosos, la biomasa dispone de un menor contenido de este elemento. La mayor parte del azufre queda contenido en las cenizas, mientras que la parte restante se elimina en forma de gas a la atmósfera formando  $\text{SO}_2$ .
- **Cenizas:** son el producto de la combustión de un combustible o material. Están formadas por compuestos inorgánicos no combustibles y durante la combustión se pueden producir modificaciones en ellas, éstas se ablandan y funden dando así formación de escorias. Las escorias producen variaciones en los flujos de aire y pueden producir también efectos corrosivos.  
Existen dos tipos de cenizas: las cenizas volantes (las menos densas, escapan por la chimenea) y las cenizas de fondo de horno (son más densas y, como su nombre indica), se depositan en el fondo de la caldera.

*Tabla 2: Ejemplos de composición química de la biomasa sólida (fuente: Manual de combustibles sólidos. AVEBIOM)*

	C	H	O	N	K	S	Cl
	% peso (seco)						
Picea (con corteza)	49.8	6.3	43.2	0.13	0.13	0.015	0.005
Haya (con corteza)	47.9	6.2	43.3	0.22	0.22	0.015	0.006
Álamo (monte bajo rotación corta)	47.5	6.2	44.1	0.42	0.35	0.031	0.004
Sauce (monte bajo rotación corta)	47.1	6.1	44.2	0.54	0.26	0.045	0.004
Corteza (coníferas)	51.4	5.7	38.7	0.48	0.24	0.085	0.019
Valores típicos para materiales de corteza virgen, madera de conífera	47-54	5,6 - 7,0	40-44	<0,1-0,5		<0,01-0,05	<0,01-0,03
Valores típicos para materiales de corteza virgen, madera de frondosa	48-52	5,9-6,5	41-45	<0.1-0.5		<0,01-0,05	<0,01-0,03
Valores típicos para materiales de corteza virgen	51-56	5,9-6.5	36-43	0.3-1.2		0.02-0.2	<0,01-0,05
Valores típicos para materiales de corteza virgen, Residuos de trozas	50-53	5,9-6.3	40-44	0.3-0.8		0.01-0.08	<0,01-0,04
Valores típicos para materiales de corteza virgen, Monte bajo rotación corta	47-51	5.8-6-7	40-46	0.2-0.8		0.02-0.1	<0,01-0,05
Miscanthus	47.5	6.2	41.7	0.73	0.70	0.150	0.220
Paja de trigo	45.6	5.8	42.4	0.48	1.00	0.082	0.190
Triticale (grano)	43.5	6.4	46.4	1.68	0.60	0.110	0.070
Torta de colza	51.5	7.4	30.1	4.97	1.60	0.550	0.019

*Para comparación, combustibles fósiles*

Carbón	72.5	5.6	11.0	1.30	-	0.940	< 0,1
Lignito	65.9	4.6	23.0	0.70	-	0.390	< 0,1
Fueloil	85-86	11,0-13	1,0-4	-	-	-	-
Gas natural	75	25	-	-	-	-	-

### 3.1.4 Poder calorífico

El poder calorífico es la cantidad de energía liberada por unidad de masa o de volumen al realizarse una combustión u oxidación química.

Se puede expresar en diferentes unidades. Las más utilizadas son:

- kcal/kg
- MJ/kg
- MWh/ton

#### 3.1.4.1 Poder calorífico superior (PCS)

El poder calorífico superior tiene en cuenta el calor latente de vaporización del agua en la combustión de productos y es útil para calcular poderes caloríficos de combustibles donde la condensación de productos es práctica. Por ejemplo, la las calderas de gas.

El poder calorífico superior asume que toda el agua que compone un combustible está en fase líquida al final de la combustión, por lo que el vapor de agua se encontrará totalmente condensado.

#### 3.1.4.2 Poder calorífico inferior (PCI)

El poder calorífico inferior asume que toda el agua contenido al final de la combustión se encuentra en fase gaseosa o vapor al final de la combustión.

Se determina extrayendo el calor necesario para calentar y vaporizar el agua contenido en el combustible del poder calorífico superior. Entonces la energía requerida para vaporizar el agua no se libera en forma de calor.

#### 3.1.5 Tipos de biomasa

La gran variedad de biomásas disponibles hace necesario un análisis de los tipos existentes en base al método de extracción o producción, disponibilidad, transporte y distribución, ya que, atendiendo a estos parámetros se puede clasificar de un modo u otro.

##### 3.1.5.1 Residuos forestales

La explotación maderera de los bosques produce, en las labores de entresacado de masas forestales, materias primas usadas por el sector forestal, principalmente madera de árboles de rápido crecimiento. Esta tarea origina residuos tales como ramas, hojas o cortezas, las cuales han de ser eliminados para prevenir incendios o mejorar la limpieza de los suelos.

El aprovechamiento energético es una de las salidas que permite valorizar este residuo como biomasa. Los residuos son transportados hacia parques dedicados al tratamiento y conversión en combustible adecuándolo para un uso industrial o doméstico.



*Ilustración 10: Residuos forestales empacados (fuente: eucalyptusenergy.com)*

La mayoría de estos residuos se puede empacar y astillar empleando una maquinaria adecuada. El principal problema de estos residuos es la variedad de tamaños y composición, problemas de accesibilidad al entresacado de la madera, y en la mayoría de los casos, el gran porcentaje de humedad por peso que las compone.

### 3.1.5.2 Residuos agrícolas leñosos y herbáceos

La poda de árboles como el olivo, la vid o el resto de árboles frutales originan restos y residuos durante las podas que deben realizarse con el fin de gestionar su mantenimiento. Además de las podas, también se pueden encontrar otros residuos agrícolas herbáceos como el cereal o la paja. Este tipo de biomasa es estacional, ya que las podas tienen lugar en determinadas épocas del año, no siendo continuo su aprovisionamiento. Para llevar a cabo su uso energético, es necesario someterlo a un astillado y empaclado.

### 3.1.5.3 Cultivos energéticos

La producción de estos está completamente destinada a la producción de energía en forma de biomasa para uso energético. Comprenden materias primas de crecimiento rápido, desde herbáceos hasta árboles como el chopo o el eucalipto, que pueden ser plantados y recolectados rápidamente. Cabe destacar, la existencia de cultivos de algas con fines energéticos, que pasaría a denominarse biomasa acuática cuyo fin principal sería la elaboración de biocombustibles.

### 3.1.5.4 Biomasa residual de origen industrial

Aquella que procede del desarrollo de diferentes actividades industriales. La industria forestal, que se ocupa de la transformación de la madera, y la industria agroalimentaria generan residuos como astillas, serrín además de cascara, huesos y otros residuos en el caso de la industria agroalimentaria. Estos residuos son susceptibles de ser utilizados como combustible industrial. La estacionalidad en estos casos girará en torno a la producción de la industria que los genera.



*Ilustración 11: Residuos de la industria forestal (fuente: <http://www.interempresas.net/Madera/>)*

### 3.1.5.5 Residuos urbanos.

Los residuos originados en núcleos de población como resultado de la actividad habitual o residuos de actividades ligadas a la construcción generan materiales como madera u otros

restos orgánicos, los cuales pueden ser tratados como biomasa. Para poder adquirir un fin energético tienen que cumplir ciertos criterios legales (recogidos en el Boletín Oficial del Estado y medidas normalizadas: UNE, CEN, etc.) como, por ejemplo: no haber sido tratados con compuestos órganohalogenados o que no contengan metales pesados debido a algún tipo de tratamiento.

Su utilización como recurso energético ayuda a evitar la superproducción de residuos, dotándolos así de un carácter energético aumentando de esta manera el ciclo de vida de los materiales.



*Ilustración 12: Ciclo de la revalorización energética de residuos (fuente: elaboración propia)*

### 3.1.5.6 Residuos animales

Estos comprenden estiércol de ganado, cría de aves o cerdo. El estiércol puede ser convertido en gas o quemado directamente recuperando el calor generado para producir vapor. Normalmente, se convierte en metano a través de un proceso de digestión anaerobia (en ausencia de aire).

El siguiente diagrama resume de forma esquemática todos los tipos de biomasa vistos en este apartado:

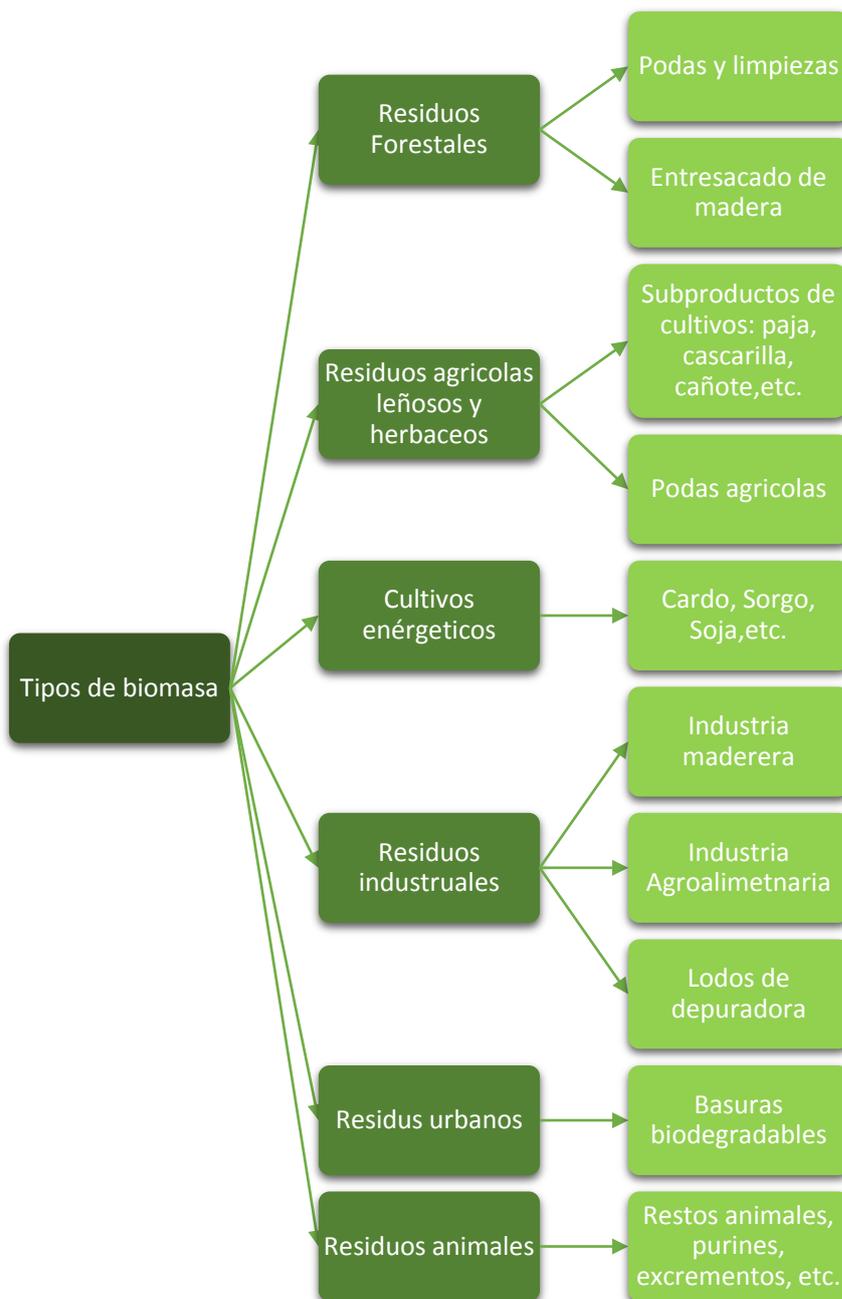


Ilustración 13: Esquema tipos de biomasa (fuente: elaboración propia)

### 3.1.6 Ventajas y desventajas

El planteamiento de biomasa está visto socialmente como beneficioso como recurso energético creyendo que su uso está ligado a multitud de ventajas económicas, sociales y medioambientales, pero no es evidente que esto no sea del todo cierto. Por esta razón, es necesario analizar cuáles son las ventajas y desventajas de la biomasa.

#### 3.1.6.1 Ventajas

El empleo de biomasa como recurso energético supone ciertas ventajas, por un lado, medioambientales y por otro, socioeconómicas, como son:

- Disminución de emisiones de azufre, partículas y disminución de otros contaminantes como CO, HC, NO<sub>x</sub>. La producción de energía mediante energía renovable tiene una ventaja clara, la disminución de la carga contaminante provocada por el uso de combustibles fósiles.
- Balance neutro de emisiones de CO<sub>2</sub>. La quema de la biomasa cierra el ciclo de CO<sub>2</sub>, liberando el CO<sub>2</sub> que la planta adsorbió durante su vida.
- Posible reforestación de tierras agrícolas marginales o deforestadas con cultivos energéticos, herbáceos o leñosos, que ayuda a controlar incendios en el caso de tierras que se encuentran cubiertas por matorrales, y ayuda a evitar problemas de plagas de insectos y erosión del suelo. Lo que ayudaría al desarrollo rural y proporcionar tratamiento adecuado de residuos.
- Desarrollo de zonas rurales ligadas a la explotación de recursos forestales y silvícolas sobre una base de mercado de demanda estable y continua.
- Se evita la dependencia energética de otros países.

### 3.1.6.2 Desventajas

Al igual que el uso de biomasa puede conllevar una serie de ventajas, también puede haber desventajas:

- El coste puede ser elevado. Dependiendo de la zona y de las condiciones climatológicas, el coste de extracción puede ser elevado.
- Posible subida de los precios de los alimentos debido a la competencia establecida con los cultivos energéticos.
- La producción de electricidad mediante empleo de biomasa es una solución costosa para el sistema eléctrico, ya que es difícil asegurar su viabilidad sin retribuciones del gobierno, tanto a la inversión como a la operación.
- Necesidad de un gran espacio. Son necesarias grandes áreas para realizar los cultivos o plantaciones.
- No se cumplen totalmente los beneficios medioambientales que se alegan debido a que la materia prima no siempre puede ser producida de manera sostenible. El aprovechamiento de ciertos lugares puede suponer una carga medioambiental ya que se destruirían hábitats de gran valor ecológico; refugios de especies animales y de sus fuentes de alimento. En conclusión, impacto negativo sobre la biodiversidad.
- Aceleramiento de la deforestación y competir contra los recursos hídricos de algunas regiones.
- La biomasa posee una menor energía por unidad de masa, lo cual hace necesario que, para suplir una demanda de energía dada, sea necesario mayor cantidad de biomasa que de otro combustible fósil en su lugar.
- A pesar de tener balance neutro de emisiones, la combustión de biomasa sigue liberando a la atmósfera gases de efecto invernadero. Por lo que no se reducirá totalmente la intensidad de emisión.

### 3.1.7 Usos de la biomasa

#### 3.1.7.1 Calor y producción de vapor

El principal uso de la biomasa en la industria es la producción de calor y vapor en calderas dedicadas que lo utilizan para satisfacer las necesidades térmicas de algún proceso. Estas calderas tienen rendimientos superiores al 85% usando como combustibles residuos industriales, que en muchos casos son producidos en el mismo lugar.

Las condiciones del vapor a la salida de la caldera dependerán principalmente del tipo de combustible empleado, pudiéndose alcanzar temperaturas en torno a 540 °C y presiones entre 20-200 bar en el mejor de los casos.

Aparte de las centrales de las plantas industriales para la producción exclusiva de calor, existen plantas de cogeneración que generan electricidad a la par que calor.

A nivel doméstico, destaca el uso de biomasa para la producción de calor y agua caliente sanitario. Además, existen sistemas de calefacción centralizada que proporcionan calor a diferentes usuarios mediante una sola caldera. Este sistema es beneficioso en cuanto a que el coste de instalación por unidad de energía disminuye conforme aumenta la potencia de la instalación. Entre las instalaciones más apropiadas para hacer este tipo de calefacción destacan:

- Edificios públicos: colegios, hospitales, ayuntamientos, etc. los cuales han de tener una cierta dimensión.
- Bloques de viviendas y comunidades de vecinos con servicios de calefacción y agua caliente sanitario centralizado.
- Redes urbanas (District heating). Unen edificios a través de tubos aislados térmicamente a una planta de producción de calor.

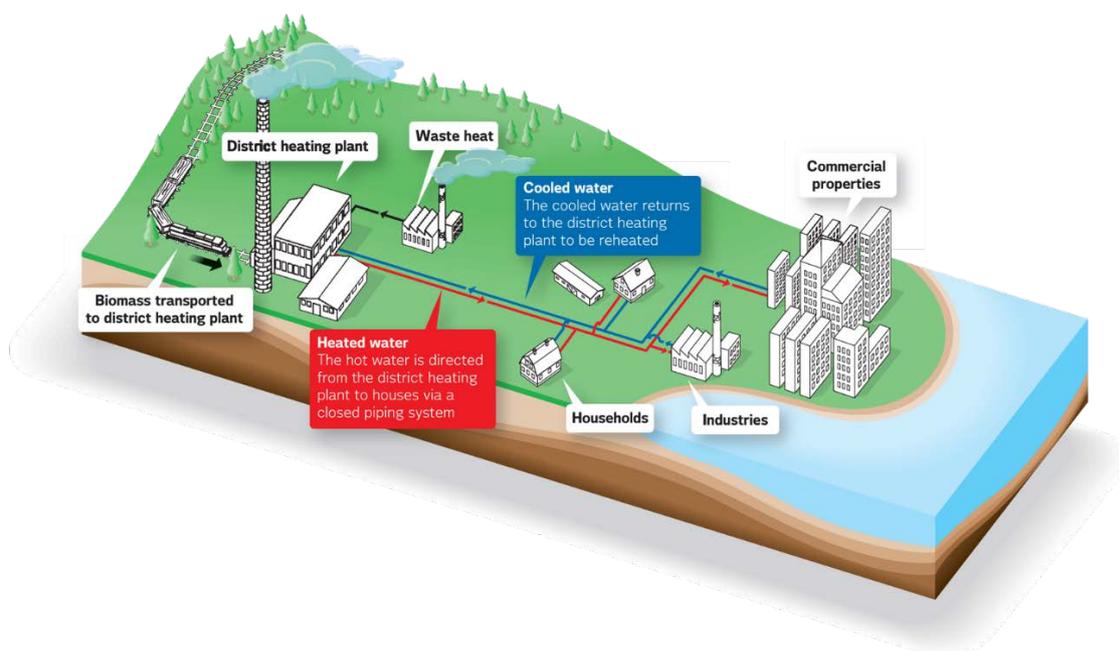


Ilustración 14: District Heating (Fuente: Vattenfall)

### 3.1.7.2 Eléctrico

El aprovechamiento eléctrico mediante la combustión de biomasa se realiza por norma general en plantas superiores a 2 MW. Esto es debido a que las instalaciones requieren una gran inversión económica además de obtenerse mayores rendimientos cuanto mayor es la potencia generada.

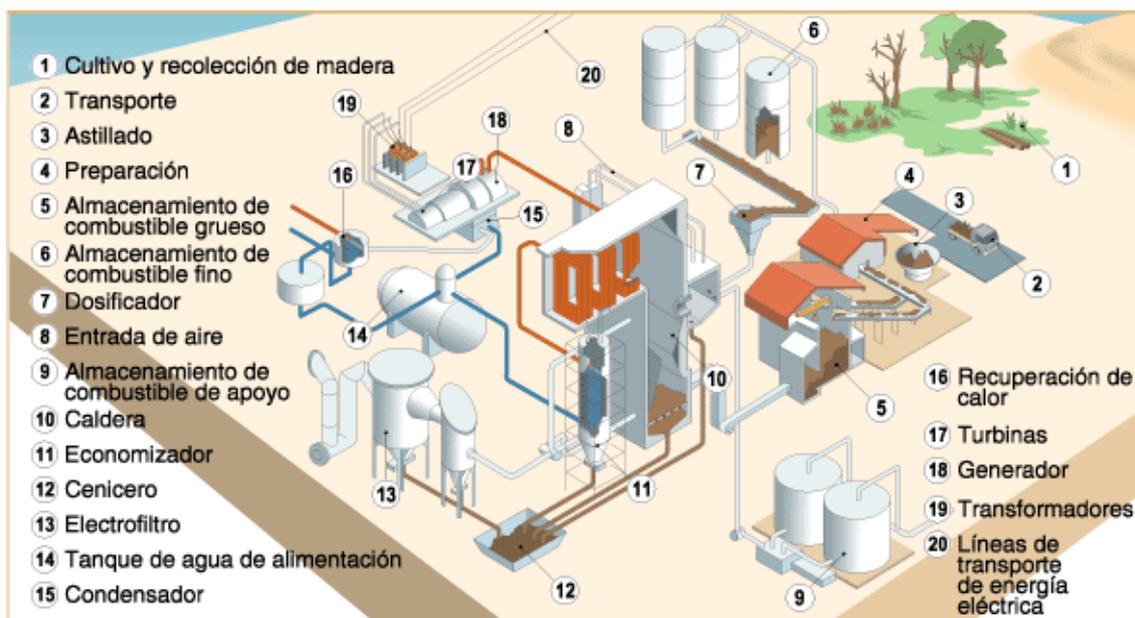
Existen tres métodos para la obtención de energía eléctrica a partir de biomasa:

- Combustión directa.
- Co-combustión de biomasa con carbón.
- Gasificación.
- Pequeños sistemas de generación de electricidad.

#### 3.1.7.2.1 Combustión directa

El combustible de la instalación es transportado y almacenado en la central, donde puede ser sometido a tratamientos para reducir su tamaño y humedad, a fin de obtener un mejor rendimiento de la combustión.

En los sistemas de combustión directa, la biomasa es quemada en el hogar de una caldera, el calor liberado por la combustión de la biomasa es recuperado y convertido en vapor a través del economizador, donde se calienta con los gases de escape de la caldera. El fluido termal, generalmente agua, proviene de un tanque de alimentación y absorbe este calor para la formación de vapor a alta presión. El vapor es introducido en una turbina donde se expande generando el movimiento del eje turbina que, unido a un alternador, genera energía eléctrica. El vapor ya turbinado y de baja entalpia, es enfriado en un condensador hasta alcanzar el estado totalmente líquido. Es decir, utiliza un ciclo Rankine semejante al que se usa para producir electricidad a partir de carbón en una central térmica.



*Ilustración 15: Central de generación eléctrica mediante biomasa (fuente: UNESA).*

El uso de estos sistemas puede alcanzar potencias comprendidas entre 20 y 50 MW, potencias por debajo de las conseguidas en algunas centrales de carbón, que pueden estar entre 100 y 1500 MW. En cuanto a la eficiencia de las centrales eléctricas de biomasa, éstas se encuentran por debajo del 20%. Aunque existen técnicas para mejorarlas y alcanzar eficiencias superiores al 40%, pero no sale rentable económicamente.

La configuración de caldera más utilizada es la combustión mediante parrilla, pudiendo ser parrillas fijas, horizontales e inclinadas, móviles, vibratorias o incluso refrigeradas con agua. Este tipo de caldera no son muy distintas con respecto a otras que queman combustibles sólidos como el carbón, introduciendo pequeñas modificaciones para adaptarlas al combustible.

### 3.1.7.2.2 Co-combustión

El método empleado en este proceso supone la sustitución de una pequeña parte de carbón por otra de biomasa. Los porcentajes de sustitución pueden alcanzar el 15 % en masa que la caldera es capaz de soportar, siendo los impactos sobre la operación de la planta bajos con porcentajes de sustitución por debajo del 10%, permitiendo un rango amplio de biomásas, sin problemas significativos en la mayoría de ellas.

Este sistema tiene la ventaja de reducir las emisiones contaminantes ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) motivación principal por la que se opta por la implantación de este método. Además de beneficios medioambientales y sociales para la zona donde se aplique, permite usar varios combustibles sin tener que hacer grandes inversiones en las modificaciones de la infraestructura, ya que existen instalados los elementos principales de la planta como son la caldera o la turbina de vapor. Sin embargo, la composición química de la biomasa puede aumentar los costes y problemas de mantenimiento, problemas de ensuciamiento, escorias, corrosión en la caldera y menor eficiencia si el uso de la biomasa no es bien manejado.

En Europa este sistema ya ha sido implantado con éxito en distintas localizaciones: Reino Unido (Drax, Ferrybridge, Fiddler's Ferry > 600 MWe), Dinamarca (Avedore, Amager, Enstead >1000 MWe) Bélgica (Rodenhuzen, es Awirs, Ruien > 300 MWe) Países Bajos (Amer, Borselle, Gelderland, Maasvlakte 300MWe) además de otros países como Finlandia, Suecia o Alemania.

Existen dos tipos de co-combustión:

- **Co-combustión directa**

La transformación termoquímica de los dos combustibles se realiza totalmente dentro de la misma caldera. La biomasa puede alimentarse junto con el carbón o de forma independiente. Esta forma resulta más sencilla y económica que la co-combustión indirecta por lo que es la forma más ampliamente utilizada.

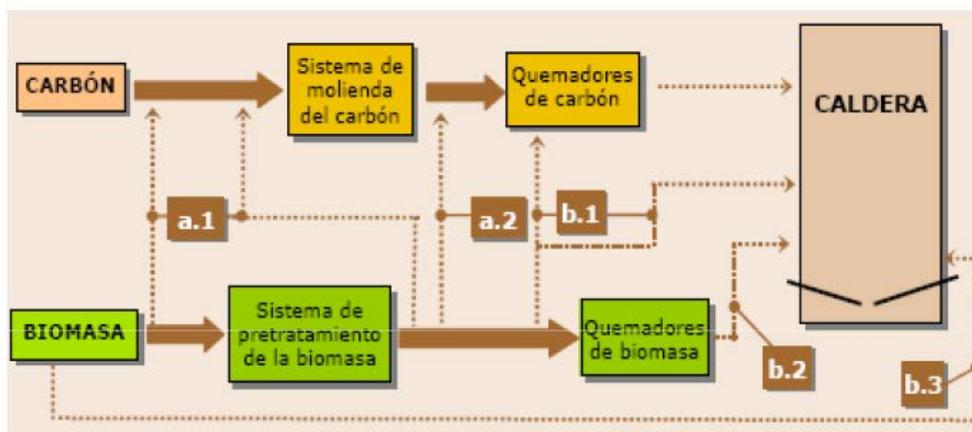


Ilustración 16: Co-combustión directa en calderas de carbón pulverizado (Fuente: Sacyr Industrial)

a) la biomasa se introduce en la caldera junto con el carbón:

a.1) La mezcla se realiza antes de los molinos de carbón.

a.2) La mezcla se realiza antes de los quemadores de carbón

b) la biomasa se introduce en la caldera independiente al carbón:

b.1) Utilizando los propios quemadores de carbón o conductos disponibles de los mismos.

b.2) Utilizando quemadores especiales para biomasa.

b.3) Adaptación de una parrilla donde se alimenta la biomasa.

- **Co-combustión indirecta**

La dosificación de la biomasa se realiza total o parcialmente de forma independiente al combustible fósil. Existe una mayor flexibilidad en la biomasa a quemar, pero el coste de inversión es mucho más alto.

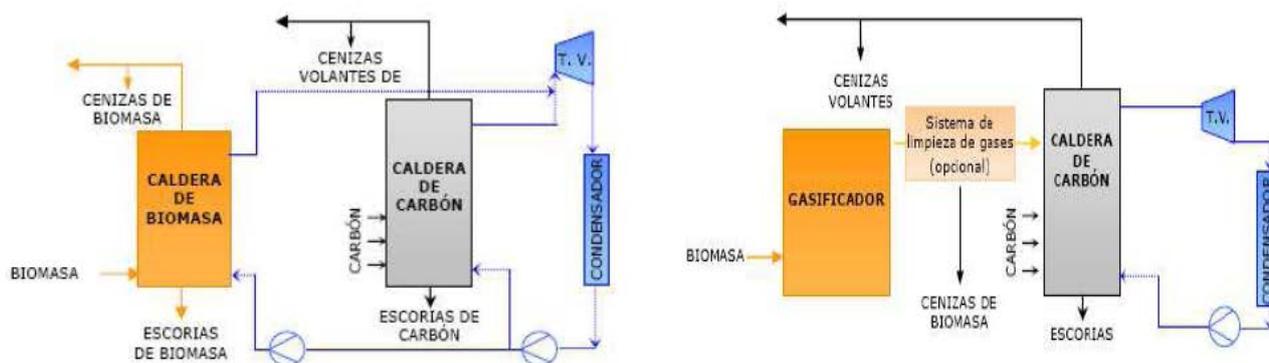


Ilustración 17: Co-combustión indirecta (Fuente: Sacyr Industrial)

### 3.1.7.2.3 Gasificación

La gasificación consiste en transformar un combustible sólido, a través de una serie de reacciones químicas en combustibles en forma gaseosa que pueden ser quemados en una caldera. La biomasa sólida es calentada a gran temperatura en ausencia de oxígeno, entonces las partículas de biomasa se rompen formando un gas llamado biogás. La celulosa se convierte en hidrocarburos más ligeros formando una mezcla de diferentes gases denominado “syngas” con un poder calorífico equivalente a una sexta parte del poder calorífico del gas natural.

El biogás es después limpiado y filtrado, para ser utilizado en calderas de gas y ciclos combinados que, combinan una turbina de gas (ciclo Brayton) y una turbina de vapor (ciclo Rankine). El rendimiento de este proceso puede variar en función del proceso y pueden alcanzarse valores en torno al 70-80 %.

La ventaja de la gasificación con respecto de la combustión directa de biomasa es que permite obtener mayores rendimientos eléctricos. Mediante la gasificación pueden alcanzarse valores superiores al 30% mientras que, para la combustión directa, mediante un ciclo Rankine, los rendimientos rondan el 20%.

En cuanto a las tecnologías existentes para la gasificación, existen dos tipos atendiendo al tipo de gasificador:

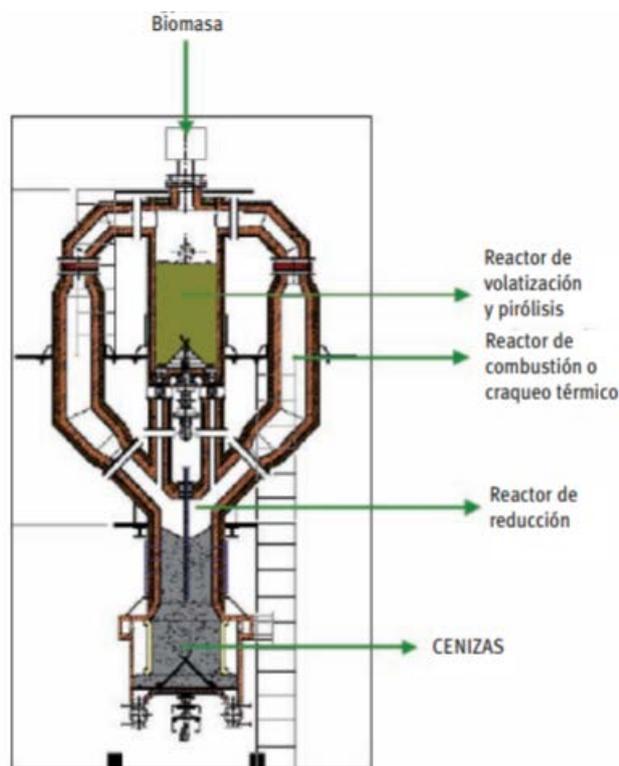
- De lecho móvil, habiendo dos tipos dependiendo de las direcciones de las corrientes; corrientes paralelas (“downdraft”) y a contracorriente (“updraft”).
- De lecho fluidizado; el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible, hasta que las cenizas volantes se gasifican y la corriente de syngas las arrastra.

El proceso de gasificación está dividido en dos principales etapas. En la primera tiene lugar un proceso pirólisis, previo calentamiento hasta unos 100 °C para secar la biomasa y separar en agua contenida en la misma, las moléculas se rompen dando lugar a otras cadenas más cortas. Los componentes volátiles del combustible son calentados hasta temperaturas por debajo de 600 °C formando un gas compuesto principalmente por hidrocarburos, hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y vapor de agua.

Debido a que la biomasa tiende a tener más materias volátiles que el carbón, la pirólisis juega un papel importante. Los productos como el Char (carbono fijo) y las cenizas no son vaporizados.

En los reactores “updraft” existe una etapa intermedia de reducción en la que se combina el vapor de agua producido en la primera etapa con el dióxido de carbono que se forma en la última etapa de oxidación.

En la última etapa, de oxidación, la fracción más pesada de la biomasa se oxida al entrar en contacto con el agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua) y el char es quemado.



*Ilustración 18: Esquema del reactor multi-etapa de Guascor (fuente: IDAE)*

El diseño del gasificador es muy importante para alcanzar una alta eficiencia del proceso. Generalmente, las tres etapas son introducidas en un mismo gasificador y son realizadas en una sola máquina para reducir el coste de operación y aumentar la eficiencia.

Este sistema posee la ventaja de que se reducen las emisiones y aumentan los rendimientos y la flexibilidad. Las emisiones pueden ser muy bajas en comparación con los sistemas de combustión directa y los rendimientos permiten sacar hasta un 50% de rendimiento al combustible.

#### 3.1.7.2.4 Pequeños sistemas de generación de electricidad

Estos sistemas utilizan las mismas tecnologías mencionadas arriba, pero a pequeña escala. Sirven para suministrar electricidad en áreas aisladas, granjas, donde la conexión a la red supone un problema y pequeñas industrias.

Estos sistemas tienen potencias nominales desde 5KW hasta 5MW. Algunas unidades son portables y tienen las ventajas de que tienen poco impacto ambiental, son económicamente atractivos cuando el usuario tiene problemas para acceder a la red, pueden adaptarse para varios tipos de combustibles y, además, son simples de usar. Pueden ser también una solución para la reducción de residuos generados en determinadas comunidades.



*Ilustración 19: Sistema comunitario modular de 100KW de potencia (fuente: U.S. Department of energy)*

### 3.1.7.3 Combustibles líquidos. Biocombustibles

Otro uso de la biomasa puede ser convertirla en combustibles líquidos denominados “biocombustibles”, los cuales pueden ser usados con sustitutos del petróleo.

Los dos tipos más comunes son biodiesel y el bioetanol.

#### 3.1.7.3.1 Biodiesel

La producción de biodiesel se basa en la reacción con etanol o metanol de las moléculas de triglicéridos para producir ésteres, esta reacción se conoce como transesterificación. Así se consigue que las moléculas grandes y ramificadas, con elevada viscosidad y alto contenido en carbono se conviertan en cadenas lineales, de baja densidad, con menor porcentaje de carbono y viscosidad, obteniéndose un combustible parecido al utilizado en automoción.

La materia prima usada para desarrollar biodiesel suelen ser cultivos energéticos dedicados especialmente para la producción continua, como la soja o el maíz, y grasas animales ricas en omega -3.

Este combustible es apto para ser usado en motores desarrollados especialmente para su uso, motores con baja exigencia en cuanto a regulación del tipo conocido como precámara, motores provistos con sistemas de precalentamiento de combustibles (hasta 60 °C).

#### 3.1.7.3.2 Bioetanol

El bioetanol es obtenido a través de la fermentación de azúcares hasta conseguir un grado alcohólico (10-15% después de la fermentación), después es sometido a una destilación hasta conseguir un alcohol “hidratado” (4-5% de agua y el resto alcohol) y posteriormente, hasta

llegar a una calidad necesaria (99,4 % de alcohol) mediante deshidratación. Su principal uso es ser utilizado en los motores de combustión interna (ciclo Otto).

Las materias primas son productos hidrocarburos de tipo azucarado o amiláceo capaces de ser utilizados en un proceso de fermentación. Cultivos energéticos como la remolacha o el sorgo dulce, así como también cereales y la patata.

### 3.1.8 Marco legal y económico de las plantas de generación de energía eléctrica a partir de biomasa

Como complemento el estado teórico del arte, se ha estudiado la normativa legal española recogida en el Boletín Oficial del Estado conveniente a la generación de energía eléctrica usando biomasa. En este apartado se ve la evolución de dichas normativas desde su inicio, hasta como se retribuye económicamente la actividad de planta eléctrica que utiliza biomasa.

El primer decreto donde se ve reflejada una clasificación de las centrales de cogeneración a partir de biomasa es el Real Decreto 661/2007 de 25 de mayo. Este decreto establece las bases para regular la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. La tabla siguiente recoge de manera resumida los grupos en que se clasifica.

*Tabla 3: Clasificación de centrales según origen de la biomasa (elaboración propia usando RD 661/2007)*

Grupo	Subgrupo	Definición
b.6. Centrales que utilicen como combustible principal biomasa que proceda de cultivos energéticos, residuos de actividades agrícolas o jardinerías, residuos de masas o forestales u otras actividades silvícolas.	b.6.1	Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de cultivos energéticos.
	b.6.2	Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de residuos de las actividades agrícolas o de jardinerías.
	b.6.3	Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de residuos de aprovechamientos forestales y otras operaciones silvícolas en las masas forestales y espacios verdes.
b.7. Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de estiércoles, biocombustibles o biogás procedente de la digestión anaerobia de	b.7.1	Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás de vertederos.
	b.7.2	Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás generado en digestores empleando alguno de los siguientes residuos: residuos biodegradables industriales, lodos de

residuos agrícolas y ganaderos, de residuos biodegradables de instalaciones industriales o de lodos de depuración de aguas residuales, así como el recuperado en los vertederos controlados.	b.7.3	depuradora de aguas urbanas o industriales, residuos sólidos urbanos, residuos ganaderos, agrícolas y otros para los cuales se aplique el proceso de digestión anaerobia, tanto individualmente como en co-digestión.  Instalaciones que empleen como combustible principal estiércoles mediante combustión y biocombustibles líquidos.
	b.8.1	Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de instalaciones industriales del sector agrícola.
b.8. Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de instalaciones industriales, en los términos que figuran en el anexo II.	b.8.2	Centrales que utilicen como combustible principal biomasa procedente de instalaciones industriales del sector forestal.
	b.8.3	Centrales que utilicen como combustible principales licores negros de la industria papelera.

Con el fin de actualizar el régimen jurídico y económico de la actividad de producción de energía eléctrica a partir de renovables, cogeneración y residuos, en el año 2014 se estableció una actualización de la clasificación de la tabla anterior mediante el Real Decreto 413/2014 del 6 de junio.

Los subgrupos de los grupos b.6 y b.8 cambiaron: los subgrupos b.6.1, b.6.2, b.6.3 formaron a ser solamente grupo b.6. y los subgrupos b.8.1, b.8.2, b.8.3 pasaron a ser también solamente un solo subgrupo b.8.

Los subgrupos del grupo b.7 se dividieron solamente en dos:

- Subgrupo b.7.1 Instalaciones que empleen como combustible principal el biogás de vertederos controlados.
- Subgrupo b.7.2 Instalaciones que empleen como combustible principal biolíquidos o el biogás generado en digestores procedente de cultivos energéticos o de restos agrícolas, de deyecciones ganaderas, de residuos biodegradables de instalaciones industriales, de residuos domiciliarios o similares, de lodos de depuración de aguas residuales u otros para los cuales sea de aplicación el proceso de digestión anaerobia tanto individualmente como en co-digestión. [fuente: *Real Decreto 413/2014*].

Además, el RD 413/2014 estableció un método para llevar a cabo la retribución a las centrales. La retribución específica sería la suma de la retribución a la inversión (término por unidad

potencia instalada, o lo que es lo mismo, costes de inversión de instalación tipo no recuperados) más la retribución a la operación (costes de explotación de la instalación tipo menos los ingresos de mercado de la instalación tipo).

También en este decreto, se establecieron los periodos de revisión de la normativa conveniente a la retribución de las centrales que utilicen como combustible biomasa:

- Periodo regulatorio: 6 años.
  - Valor sobre el que gira la rentabilidad razonable (antes de finalizar).
  - Pueden ser revisados todos los parámetros retributivos (al finalizar el periodo), por orden el Ministro de Industria Energía y Turismo.
- Periodo semirregulatorio: 3 años.
  - Estimaciones de ingresos por la venta de la energía generada, valorada al precio de mercado de producción en función de la evolución de los precios y de las horas de funcionamiento. (antes del semiperiodo regulatorio).
  - Todos los parámetros retributivos.
- Anuales.
  - Al menos una vez anualmente: valores de retribución a la operación para las instalaciones cuyos costes de explotación dependen del precio del combustible (también pueden ser revisados cada 6 meses).
- Parámetros no revisables.
  - Vida útil regulatoria.
  - Valor estándar inicial de una instalación

La orden IET/1045/2014, de 16 de junio, aprobó los parámetros retributivos de las instalaciones productoras de energía eléctrica a partir de fuentes de energías renovables, cogeneración y residuos. Además, esta ley establece una equivalencia entre grupos y subgrupos anteriores y posteriores al RD 413/2014, asignándola una “matricula” en función del año en entrada en vigor de la instalación y del tipo de combustible que utilice. Por ejemplo, una instalación del grupo b.6 con entrada en vigor en 2013 pasaría a definirse como “IT-00842” con unos parámetros retributivos determinados y central que utilice combustible del grupo b.8 con entrada en vigor en el mismo año pasaría a definirse como “IT-00866”. La siguiente tabla a modo de ejemplo la evolución de la normativa para comprenderla de un modo más claro:

*Tabla 4: Ejemplo central tipo b.6 y b.8 año con entrada en funcionamiento 2013 (fuente: elaboración propia)*

<b>Instalación 661/2007</b>	b.6	b.8
<b>Instalación 1045/2014</b>	IT-00842	IT-00866
<b>Año entrada en vigor</b>	2013	2013

<b>Ro (€/MWh) 2013</b>	47,165	30,074
<b>Rinv (€/MW) 2013</b>	131.000	121.628
<b>Ro (€/MWh) 2014</b>	50,943	33,685
<b>Ro (€/MWh) 2015 -2</b>	50,785	33,309
<b>Ro (€/MWh) 2016 -1</b>	51,206	33,626
<b>Ro (€/MWh) 2016 -2</b>	51,514	33,872
<b>Rinv (€/MW) 2014-2016</b>	279.620	259.616
<b>Ro (€/MWh) 2017 -1</b>	57,131	39,411
<b>Rinv (€/MW) 2017-2019</b>	283.664	263.659

Los parámetros retributivos de los semestres posteriores fueron regulados por: IET/2735/2015 (primer semestre de 2016), IET/1209/2016 (segundo semestre de 2016) y ETU (primer semestre de 2017).

Como se puede ver en el ejemplo de la tabla, tanto la retribución a la operación como a la inversión es mayor para las centrales que usan residuos agrícolas y forestales como combustible debido a que, principalmente, el coste de combustible y mantenimiento para este tipo de centrales es mayor.

### 3.2 Estudio práctico

Para entender un poco más sobre el uso de la biomasa y su comportamiento en el método de co-combustión, se estudian pruebas llevadas a cabo por Solvay en años anteriores y otra prueba realizada en la central térmica de Velilla de Carrión (Palencia).

#### 3.2.1 Ensayos anteriores Solvay Torrelavega

Previo al estudio actual, se llevaron a cabo otras pruebas y ensayos a fin de instaurar la co-combustión en Solvay.

##### 3.2.1.1 Pruebas 2006

La primera experiencia de co-combustión de biomasa fue efectuada en las calderas de carbón de la fábrica de Torrelavega tuvo lugar en noviembre de 2006.

En estas pruebas se tomaron las primeras impresiones, dada la pequeña cantidad de biomasa quemada (menor de 100 Toneladas) durante el ensayo. Sin embargo, se empezó a cambiar la

forma de pensar en cuanto a que era hora de explorar nuevos combustibles, los cuales no fuesen de origen fósil y, de este modo, poder entender su comportamiento, viabilidad, ventajas e inconvenientes, etc.

El objetivo principal era en parte económico, la biomasa por aquel entonces suponía una reducción de coste con respecto al carbón utilizado, pero, también se tenía en mente la reducción de Intensidad de Emisión de CO<sub>2</sub> como medida ambiental.

La biomasa utilizada durante estas pruebas fue serrín procedente de la elaboración de pallets y tablas de dos aserraderos cercanos a la fábrica. Se llevaron a cabo análisis en el laboratorio de Solvay con la finalidad de conocer algunos parámetros del serrín suministrado. En estos análisis se medía principalmente, poder calorífico (tanto inferior como superior), densidad de la biomasa, materias volátiles y humedad.

La humedad y el poder calorífico fueron un dato importante ya que permitían saber qué porcentaje de sustitución se introducía en la caldera.

*Tabla 5: Análisis de serrín. Pruebas 2006 (fuente: Solvay)*

	Serrín 1	Serrín 2	Serrín 3
PSE (Kg/dm <sup>3</sup> )	0,1836	0,1676	0,1902
% Humedad	51	34	48
% Humedad higroscópica	10,1	9,9	10,6
PCS (kcal/kg)	4832	4954	4845
PCI (kcal/kg)	3566	3690	3580
Materias volátiles (%)	83	85	84

El serrín se transportaba en camión desde los aserraderos hasta la zona de descarga de vagones de Solvay Torrelavega, lugar por donde se dosifica (tanto el carbón como la biomasa) al circuito de combustible.

La prueba se realizó en la caldera GNSPO Balcke-Dürr (~ 430 toneladas de carbón por día), que se alimentaba al igual que ahora desde los silos número 3 a número 10 (8 silos; 240 toneladas/silo de capacidad). La extracción de los silos se hizo de forma secuencial sacando combustible de cada silo uniformemente con una rotoextractora.



*Ilustración 20: Descarga de serrín en las tolvas de descarga de vagones (fuente: Solvay)*

El combustible era dirigido, ya mezclado, hacia las tolvas de las calderas antes de ser molido y suministrado a la caldera.



*Ilustración 21: Perspectiva de una cinta que transportaba carbón y serrín mezclado hacia la caldera  
(Fuente: Solvay)*

Las principales conclusiones sacadas de este ensayo fueron que:

- El tiempo de descarga era elevado. Para un camión de aproximadamente 24 toneladas era necesario tiempos mayores a una hora para que pudiese descargar correctamente. Sin embargo, el peor problema durante la descarga no fue el tiempo de descarga sino la dificultad para que las tolvas consumieran el serrín y lo enviaran a los silos. El serrín se compactaba, formando “bóvedas” las cuales era necesario que interviniese personal para desatascar. Por esta razón, el tiempo de descarga aumentaba considerablemente.
- Problemas en los molinos por acumulación de serrín. Los molinos, a partir de un porcentaje de sustitución no podían consumir adecuadamente la mezcla de carbón y serrín.
- En alguna prueba se empezó a notar que la caldera sufría una ligera caída de ritmo, pero sin consecuencias graves. Se estima que esta razón fuera causada por un alto porcentaje de sustitución de serrín junto al carbón.
- En las pruebas en las que la concentración de serrín en carbón era menor, no se observó ningún efecto en el hogar de la caldera.

### 3.2.1.2 Prueba 2008

En los ensayos realizados durante 2008, se dosifico serrín y carbón en co-combustión a las calderas GNSPO (Balcke-Dürr) y GNSP1 (Sulzer). Las pruebas duraron cuatro semanas comprendidas entre mayo y julio.

El combustible utilizado volvió a ser serrín y carbón, los cuales tenían los siguientes parámetros:

*Tabla 6: Datos combustibles utilizados en las pruebas de 2008 (fuente: Solvay)*

Combustible	Serrín	Carbón
PCI (kcal/kg)	3000	6000
Materia volátil (%)	59,56	33,72
Humedad (%)	32,7	7,67
Cenizas (%)	7,63	12,11

El serrín era suministrado por un aserradero cercano y llegaba a la fábrica a granel en camiones de 24 toneladas.

En esta ocasión la dosificación se hizo de una manera distinta. Por un lado, la retroextractora dosificaba carbón de la cinta transportadora y, por otro lado, una pala mecánica alimentaba con serrín a una tolva. Esta tolva lo depositaba en una cinta transportadora de velocidad variable, la cinta tenía la función de transportar el serrín hasta la cinta que contenía carbón para ser mezclado. La cinta transportadora estaba provista de un regulador de velocidad, lo que permitía

variar el porcentaje de sustitución en función de la velocidad de la cinta transportadora usada para el serrín.



*Ilustración 22: Carga de la tolva (Fuente: Solvay)*

La mezcla del serrín con el carbón se producía al caer la carga que llevaban las cintas en las tolvas de alimentación a los molinos de las calderas.



*Ilustración 23: Descarga de la cinta del serrín a la cinta transportadora (Fuente: Solvay)*

Este método supuso una ventaja sobre el método empleado en las pruebas de 2006, ya que se podía controlar de una mejor forma el porcentaje de sustitución, pero tenía el inconveniente de que necesitaba de un operario y una pala que ayudase a cargar la tolva.

Durante estas segundas pruebas se tuvieron controles sobre los gases a la salida del economizador, en la impulsión de los molinos y en las tolvas de los dos molinos del GNSP0. Además, se hicieron análisis de inquemados en las cenizas y escorias, y se controló el ensuciamiento de las paredes del hogar de las calderas.

Tras realizar los ensayos, se vio que el porcentaje máximo que podían soportar los molinos era del 2,5%. Con un porcentaje sustitución de 2,1 % el funcionamiento de los molinos era el correcto. Otras conclusiones derivadas de los ensayos son que no hubo variación de los inquemados en cenizas y escorias, ni presencia de CO en tolvas ni en conductos de carbón pulverizado. Tampoco, existió una variación significativa en la analítica de los gases de la caldera. Se descartó cualquier ensuciamiento anormal en el hogar de la caldera y tampoco se observó ninguna traza de serrín en las esclusas de los molinos.

### 3.2.2 Otros ensayos

#### 3.2.2.1 Central térmica Velilla del Rio Carrión

Para entender de una mejor manera el proceso de co-combustión se han estudiado las pruebas realizadas en la central térmica de Velilla del Rio Carrión, localizada en la localidad del mismo nombre en Palencia, propiedad de Iberdrola.

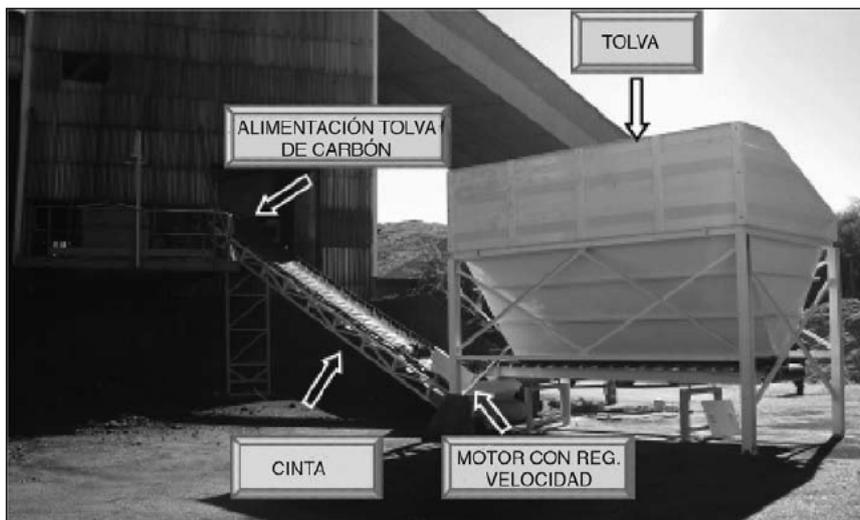
En estas pruebas, con el fin de asegurar la viabilidad de las mismas, se estudiaron los siguientes aspectos:

- Abastecimiento de la biomasa. Establecer garantía de suministro con una disponibilidad estable y precio competitivo con el carbón.
- Capacidad de la instalación existente para el manejo y combustión de biomasa, así como también las modificaciones necesarias para la misma.
- Afecciones de la combustión de biomasa a los equipos de la central.

El objetivo de las pruebas fue estudiar el proceso de sustitución de carbón por biomasa usando la co-combustión de ambos. Para ello se estudió que porcentaje máximo de sustitución se podía alcanzar. Al aumentar el porcentaje de sustitución aparecían problemas en los molinos produciéndose atascos en los clasificadores de los molinos y en los quemadores.

Para poder realizar estas pruebas se alquiló inicialmente una tolva con una cinta transportadora de velocidad variable para dosificar en diferentes porcentajes de sustitución.

Al realizar las pruebas, surgió un problema debido a que la biomasa se atascaba en los molinos. El problema de los atascos fue debido a un tamaño de grano demasiado alto, por esa razón procedieron a pretriturar la biomasa. Utilizaron una trituradora con un tromel provisto de diferentes tamaños de criba para poder probar con diferentes tamaños de biomasa.



*Ilustración 24: Sistema construido para desarrollar las pruebas en CT Velilla del Campo (Fuente: Iberdrola)*

Después de probar con la trituradora, utilizaron molinos de martillos para rebajar a un más la granulometría de la biomasa llegando a la conclusión de que cuando más baja es la granulometría se pueden alcanzar mayores porcentajes de sustitución. El porcentaje de sustitución energética alcanzado en la central fue del 3 %.

## 4. Descripción del medio: Solvay Torrelavega

Conocido el estado del arte de la biomasa, es necesario entender el entorno de la fábrica para posteriormente realizar adecuadamente las pruebas de co-combustión.

Para ello, primero se describe la instalación (localización, medio utilizado, etc.) a fin de concebir el funcionamiento de la misma para, a continuación, poder describir la metodología llevada a cabo y así encontrar el combustible más adecuado para su combustión.

### 4.1 Localización

Solvay Química es una compañía mundial líder en química sostenible, y realiza el 90% de sus ventas en mercados en los que se encuentra entre los 3 líderes mundiales.

La fábrica de Solvay en Torrelavega es el buque insignia del Grupo en España, siendo, además, el más grande y antiguo centro de trabajo del Grupo Solvay en el país. Fue creado en 1908, por Ernest Solvay, importante químico belga que contribuyó de manera importante al método de producción de carbonato sódico, mediante un método que lleva su propio nombre.



*Ilustración 25: Fábrica Solvay Torrelavega (fuente: [www.Solvay.es](http://www.Solvay.es))*

La fábrica se encuentra en un lugar privilegiado para la producción de su componente estrella, el carbonato sódico, al estar cerca del Río Saja-Besaya (el cual abastece a la fábrica de agua), por tener cercanos los puertos de Santander y Requejada (con menor uso debido a problemas de calado de la Ría de San Martín), tener también relativamente cerca minas de carbón (hulla térmica y antracita en Asturias y País Vasco) y al ser Cantabria un lugar rico en la materia prima necesaria para la producción de carbonato: roca caliza.

Aparte de su producto estrella, carbonato sódico, en la fábrica de Torrelavega, Solvay elabora otros productos como bicarbonato sódico, cloruro sódico (sal), cloro, sosa cáustica, hipoclorito sódico (lejía), ácido clorhídrico e hidrógeno. Todos ellos, productos que sirven de química base para otras industrias. Para ello se dedican más de 400 operarios propios más otros subcontratados, todos ellos dispuestos en las 78 hectáreas del complejo.

El complejo fabril se localiza en los exteriores de Torrelavega, más concretamente en el municipio de Barreda, situándose en la riera del Río Saja-Besaya, el cual contribuye aportando agua a la fábrica, siendo este de gran importancia para la existencia de la misma.

*Tabla 7: Datos geográficos de Solvay Torrelavega (fuente: Sigpac)*

Latitud	43° 22' 3,73" N
Longitud	4° 2' 31,30" W
Huso UTM	30
Coordenada X	415.584,37
Coordenada Y	4.803.009,16

## 4.2 Justificación de alternativas

La fábrica de Solvay, en concreto la planta de carbonato sódico, demanda una gran cantidad de energía térmica, la cual se aporta en forma de vapor, generado por la combustión de carbón.

La reducción del factor de emisión de GEI se consigue disminuyendo el consumo de carbón. Esta discusión o, incluso, eliminación paulatina de carbón implica tener que buscar una fuente de energía más amigable con el medio ambiente que permita asegurar la demanda térmica.

Muchas de las fuentes de energía como la hidráulica, eólica o fotovoltaica genera solamente energía cinética que, mediante la debida transformación en un alternador permite generar electricidad. Esto hace necesario la búsqueda de otras alternativas que generen energía en forma de calor directamente.

La biomasa, por el contrario, posee la ventaja de que puede transformarse en energía térmica de forma similar al carbón utilizando un ciclo Rankine convencional. Por esta razón, la biomasa es el medio elegido, en principio, adecuado para ser utilizado como combustible renovable.

## 4.3 Descripción del medio

Como se ha comentado ya, para la elaboración de sus productos "Solvay" requiere una gran cantidad de energía térmica. Esta energía proviene principalmente de la combustión de hulla térmica en las calderas y de la cogeneración de gas. Además de la producción de energía en forma de calor, Solvay Torrelavega es también una fuente de energía eléctrica la cual es, una parte, consumida en régimen de autoconsumo y, otra, vendida a la red eléctrica.

### 4.3.1 Planta térmica de carbón

La combustión de carbón en las calderas transfiere energía en forma de calor al agua contenido en los haces tubulares que forman las pantallas de la caldera para convertirla en vapor. Debido a que el vapor cuando sale de la caldera todavía contiene partículas de agua

líquida, es necesario pasarlo por medio de un circuito secundario, de uno o más recalentadores (situados en la trayectoria de los gases de combustión), para convertirlo en vapor recalentado.

El vapor recalentado, a alta presión, es conducido a través de varias líneas a las turbinas donde se expande, el movimiento de las turbinas unidas por su eje se transfiere a un alternador. El alternador es el encargado de producir la electricidad, la cual es en parte auto consumida y otra parte es vendida a la red.

Para ser transportada es necesario transformarla a una alta tensión y baja intensidad. Esto hace que se reduzcan las pérdidas de por transporte.

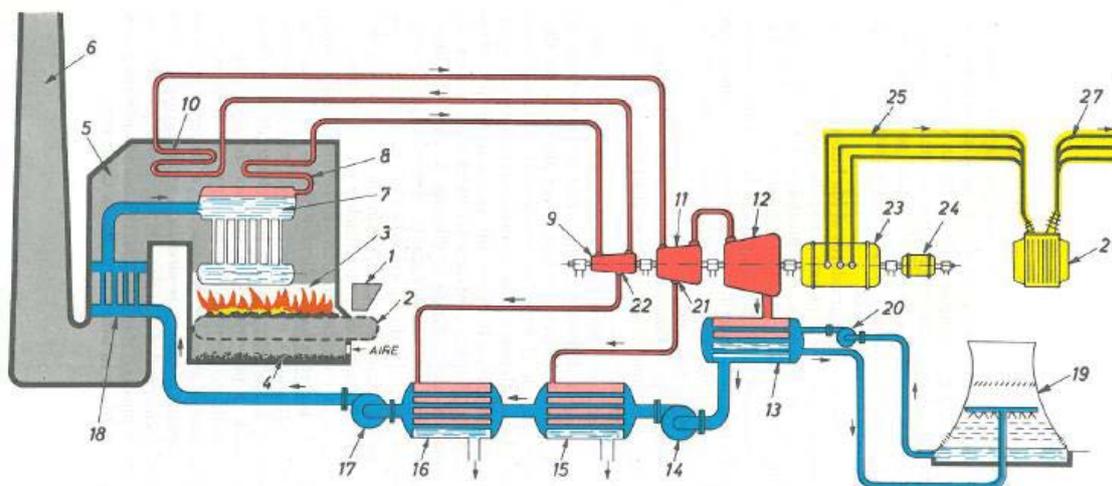


Ilustración 26: Representación esquemática de una central térmica de carbón (Fuente: Enciclopedia CEAC de Electricidad, centrales Eléctricas, José Ramírez y Lorenzo Beltrán).

#### 4.3.1.1 Tolvas de descarga de carbón

El proceso comienza en las tolvas de descarga de carbón. Éstas están localizadas en la zona norte de la fábrica y permiten el acopio de carbón tanto por vía terrestre (mediante camiones de piso móvil o de volquete) como por vía férrea a través de vagones.

Las tolvas poseen una reja superior que sirve como medida de seguridad tanto para evitar que caiga personal accidentalmente dentro de ellas, como para que no caigan otros elementos que puedan dañar la infraestructura.

Las tolvas están provistas por 3 partes a su vez, de 30 m<sup>3</sup> cada una. En el fondo de cada tolva existe una oquedad comunicada con una cinta transportadora.

También disponen de cañones de aire que permiten desatascar posibles obstrucciones formadas durante la descarga de combustibles en su interior. Además, existen varias herramientas manuales que pueden a ayuda también a desatascar alguna obstrucción que se produzca.



*Ilustración 27: Tolvas de descarga de carbón (fuente: elaboración propia)*

Bajo las tolvas, una cinta transportadora permite el tránsito desde las tolvas de descarga hasta los silos en la zona superior. En dicho trayecto, hay dispuestos imanes (similares a los de la *Ilustración 28*) que permiten eliminar del circuito de combustibles elementos metálicos no deseados.



*Ilustración 28: Imán para cintas transportadoras (fuente: <http://www.masanes.com>)*

#### 4.3.1.2 Silos

Los silos son el lugar destinado para el almacenamiento del combustible. Están diseñados para contener carbón y son infraestructuras construidas de hormigón armado dispuestos en posición vertical.

Una serie de cintas transportan el combustible hasta la parte superior del silo. Ahí, un clasificador dinámico reparte el combustible en función del silo que sea necesario llenar.

La zona de la descarga y almacenamiento cuenta con un total de 10 silos de 240 m<sup>3</sup> cada uno, destinados al almacenamiento de carbón. Para extraer el carbón del silo, los silos del 3 al 10 poseen una rotoextractora<sup>2</sup> que permite la dosificación a la cinta transportadora. Los silos 1 y 2 poseen, cada uno de ellos, dos vibroextractoras<sup>3</sup>.



*Ilustración 29: Silos de almacenamiento de carbón de Solvay (fuente: Google maps viewer)*

Además de los silos existe una zona de estacada que permite tener una reserva de carbón adicional para periodos de emergencia.

#### 4.3.1.3 Calderas

Solvay cuenta con dos grandes calderas de carbón pulverizado, cuyos principales parámetros de funcionamiento aparecen en la *Tabla 8*. Ambas producen vapor a alta presión, que, tras ser turbinado para generar electricidad, es enviado a través de una línea de vapor secundaria de menor presión a la planta de carbonato sódico para atender las necesidades térmicas del proceso.

---

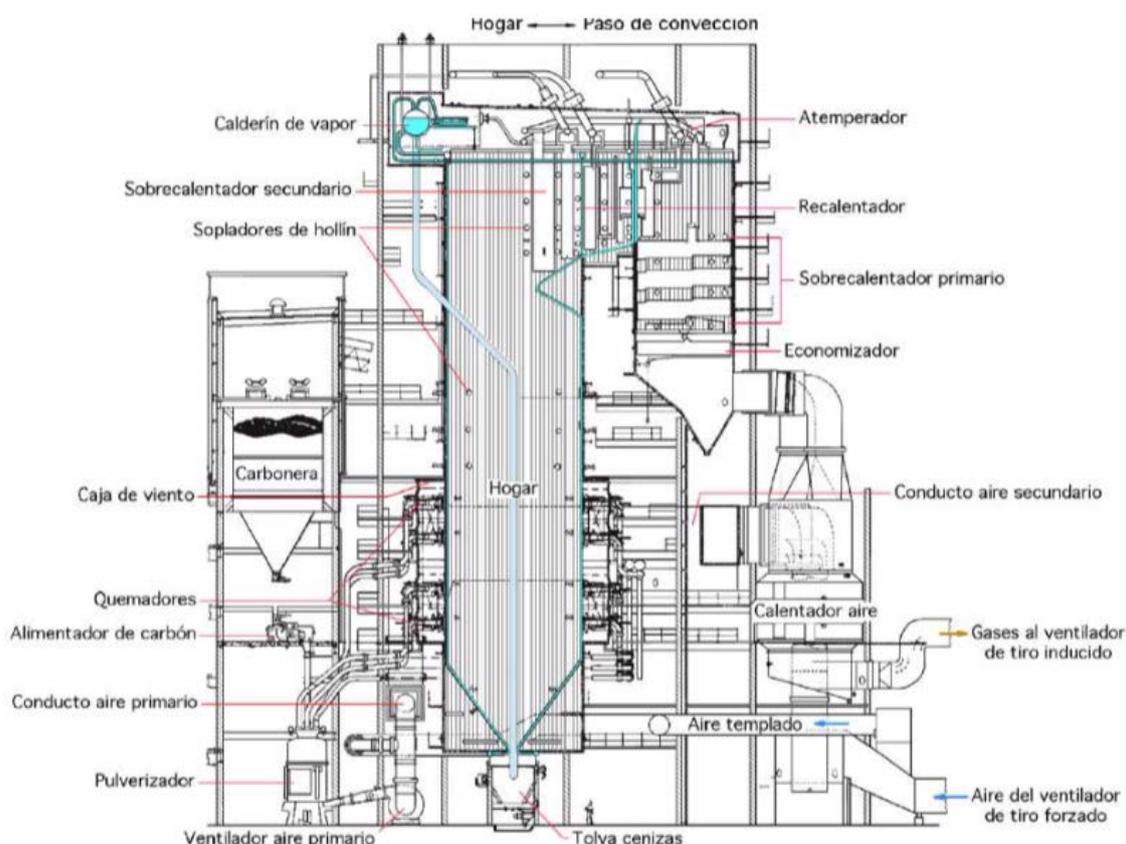
<sup>2</sup> **Rotoextractora:** máquina destinada a extraer el carbón del silo. Se mueve longitudinalmente descargando de forma gradual cada uno de los silos a los que hace servicio.

<sup>3</sup> **Vibroextractora:** máquina destinada a extraer el carbón del silo. Un motor produce una vibración que hace que el material combustible fluya hacia la cinta transportadora.

*Tabla 8. Datos representativos de calderas Sulzer y Balcke-Dürr (fuente: elaboración propia)*

Magnitud	Unidad	Sulzer	B&D
Presión	bar	142,3	138,4
Temperatura	°C	525	538
Entalpía de Vapor	kJ/kg	3389,6	3429,4
Producción Vapor	ton/h	109	173
Potencia ideal	MW	102,6	164,8
$\eta$ Térmico	%	0,9	0,9
Potencia real	MW	114,1	183,1

Estas dos calderas tienen un consumo total de carbón de 800 toneladas al día trabajando a potencial nominal. Para entender mejor el funcionamiento de la caldera, es mejor conocer sus componentes más representativos (Ilustración 30).

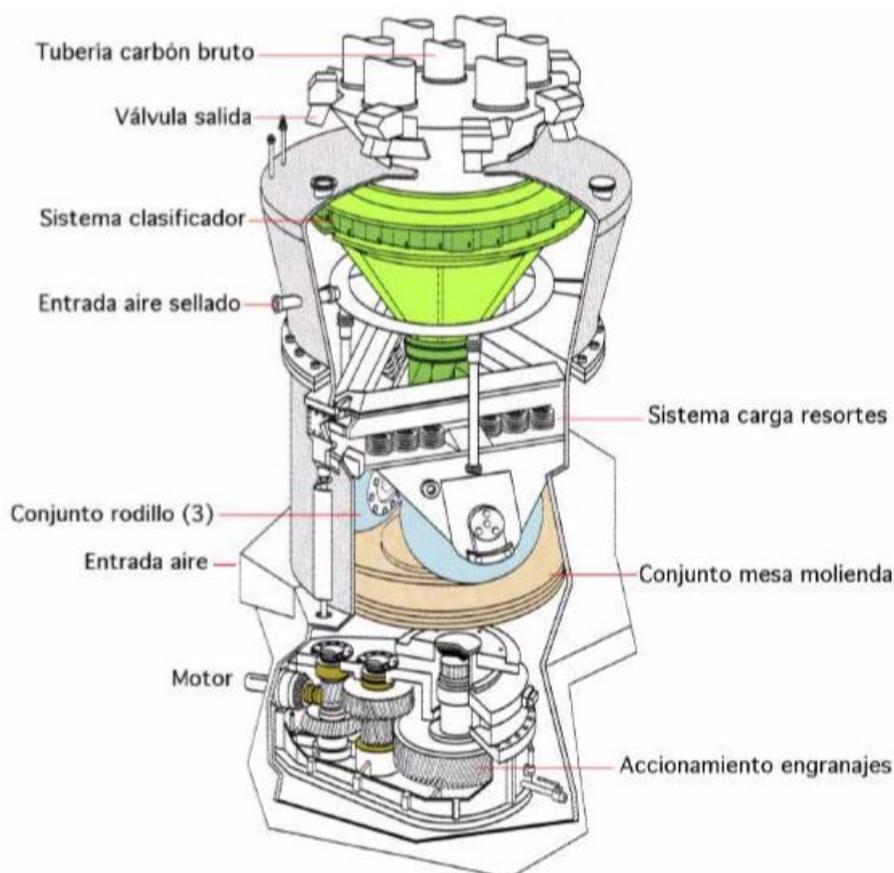


*Ilustración 30: Esquema de caldera de carbón pulverizado soplado al interior del hogar (fuente: <http://es.pfernandezdiez.es/>)*

#### 4.3.1.4 Tolvas de las calderas y pulverizadores

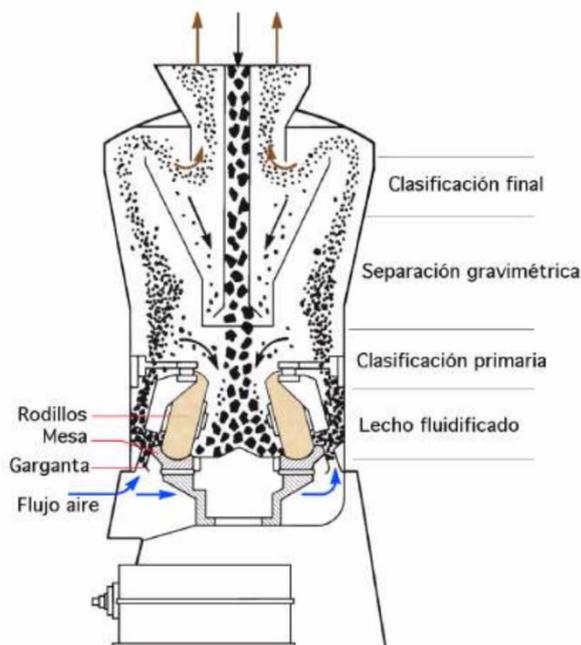
El carbón es transportado desde los silos por medio de las cintas transportadoras hacia las tolvas de las calderas. Una vez está almacenado en las tolvas de la caldera, necesita ser procesado para posteriormente ser combustionado en la caldera. La caldera necesita que el tamaño de grano sea de un tamaño muy fino, por esa razón, antes de ser inyectado, ha de ser pulverizado. Para ello, en la parte inferior de la tolva está provisto un pulverizador compuesto por un molino de rodillos.

El carbón cae por gravedad hacia el interior del pulverizador. El pulverizador o molino dispone de un motor gracias al cual se accionan los rodillos. El movimiento de los rodillos rompe la estructura cristalina del carbón reduciendo así su tamaño de grano.



*Ilustración 31: Pulverizador vertical de rodillos (Fuente: <http://es.pfernandezdiez.es/>)*

Tras ser molido, un flujo de aire eleva las partículas más finas hacia el clasificador dinámico, el cual está encargado de devolver las partículas más gruesas al molino para conseguir el grado de granulometría adecuado configurando el estado inicial de la clasificación de tamaños, llevando a cabo una clasificación gravimétrica. Por otra parte, el aire ascendente sirve para secar el material combustible, mejorando el proceso de combustión.



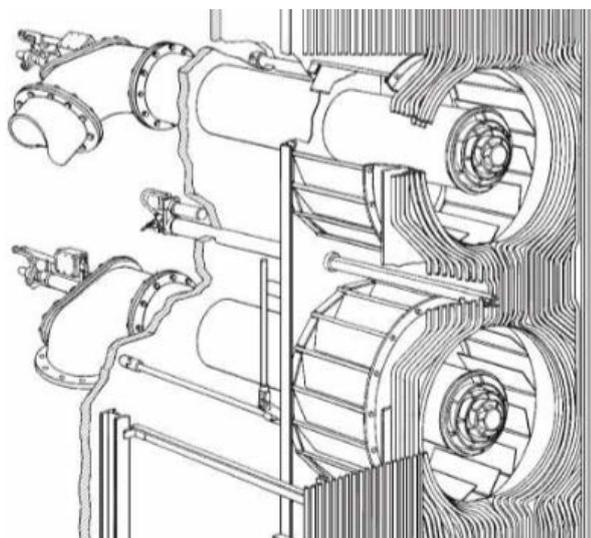
*Ilustración 32: Recirculación de carbón en el pulverizador vertical (fuente: <http://es.pfernandezdiez.es/>)*

Cuando el combustible es apto para ser consumido en la caldera, se dosifica mediante un quemador.

#### 4.3.1.5 Quemador

El quemador consiste en una tobera que suministra un flujo de aire primario más el carbón ya pulverizado hacia al hogar de la caldera, pasando por medio de un difusor encargado de la dispersión del carbón pulverizado mejorando así la combustión.

Están colocados en zonas estratégicas de la caldera donde permiten mejorar la reacción de combustión sin interferir en la posición de los tubos.



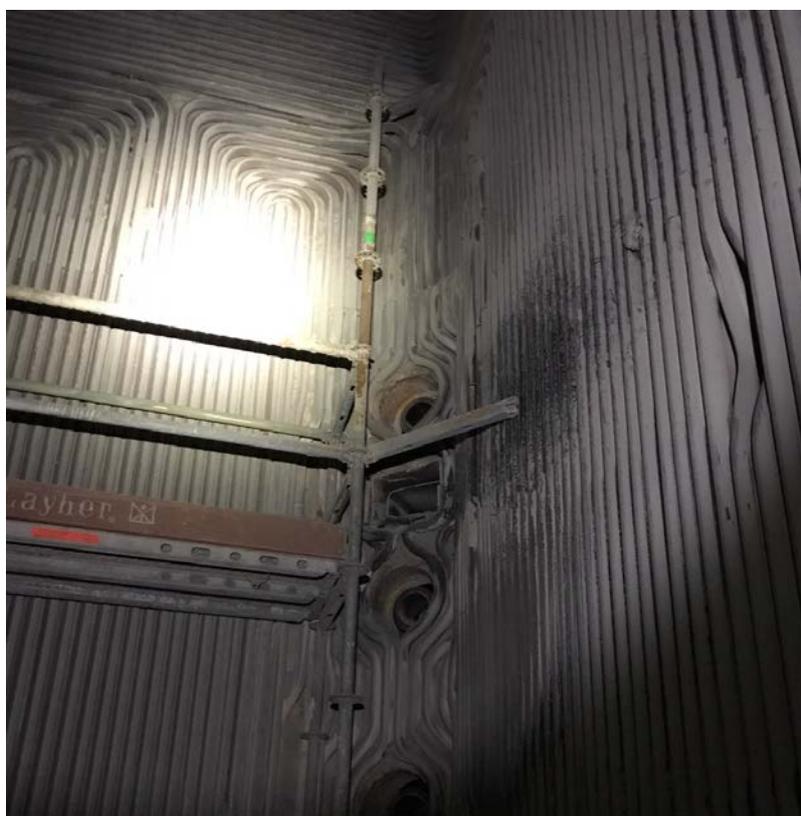
*Ilustración 33: Quemador convencional (fuente: <http://es.pfernandezdiez.es/>)*

#### 4.3.1.6 Hogar de la caldera

El hogar es un espacio libre, adecuado para la combustión del combustible y es también el lugar preparado para refrigerar los humos antes de entrar en la zona de recuperación.

Debido a la alta temperatura de la caldera el carbón es combustionado liberando así su energía interna. Este calor es transferido a través de las paredes del hogar dispuestas por haces tubulares que contienen agua en fase líquida movido por una o más bombas. El agua adquiere la energía liberada por la combustión incrementando su temperatura y presión transformándose así en vapor.

Los tubos que forman las pantallas de la caldera tienen que dejar aberturas necesarias para que se puedan situar adecuadamente: los quemadores, los cañones de limpieza de humos y las lumbreras de inyección de gases o fuel-oil utilizadas para arrancar la caldera.



*Ilustración 34: Hogar caldera Sulzer en proceso de limpieza (fuente: elaboración propia)*

#### 4.3.1.7 Sobrecalentadores

La función principal del sobrecalentador es elevar la temperatura del vapor saturado. Se trata de un intercambiador de gases en el que por un lado discurre un flujo de humos exterior y, por el lado interior, un flujo de vapor.

Está formado por haces de tubos alineados con flujos cruzados, colocados en horizontal o verticalmente. Construidos con aceros aleados debido a las altas temperaturas de operación han de controlar la temperatura a la salida del vapor, la temperatura del material metálico dentro de unos límites que ese material acepte y han de controlar también la presión del flujo de vapor.

El sobrecalentador permite eliminar cualquier molécula de agua líquida que pudiera contener el vapor. El agua líquida no puede turbinarse ya que su acción origina daños en los álabes de las turbinas.

#### 4.3.1.8 Economizador

El economizador es un intercambiador de calor situado a contracorriente con la salida de los humos. Éste elemento no está planteado para la generación directa de vapor, sino que se limita a calentar el agua del sistema que entra al calderín de vapor.

En su diseño cobra gran importancia el espaciado de los humos, siendo necesario el espaciado menor posible para así facilitar adecuadamente: el intercambio térmico, la limpieza exterior de los tubos y también para que facilite una caída de presión limitada en la parte de los humos.

#### 4.3.1.9 Calderín

El calderín es un depósito cilíndrico de gran tamaño situado en la parte superior de la caldera en el que se separa la mezcla de vapor-agua que sale de los tubos de la caldera. Además de esto, el calderín sirve para purificar el vapor o incluso, acumular agua para satisfacer pequeños cambios de carga de la unidad.

#### 4.3.1.10 Intercambiador de gases (calentador de aire)

El calentador o intercambiador de gases es un elemento que ayuda en gran medida a mejorar la eficiencia de la caldera.

Se trata de un intercambiador que aprovecha el calor de los gases a la salida del economizador, y lo aprovecha para calentar el aire comburente.

El aire comburente es tomado del interior de la estructura que envuelve a la caldera. En los días de verano se suele tomar del exterior, ya que muchas veces la temperatura es superior.

## 5. Metodología

Una vez conocido el estado del arte y descrita la planta térmica, se procede a la descripción del método llevado a cabo para la consecución de los objetivos planteados en el presente estudio.

Por un lado, se habla sobre la metodología empleada para la caracterización de combustibles alternativos y, por otro lado, el procedimiento llevado a cabo para realizar las pruebas de co-combustión.

### 5.1 Caracterización de combustibles alternativos para Solvay Torrelavega

Para la realización de las pruebas ha sido necesaria la recopilación de información de varios tipos de biomasa con el fin de ver las diferentes opciones que el mercado presenta. Todo ello radica en que las pruebas deben realizarse con varias biomásas, pudiendo ver así cuál o cuáles son las más adecuadas para adaptarse a la infraestructura existente sin tener que hacer grandes modificaciones.

Para poder llevar a cabo el objetivo de sustituir parte del carbón utilizado por otros combustibles más amigables con el medio ambiente, es necesario encontrar aquellos nuevos combustibles que aseguren la viabilidad técnica y económica de la planta atendiendo para ello a tres principales puntos:

- **Calidad.** En cuanto aquellos que puedan suponer menores problemas técnicos ligados a ensuciamiento de la caldera, corrosión o similares, que no excedan en algún componente químico crítico que pueda originar problemas de cualquier índole. Por lo tanto, se tendrán más en cuenta aquellos combustibles que tengan que tengan un coste de mantenimiento más bajo.
- **Cantidad.** La garantía de suministro debe existir para asegurar y satisfacer las necesidades que implica la sustitución de parte del carbón.
- **Precio.** El más competitivo con el carbón en cuanto a coste por unidad de energía disponible. Juega un papel determinante en la elección, ya que permitirá rechazar a un determinado combustible si, pese a cumplir los requisitos de calidad y cantidad, no permite hacer viable su uso económicamente.



*Ilustración 35: Puntos sobre los que gira la caracterización de combustibles (fuente: elaboración propia)*

Por esto la elección de un determinado combustible dependerá del análisis en base a estos factores. De esta manera, se escogerá aquel combustible que cumpla los requisitos adecuados en relación con los tres puntos anteriores.

### 5.1.1 Combustibles alternativos cercanos a Torrelavega

Atendiendo a estos tres pilares de búsqueda, se realiza una búsqueda de aquellos combustibles que puedan ser localizados lo más cercano posible al conjunto fabril de Solvay Torrelavega. Para ello se realiza un estudio de mercado, centrándose en aquellos productores que puedan a portar un suministro anual suficientemente grande como para asegurar la funcionalidad de la planta.

En este punto, cabe hacer también hincapié en que no solo es importante encontrar el combustible, sino que, para caracterizarlo adecuadamente, es necesario entender en profundidad todos aquellos aspectos que tienen que ver con el combustible (naturaleza, origen) y que pueden tener repercusión sobre la toma de decisión referente a su compra.

#### 5.1.1.1 localización

La localización de combustibles se centrará en situar geográficamente los centros de producción de biomasa cercanos a la fábrica, para así reducir costes de logística, tiempos de transporte, contacto cercano con proveedores, etc.

La búsqueda de biomasa hace necesario la toma de contacto con diferentes empresas de la región. Un medio usado para realizar dicha búsqueda es internet y el contacto con otras empresas consumidoras de biomasa.

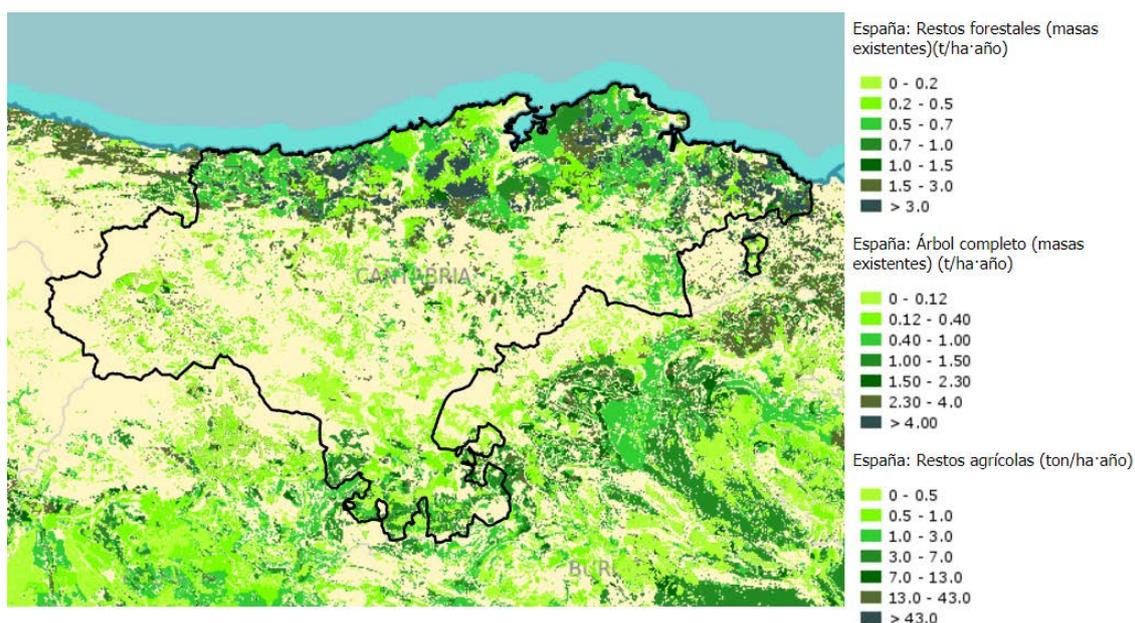
Para acotar la búsqueda, se establece un radio de 250 km alrededor de la fábrica que ayude así a facilitar la búsqueda de biomasa.



*Ilustración 36: Radio de búsqueda de combustible alternativos (fuente: Google Earth y elaboración propia)*

### 5.1.1.2 Biomasa en Cantabria

Cantabria cuenta con una superficie forestal que abarca más del 68% de su territorio [fuente: *Cuarto Inventario Forestal elaborado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio ambiente*]. Esto hace entrever de una manera preliminar que, en esta Comunidad Autónoma, abundan los recursos forestales como bosques plantados para ser aprovechados por la industria maderera y residuos de la actividad industrial de empresas ligadas a la explotación comercial de madera o papelería. Puede existir la posibilidad de que ese recurso forestal pueda adquirir un valor energético al ser tratado como biomasa.

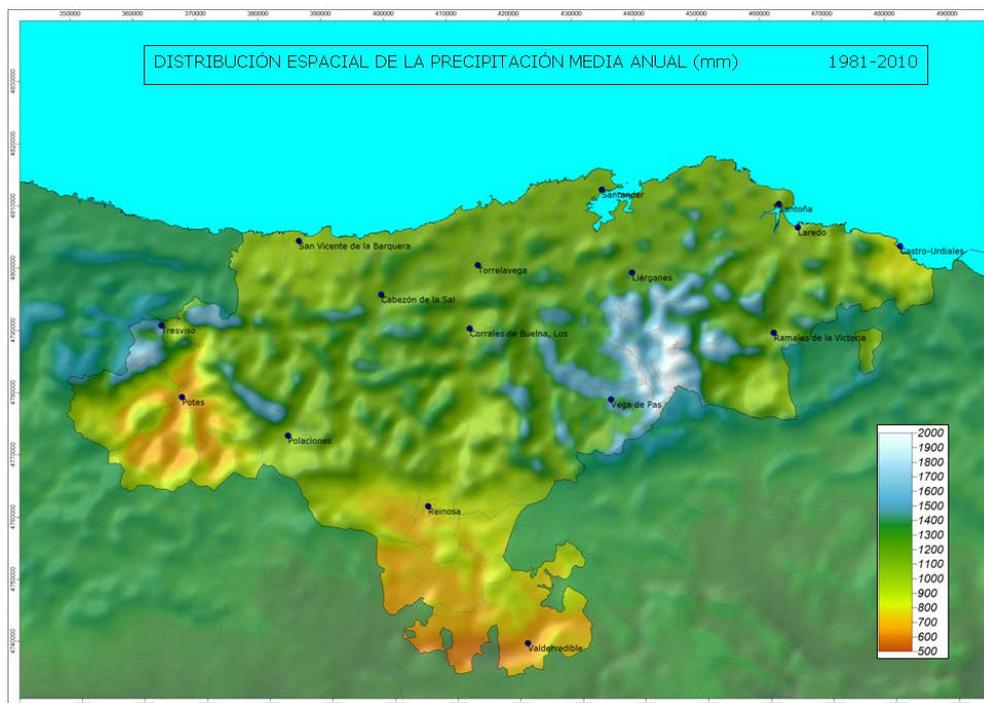


*Ilustración 37: Mapa del potencial de biomasa en Cantabria (fuente: <http://bionline.idae.es/biomasa>)*

Existen dos factores externos que juegan un papel importante repercutiendo en el precio de la biomasa: el clima y la orografía.

Cantabria es una comunidad de carácter montañoso. Su fuerte relieve sitúa a más del 40 % de su superficie por encima de los 700 metros de altitud y una tercera parte de su orografía posee pendientes que superan el 30 % de inclinación. Destaca la formación de la franja del Escudo de Cabuérniga, accidente geográfico que atraviesa la comunidad cántabra paralela a la costa de este a oeste. El relieve influye en las labores forestales, tanto en la realización de cultivo como en las labores de mantenimiento, limpieza y entresacado de la madera.

En cuanto al clima, al igual que todo el norte peninsular, es del tipo Oceánico, templado y húmedo. Las precipitaciones son un rasgo característico de esta comunidad, superando los 1000 mm/año en el 80% de la región concentrándose sobre todo en la parte occidental. La climatología, al igual que la orografía también contribuye dificultar las tareas de cultivo, mantenimiento y entresacado, ya que produce impedimentos técnicos, condiciones adversas para la mano de obra y empeora el estado del medio.



*Ilustración 38: Distribución pluviométrico anual en Cantabria (fuente: Termo pluviometría de Cantabria durante el periodo 1981-2010-AEMET)*

## 5.1.2 Parámetros sobre los que gira la caracterización

### 5.1.2.1 Disponibilidades

La disponibilidad es uno de los puntos principales sobre los que gira la viabilidad del estudio. No solo es necesario satisfacer las necesidades térmicas de biomasa que supondría efectuar una sustitución progresiva mediante co-combustión con el carbón, sino que es necesario, localizar cantidades superiores a las necesarias para, por un lado, no consumir todo el mercado (dejando sin existencias a otros sectores que también se abastecen a base del mismo combustible), y, por otro lado, es posible que, en un futuro, la central térmica evolucione utilizando una mayor cantidad de biomasa. Por esta razón, las disponibilidades deben ser las máximas posibles.

Además, es necesario encontrar varios puntos de suministro para no depender exclusivamente de un solo productor, evitando así que ningún proveedor sea indispensable. De esta manera, se favorece la aplicación de libre mercado, medida que favorece la ley de la oferta y la demanda estableciendo así un que el precio de los bienes sea acordado entre los vendedores y compradores.

Para saber la disponibilidad mínima que debe existir basta con calcular cuanta energía es necesaria sustituir para hacer una co-combustión con un porcentaje de sustitución en concreto (2%, 5%, 10%...).

### 5.1.2.2 Logística

Un aspecto fundamental que repercute sobre la compra del combustible es el coste de logística. La logística supone un coste extra sobre el precio del combustible que puede tener efectos sobre la toma de decisión sobre adquirir o no un tipo de biomasa. La búsqueda de combustible cercano también ayuda a abaratarlo sustancialmente debido a que, al ser las distancias menores, se reducen los tiempos de transporte de combustible.

Entre los medios de transporte disponible están:

- Transporte por camión, mediante vía terrestre. La más flexible de las existentes en cuanto programación y alternativas.
- Transporte mediante vía férrea, permite mover mayor volumen usando para ello la vía férrea. Supone el inconveniente de que la vía férrea no es tan flexible en cuanto a alternativas de camino como el transporte por carretera.
- Transporte por barco, mediante vía marítima. Este método añade otros costes asociados aparte del coste de logística. Está pensada para grandes volúmenes y distancias largas. Usar la vía marítima, implica tener que usar un puerto de carga y otro puerto de descarga lo que implica, a su vez, tener que añadir costes de estiva al precio del combustible. Los puertos cercanos a Solvay son:
  - Puerto de Raos. Es el puerto más grande de Cantabria y el actual usado para la entrada a carbón usado por la fábrica. Comunicado vía férrea y terrestre (entendiendo “terrestre” como transporte por camión) con la fábrica. Dispone de nave destinada al almacenamiento de carbón a largo plazo.
  - Puerto fluvial de Requejada. Situado a escaso un kilómetro de Solvay. Este puerto tiene menor uso debido al escaso calado de la ría y a la ausencia de labores de dragado lo cual dificulta la entrada de barcos de mediano tamaño.

### 5.1.2.3 Naturaleza del combustible y proceso de producción

Para tener una caracterización completa del combustible es necesario entender perfectamente la naturaleza del combustible y el proceso productivo que ha sufrido la planta desde que es cortada hasta que finalmente se convierte en biomasa.

Esto permite clasificar el tipo de combustible que se trata para así ser tratado de una forma u otra.



*Ilustración 39: Proceso de producción de la biomasa (fuente: elaboración propia)*

El en carbón se obvia este proceso de entendimiento, ya que su origen fósil es debido a la carbogénesis, proceso de transformación por el cual se forma carbón a partir de sustancias vegetales.

#### 5.1.2.4 Análisis químico, granulométrica y factor de emisión

- Análisis químico**

Generalmente debe realizarse una caracterización analítica de un combustible antes de ser utilizado, debido a que existen muchos parámetros que determinarán la elección o no elección del mismo. El poder calorífico es por ejemplo el principal parámetro tomado para cálculos del proceso de combustión. Otros parámetros comunes son también objeto de estudio para determinar debidamente la caracterización, como los identificados en la siguiente tabla:

*Tabla 9: Parámetros a determinar para caracterización analítica de biomasa (fuente: propia)*

Componente	Unidad	Método de análisis
Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	DIN EN ISO 17828
Humedad	masa %	DIN EN ISO 181134-2
Cenizas (550°C)	masa %	DIN EN ISO 18122
Cenizas (815°C)	masa %	DIN 51719
Materia Volátil	masa %	DIN EN ISO 18123
Carbono fijo	masa %	DIN 51734
Azufre	masa %	DIN EN ISO 16994
Cloro	masa %	DIN EN ISO 16994
Carbono	masa %	DIN EN ISO 16948
Hidrogeno	masa %	DIN EN ISO 16948
Nitrógeno	masa %	DIN EN ISO 16948
Oxígeno	masa %	DIN EN ISO 16993
Calcio	mg/kg	DIN EN ISO 16967
Magnesio	mg/kg	DIN EN ISO 16967
Potasio	mg/kg	DIN EN ISO 16967
Sodio	mg/kg	DIN EN ISO 16967
Hierro	mg/kg	DIN EN ISO 16967
Silicio	mg/kg	DIN EN ISO 16967
<b>Granulometría</b>		
>80 mm	masa %	DIN EN 15149-1
50-80 mm	masa %	DIN EN 15149-1
15-50 mm	masa %	DIN EN 15149-1
2-15 mm	masa %	DIN EN 15149-1
< 2 mm	masa %	DIN EN 15149-1
Poder calorífico Superior	kcal/kg	DIN EN 14918
	MWh/ton	DIN EN 14918
Poder calorífico inferior s/m.h.	kcal/kg	DIN EN 14918
	MWh/ton	DIN EN 14918

Los análisis de estos parámetros son llevados a cabo por el laboratorio de la propia empresa (para el caso de las pruebas de co-combustión) y por un laboratorio externo subcontratado. Para el análisis son necesarias muestras de 7kg de cada material a analizar para determinar así los componentes que aparecen en la tabla superior.

El carbono fijo, además del método expuesto en la tabla, puede calcularse de manera fácil restando el sumatorio de contenidos en humedad, cenizas y materia volátiles al 100% del contenido en masa de una muestra. La siguiente formula refleja dicho calculo:

$$\text{Carbono fijo} = 100 - (\% \text{ humedad} + \% \text{ cenizas} + \% \text{ materias volátiles}) \quad (1)$$

- **Granulometría**

Otro factor a tener en cuenta es la granulometría. Gracias a ella se puede ver qué materia prima no puede ser consumida por la caldera por exceso de tamaño, necesitando así algún tratamiento específico como un pretriturado.

- **Factor de emisión**

El factor de emisión representa el CO<sub>2</sub> liberado por la combustión y relaciona el contenido de carbono del combustible con la cantidad de dióxido de carbono que se forma tras la combustión. La siguiente ecuación relaciona el contenido de ambos, al reaccionar un mol de dióxido de carbono por cada mol de carbono.

$$\text{Factor de emisión } CO_2 \left( \frac{kg \ CO_2}{ton \ biomasa} \right) = X \left( \frac{kg \ C}{ton} \right) \cdot \frac{44 \left( \frac{kg \ CO_2}{mol} \right)}{12 \left( \frac{kg \ C}{mol} \right)} \quad (2)$$

El valor anterior también se puede obtener en unidades de energía (ton CO<sub>2</sub>/TJ) sabiendo el poder calorífico de la biomasa y aplicando las correspondientes conversiones.

$$\text{Factor de emisión } CO_2 \left( \frac{Kg \ CO_2}{ton \ TJ} \right) = X \left( \frac{kg \ CO_2}{ton \ bio} \right) \cdot \frac{1 \ ton \ bio}{10^3 \ kg} \cdot \frac{1 \ kg}{PCI_{biom} \ kcal} \cdot \frac{1 \ kcal}{4,184 \ kJ} \cdot \frac{10^6 \ kJ}{1 \ TJ} \quad (3)$$

### 5.1.2.5 Índices de control

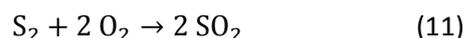
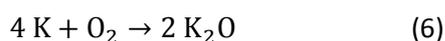
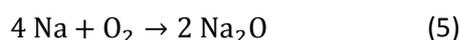
La materia mineral presente en los combustibles utilizados, ya sea carbón o biomasa, resulta ser uno de los mayores problemas en la combustión de la biomasa. Tras el proceso de combustión, la parte mineral pasa a estar en forma de ceniza o bien volante o ceniza que se deposita en el fondo de la caldera. Gran parte de estas cenizas se funde, sobre todo si la combustión no ha sido del todo completa, impactando contra las paredes de la caldera dificultando de este modo la transferencia de calor mediante radiación y causando así, escorificación y, consecuentemente, corrosión.

Del mismo modo, las especies inorgánicas que han volatilizado se condensan sobre los intercambiadores de calor originando ensuciamiento, la cual también puede dar lugar a corrosión y pérdida de calor por convención.

Estas anomalías son conocidas como “*fouling*”; entendiéndolo como el ensuciamiento y “*slagging*”; entiéndelo como escorificaciones.

Para comprobar de forma teórica y preliminar que efectos de “*fouling*” y “*slagging*” pueden tener sobre la caldera la introducción de combustibles biogénicos se han planteado una serie de índices (basados en estudios efectuados por otras instituciones) que sirven para crear una idea preliminar del efecto que tiene la composición química del combustible utilizado sobre la caldera.

Los índices están elaborados para analizar el resultado en diferentes escenarios de co-combustión (1%, 2%, 3%, 5%, 8%, 10%) con el carbón. Los análisis del existentes del carbón muestran los resultados de la materia mineral en la forma oxidada, mientras que los análisis de la biomasa muestran la composición química de la materia inorgánica en la forma reducida del elemento químico. Por esto, los análisis obtenidos de la materia mineral de la biomasa en laboratorio deben ser transformados de la forma reducida a la forma oxidada.



Con estas fórmulas de formación de compuestos en forma oxidada se puede proceder a comparar los diferentes escenarios de co-combustión y observar los resultados de los siguientes índices:

- **Ratio S/Cl**

El ratio S/Cl es un indicador del riesgo de corrosión, la cual puede darse de 3 formas distintas:

- Ataque directo de los gases HCl o Cl<sub>2</sub> a las superficies exterior de los tubos de la caldera.
- Formación de álcali, el cual disuelve la capa de oxido protectora de las superficies tubulares.
- Sulfatación de álcali o cloro en los conductos cerca de la capa de deposición. Por consiguiente, el cloro es liberado formando corrosión en las superficies exteriores de los tubos.

Aparte de estos tres mecanismos, la oxidación activa es el mecanismo más importante de corrosión en las calderas a alta temperatura.

Para hallar este índice basta con dividir el porcentaje de azufre contenido en el combustible entre el porcentaje de cloro del mismo.

- **Índice de Álcali**

El índice de Álcali es un mecanismo utilizado para examinar la tendencia de producir ensuciamiento en la caldera por parte de algunos combustibles.

Este índice relaciona la suma total de óxidos metálicos ( $K_2O$  y  $Na_2O$ ) presentes en la ceniza con el poder calorífico del combustible.

- **Índice de sinterización**

Indica el riesgo de producirse incrustaciones (slagging) en las superficies de las tuberías de la caldera. Relaciona el contenido en masa de la suma de los óxido de magnesio y óxido de calcio ( $CaO + MgO$ ) y la suma de dióxido de sodio más dióxido de potasio ( $Na_2O+K_2O$ ).

- **Ratio molar**

En este índice el potasio y sodio representa el álcali contenido en el combustible. Dividiendo el contenido en azufre (en base molar) entre el sumatorio de potasio y sodio (en base molar), se obtiene este índice. Solo se tiene en cuenta cuando el contenido en Cloro del combustible es mayor que el contenido en el álcali disponible.

- **Índice de aglomeración**

Aplicable solo a calderas de lecho fluido. Indica el riesgo de aglomeración en este tipo de calderas. Se calcula dividiendo la masa de óxido de hierro (III) entre la suma de óxidos de sodio y potasio.

- **Índice de ensuciamiento por silicio**

El contenido en silicio está asociado al ensuciamiento de la caldera. Este índice puede hallarse relacionando el contenido en álcali con el contenido en sílice.

El cálculo y elaboración de los índices ha sido realizado gracias al programa Excel. La siguiente tabla recoge todos estos índices además de exponer las fórmulas para hallarlos y los valores de los márgenes de seguridad.

*Tabla 10: Índices de control (fuente: elaboración propia)*

Índice	Formula		Valor		
			Bajo	Alto	Muy alto
Ratio S/Cl	$\frac{\% S}{\% Cl}$	(12)	> 4	2 - 4	<2

Álcali	$\frac{m K_2O + m Na_2O}{HHV} \left( \frac{kg}{G} \right)$	(13)	<0,17	0,17– 0,34	>0,34
Ratio molar	$\frac{S}{K + Na} \left( \frac{mol}{mol} \right)$	(14)	> 0,34	2-4	<2
			Bajo		Alto
Sinterización	$\frac{CaO + MgO}{Na_2O + K_2O} \left( \frac{Kg}{Kg} \right)$	(15)	>2		<2
Aglomeración	$\frac{Fe_2O_3}{Na_2O + K_2O} \left( \frac{kg}{kg} \right)$	(16)	>0,15		<0,15
Ensuciamiento por silicio	$\frac{K_2O + Na_2O}{SiO_2} \left( \frac{kg}{kg} \right)$	(17)	<1		>1

### 5.1.2.6 Coste del combustible

El coste de combustible es un punto clave en la toma de decisiones. La búsqueda de combustibles alternativos quedará justificada siempre y cuando se localicen aquellos que permitan competir con el precio del carbón.

El coste final de un combustible será la suma de todos aquellos costes o tareas (triturado, secado, etc.) que han sido necesarios emplear desde antes de utilizar el producto hasta que llega al lugar de destino final, donde será consumido.

Por esto cabe definir dos tipos de costes para entender en qué punto del proceso se enmarcan:

- **Coste “ExWorks”** (al finalizar los trabajos). Es el precio a la salida de proceso que tendrá un combustible antes de ser transportado.
- **Coste DDP** (Delivery Duty Paid). Es el precio que tiene un producto al estar puesto en el lugar de destino. Al precio a la salida de producción hay que añadirle: costes de carga y descarga, logística, tasas, almacenamiento...

Como ya se ha visto, el coste de logística es uno de los factores más importantes en la toma de decisión sobre la compra de un combustible, ya que este precio determinará la toma de decisión sobre la compra o rechazo. La búsqueda de combustibles cercanos a la fábrica ayuda a disminuir el coste de logística ya que, al reducir las distancias entre el centro de producción y consumo, se disminuyen los tiempos de transporte.

La comparación del precio de dos o más combustibles diferentes no puede hacerse en coste por masa de combustible ya que no tienen los mismos poderes caloríficos (por ejemplo: no tiene el mismo poder calorífico un kilo de serrín que un kilo de hulla térmica). Por esta razón, para poder ser comparados han de estar todos expresados en coste de energía contenida dentro del combustible. Esto se consigue mediante la siguiente fórmula:

$$X \frac{\text{€uros}}{\text{ton}} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1.000 \text{ kg}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{Y \text{ kcal}} \cdot \frac{1 \text{ kcal}}{4,184 \text{ kJ}} \cdot \frac{1000 \text{ kJ}}{1 \text{ MWs}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} = \text{Coste} \frac{\text{€uros}}{\text{MWh}} \quad (18)$$

### 5.1.3 Análisis instalación de una trituradora

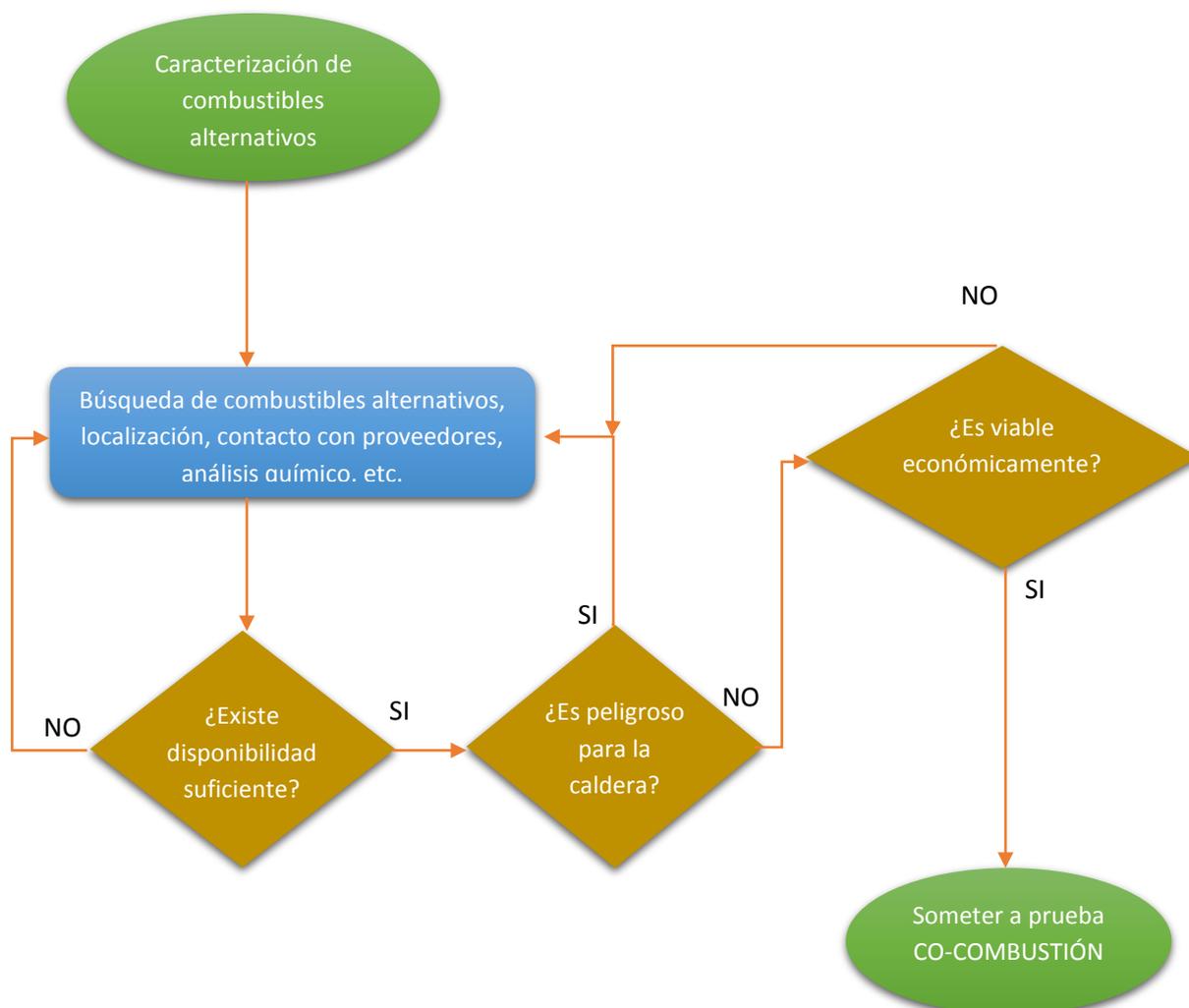
Las pruebas realizadas anteriormente (2006 y 2008) en la caldera de Solvay, así como las pruebas llevadas a cabo en otras centrales, concluyeron que conforme aumenta el tamaño granulométrico del combustible aumentan los problemas de obstrucciones en los molinos.

Esta situación hace necesario el estudio general de viabilidad de un sistema de molienda, al poder ser en planta. El sistema de molienda debe estar formado por un emplazamiento de recepción de biomasa, seguido de una trituradora, la cual tiene la función de reducir el tamaño de grano hasta hacerlo adecuado para la co-combustión.

La trituradora quedara justificada siempre y cuando la diferencia de precios entre los materiales ya triturados al ser comprados y los no triturados, con trituración en fábrica permita hacer rentable esta instalación a corto plazo.

### 5.1.4 Resumen caracterización

Mediante el siguiente diagrama de flujo se pretende resumir y mejorar el entendimiento del proceso de caracterización de combustibles:



*Ilustración 40: Diagrama de flujo caracterización de combustibles alternativos (fuente: elaboración propia)*

## 5.2 Pruebas de co-combustión

Puesto que el carbón se trata de un combustible fósil no renovable, que emite grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera, el Grupo Solvay en Torrelavega tiene como objetivo reducir su intensidad de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) sustituyendo gradualmente parte de la cantidad de combustible fósil consumido por otros combustibles más amigables medioambientalmente reduciendo así su huella de carbono. Para ello, se lleva a cabo un proyecto de I+D con carácter preindustrial, en el que se realiza la co-combustión de biomasa junto al carbón.

Estas pruebas tendrán un carácter reflexivo ya que permitirán dar respuesta a los interrogantes que plantea el uso de biomasa en la instalación. Además, también permitirán conocer de forma práctica cuáles son los problemas que plantea el uso de biomasa de cara a una posible implantación total de biomasa en el futuro.

Las pruebas seguirán un orden lógico desde la llegada a fábrica de los camiones que transportan el combustible hasta que es quemado en las calderas.

### 5.2.1 Plan INNOVA 2016

Las pruebas se encuentran enmarcadas en la línea de subvenciones INNOVA concedidas por la Consejería de Innovación, Industria, Turismo y Comercio del Gobierno de Cantabria, la cual ayuda en gran medida al desarrollo de las pruebas.



*Ilustración 41: Logotipos Gobierno de Cantabria y Unión Europea (fuente: Proyecto Co-COMbio)*

Este plan establece condiciones generales de obligado cumplimiento como llevar a cabo el seguimiento de las pruebas de co-combustión como: tener justificados todos los gastos o facilitar la información requerida a la Consejería de Innovación, Industria, Turismo y Comercio.

### 5.2.2 Evaluación de la descarga

El primer punto por realizar es la descarga en las tolvas de descarga de carbón. Este ha de ser un proceso rápido en el que, tras ser descargada la biomasa, ésta se conduzca al silo número 1. Este silo, destinado al almacenamiento de carbón, ha de ser previamente limpiado antes de la primera prueba con agua y aire a presión para evitar que durante las sucesivas pruebas caigan trazas de carbón contenidas en el silo junto a la biomasa.

Los datos que son tomados en la descarga son los siguientes:

- Tiempo de descarga. El tiempo juega un papel clave en esta parte de las pruebas, ya que, si la descarga se demora demasiado, la empresa suministradora puede penalizar por cada hora de más en la descarga.

- Muestra para análisis. También es necesario tomar, al menos una muestra de cada camión recibido para analizar su poder calórico y humedad. Estos dos parámetros serán necesarios para calcular el porcentaje de sustitución que se hará a la caldera.
- Observaciones generales. Peso de la carga, estado de la carga, tipo de remolque y sus características, impurezas contenidas, etc.

Observada la descarga, el combustible es transportado hasta los silos por medio de las cintas transportadoras.

### 5.2.3 Dosificación desde el silo

Otro de los puntos de gran importancia son los silos donde se almacena temporalmente la biomasa. Estos silos están diseñados para albergar carbón en su interior, pero no biomasa, por lo que es necesario analizar el comportamiento de la biomasa dentro de él (posible compostaje, formación de metano, etc.).

Por otro lado, además de almacenar la biomasa el silo tiene otra función. El silo ha de ayudar a dosificar el porcentaje de sustitución que sea establecido. Esta labor es un tanto compleja debido a que las extractoras de los silos no tienen establecido un valor del flujo de salida de combustible de extracción.

Para poder llevar a cabo la prueba de sustitución de carbón es necesario cambiar la configuración de las extractoras, para que tanto la vibroextractora como la rotoextractora funcionen a la vez. Es necesario modificar una de las vibroextractoras del silo 1 colocándole una tajadera accionada por un cilindro unido a un circuito neumático, la cual variaría de posición en función del paso de biomasa que fuera necesario.

El cálculo del porcentaje de sustitución efectuado se realizaba de forma aproximada en varias fases:

1. Se dosifica solamente carbón a la cinta transportadora durante un tiempo y ésta se para.
2. Con la cinta transportadora llena solamente de carbón, se miden 6 metros de cinta y se pesa el carbón que contiene.
3. Se dosifica de nuevo carbón a la cinta, pero esta vez se dosifica solamente biomasa desde el silo 1.
4. Se repite el proceso de pesaje de biomasa en 6 metros de cinta.

De este modo se puede calcular el valor del porcentaje de sustitución en masa, estableciéndolo como:

$$\% \text{ sustitución en masa} = \frac{\text{masa (kg) de biomasa}}{\text{masa de carbón (kg)} + \text{masa de biomasa (kg)}} \quad (19)$$

Una vez conocido el porcentaje de sustitución en masa se puede calcular el porcentaje de sustitución energético simplemente multiplicando cada valor de la expresión anterior por su poder calorífico.

La expresión anterior también puede hacerse a la inversa, es decir, conocido el porcentaje de sustitución en energía y el poder calorífico de los combustibles que van a ser mezclados, se puede determinar el valor de porcentaje sustitución en masa. La siguiente ecuación permite calcularlo:

$$\%sust.masa = \frac{\% biomasa PCI / PCI biomasa}{\% biomasa PCI / PCI biomasa + \% carbón PCI / PCI carbón} \quad (20)$$

#### 5.2.4 Comportamiento en los molinos y tolvas

Como ya se ha mencionado en la descripción de las tolvas y molinos de la caldera, el comportamiento de los molinos es un punto importante que ha supuesto el obstáculo principal en otras pruebas de co-co-combustión.

Al igual que en las otras pruebas, el molino puede limitar el porcentaje de sustitución máximo que se podrá establecer debido a problemas con la estructura física de la biomasa, la cual está formada por fibras que dificultan en gran medida la molienda.

Para observar a que porcentaje se notan los primeros síntomas de atasco o fallo en la molienda, se controlan ciertos parámetros de los molinos:

- Velocidad del clasificador dinámico.
- Velocidad del clasificador.
- Temperatura del carbón.

La variación de estos parámetros respecto a su funcionamiento normal determinara el porcentaje máximo que se puede alcanzar. El porcentaje máximo alcanzado ayuda también a decidir que otras alternativas existentes para sustituir la biomasa podrían establecerse evitando tener que usar el molino para ello.

#### 5.2.5 Comportamiento en el hogar de la caldera

Las pruebas son solamente realizadas en una de las dos calderas de carbón: la caldera GNSPO Balcke-Dürr.

La caldera está diseñada para la quema de carbón pulverizado, luego ha de evaluarse el comportamiento de la biomasa al ser introducida en ella. Para ello, se hace el seguimiento de:

- La producción de vapor, medida en toneladas de vapor por hora.
- CO a la salida de gases en ppm.
- Porcentaje de oxígeno en la caldera.
- Temperatura antes y después del calentador de gases.

La sensibilidad de estas variables reflejara el comportamiento de la biomasa a nivel de calderas a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Además, estos parámetros también darán una idea de cuál es el porcentaje de sustitución máximo alcanzado.

### 5.2.6 Emisiones

Uno de los objetivos claros del estudio es reducir la intensidad de emisión de gases de efecto invernadero. Puesto que la biomasa también libera CO<sub>2</sub> cuando es combustionada, es difícil de medir empíricamente que cantidad de CO<sub>2</sub> procede del carbón y que cantidad proviene de la biomasa. La manera de diferenciar que cantidad de CO<sub>2</sub> proviene de cada uno, basta con medir la cantidad de carbón consumida y la cantidad de carbón es sustituido por biomasa, dependiendo del porcentaje de sustitución y aplicar el factor de emisión de cada uno.

Por otro lado, según el Real Decreto 815/2013 por el que se aprueban los valores límites de emisiones industriales (anexo 3, parte 1), existen otros contaminantes que han de ser medidos para ver cómo influye la sustitución de biomasa sobre ellos. Estos valores son medidos en la chimenea y son:

*Tabla 11: Valores límite de emisión RD 815/2013 (fuente: elaboración propia)*

Componente	Unidad	Valor limite
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	400
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	450
Partículas	mg/Nm <sup>3</sup>	20
CO	Mg/Nm <sup>3</sup>	100

Estos valores son medidos de continuo en la chimenea y se controla que no sobrepasen los valores límites de emisión.

Los resultados de estos parámetros darán una idea de cómo varía la emisión de los contaminantes en función del porcentaje de sustitución de biomasa.

## 6. Resultados

Tras atender a los capítulos anteriores de descripción del estado del arte de la biomasa y la metodología empleada para la realización del estudio, se muestran en el presente capítulo los resultados obtenidos de las dos partes llevadas a estudio: caracterización de combustibles alternativos, por un lado, y, por otro, pruebas de co-combustión para Solvay Torrelavega.

### 6.1 Caracterización de combustibles

La búsqueda de combustibles ha mostrado varias alternativas disponibles en el entorno cercano de la fábrica de Torrelavega, los principales serían los siguientes:

- **Orujillo.** El orujillo es el subproducto final del procesado de la oliva para obtener aceite de diferentes calidades.
- **Residuos de pino.** El aprovechamiento industrial de la madera del pino para generar tablas y pallets produce varios tipos de residuos, los cuales pueden adquirir una revalorización energética.
- **Residuos y podas de eucalipto.** La explotación del eucalipto para fines industriales (elaboración de papel), trae consigo la formación de residuos tras las labores de corta y entresacado de la madera.
- **Arbustos energéticos.** Existen varios proyectos ligados a la obtención de biomasa a partir de matorrales localizados en zonas de abandonadas, los cuales contribuyen a la formación de incendios. Su gestión permite convertir el problema de los incendios en un recurso energético importante.
- **Combustible Sólido Recuperado (CSR).** La adecuada gestión de residuos municipales abre una posibilidad de aportar un valor energético a los desechos, mejorando así el ciclo de vida de muchos productos.

A continuación, se describe más en detalle los principales combustibles encontrados, así como la naturaleza y proceso de producción llevado a cabo para su valorización como combustible alternativo.

#### 6.1.1 Combustibles encontrados

##### 6.1.1.1 Orujillo

El proceso para elaborar este combustible comienza con la recolecta de la oliva y transporte hasta la almazara, donde tras ser procesado se obtiene un 20% de oliva virgen, y un 80% de residuo conocido como alperujo.

El alperujo es llevado a una extractora, lugar donde es almacenado en balsas y posteriormente tratado para conseguir otra calidad de aceite. Después, es introducido desde las balsas a la extractora, donde se extrae, por un lado, el hueso de la aceituna, y por otro el orujo graso húmedo. El orujo graso húmedo es introducido en un secador tipo "tromel" para reducir el porcentaje de humedad desde un 70% hasta un 8% aproximadamente, obteniendo orujo graso seco. Este orujo con menor porcentaje de humedad es introducido en la extractora que, tras un procesado químico, obtiene por un lado aceite de orujo y, por otro lado, orujillo. El orujillo es la

nueva materia prima que se utiliza, por una parte, en autoconsumo para aportar energía al proceso de secado y, por otra parte, comercializado como biomasa.

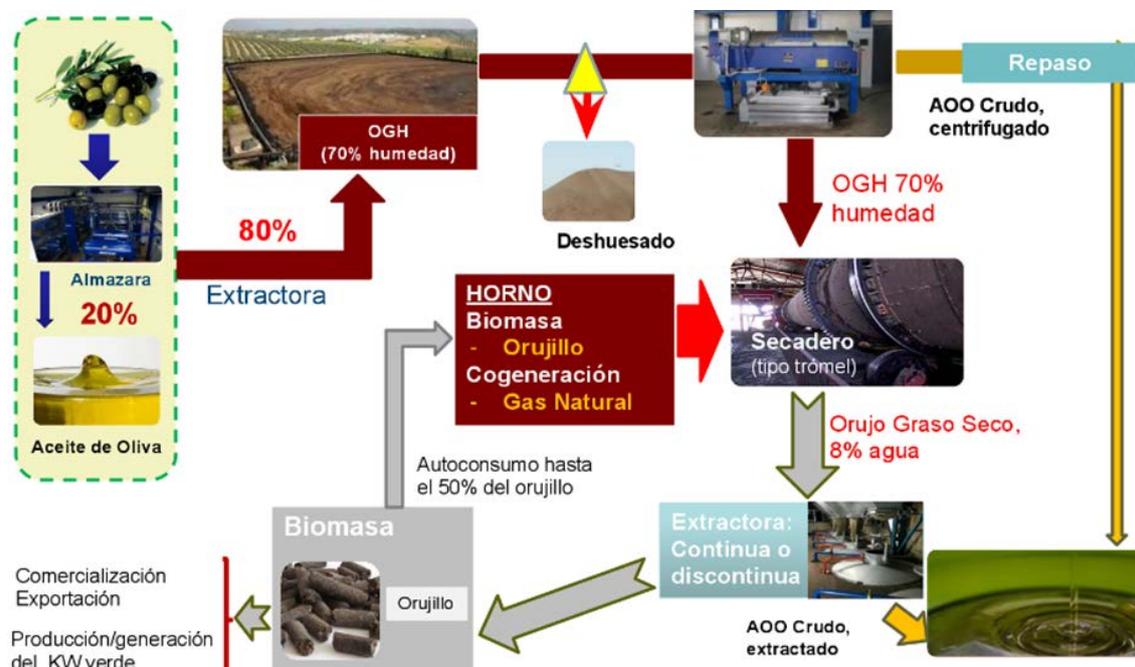


Ilustración 42: Proceso productivo del orujillo (fuente: ANEO)

La mayor parte de la producción de oliva de España se encuentra en la parte sur del país, centrándose en Extremadura y Andalucía, sobre todo. A pesar de encontrarse fuera del radio de búsqueda, es necesario hacer hincapié en este combustible ya que, como se ve en los apartados posteriores de los resultados, el poder calorífico, precio y disponibilidad del orujillo lo hacen muy interesante desde el punto de vista energético.

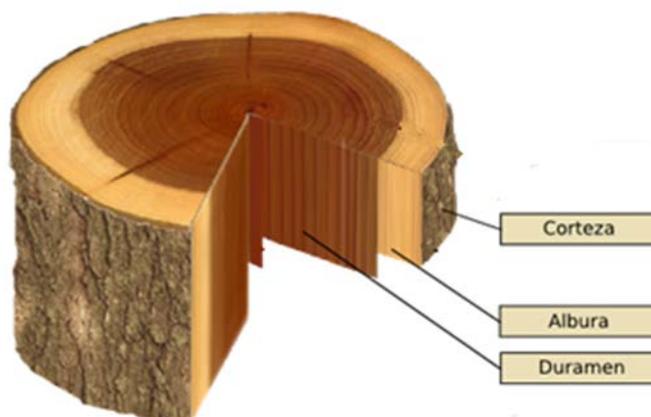
Más del 70% de las orujeras se encuentran representadas por la Asociación Nacional de Empresas de Aceite de Orujo de Oliva (ANEO), la cual ayuda a facilitar la distribución del orujillo entre las empresas interesadas en consumirlo.

El orujillo supone un problema medioambiental ya que, al ser un residuo de la producción de aceite, el no aprovechamiento posterior hace que se tenga que almacenar en vertederos improvisados cercanos a las extractoras. Esto hace que, se contamine el suelo y el agua de ríos y arroyos.

### 6.1.1.2 Residuos del pino

La elaboración de productos a partir de la madera de pino como tablas, elementos estructurales o pallets hace que se generen diferentes residuos.

El proceso de elaboración de todos estos materiales empieza con la tala de plantaciones de pino atlántico (*Pinus pinaster*), variedad de pino extendida por gran parte de España que, tras ser cortado, es transportado hasta un aserradero. Allí se procesa, separando por un lado la corteza de la albura y del duramen (parte usada para la elaboración de tablas).



*Ilustración 43: Anatomía del tronco (fuente: <http://conceptosdeanatomiadela madera.blogspot.com.es>)*

Este proceso origina ciertos subproductos que pueden ser usados para la elaboración de conglomerados, fabricación de pellets térmicos, etc. Los subproductos identificados más importantes son: Astillas, Cortezas y Serrines (húmedo-virgen; recién aserrado el tronco o seco).

- **Astilla de pino**

Subproducto del aserrado de pino, las cuales pueden encontrarse en diferentes calidades en función de la granulometría y del grado de humedad. Para Solvay Torrelavega se encontraron dos tipos principalmente: astilla triturada, astilla “francesa” y astilla gruesa.



*Ilustración 44: Ejemplos de calidades de Astilla de pino (fuente: elaboración propia)*

No obstante, existen otros tipos de calidades de astilla. El problema fundamental por la que no se escogen es, como verá posteriormente, el coste elevado de adquisición de dichas astillas.

- **Corteza de pino**

Parte externa del tronco, la cual no es utilizada para la fabricación de tablas, sino que se desecha con el fin de ser utilizada en decoración de jardines. Al ser la parte más externa del tronco, está en contacto directo con el aire y con ciertos elementos que este transporta. Aparte

de esto, tras la corta muchas veces entra en contacto directo con el suelo “contaminándose” de barro y demás elementos inorgánicos.



*Ilustración 45: Corteza de pino (fuente: elaboración propia)*

- **Serrín**

El serrín es un subproducto que se origina al cortar los troncos para producir tablas. Puede encontrarse de diferentes variedades en función del grado de humedad (húmedo y seco).



*Ilustración 46: Serrín de pino (fuente: elaboración propia)*

El siguiente sinóptico ayuda a comprender mejor de una manera gráfica cual es el proceso productivo para elaborar todos y cada uno de los residuos localizados.

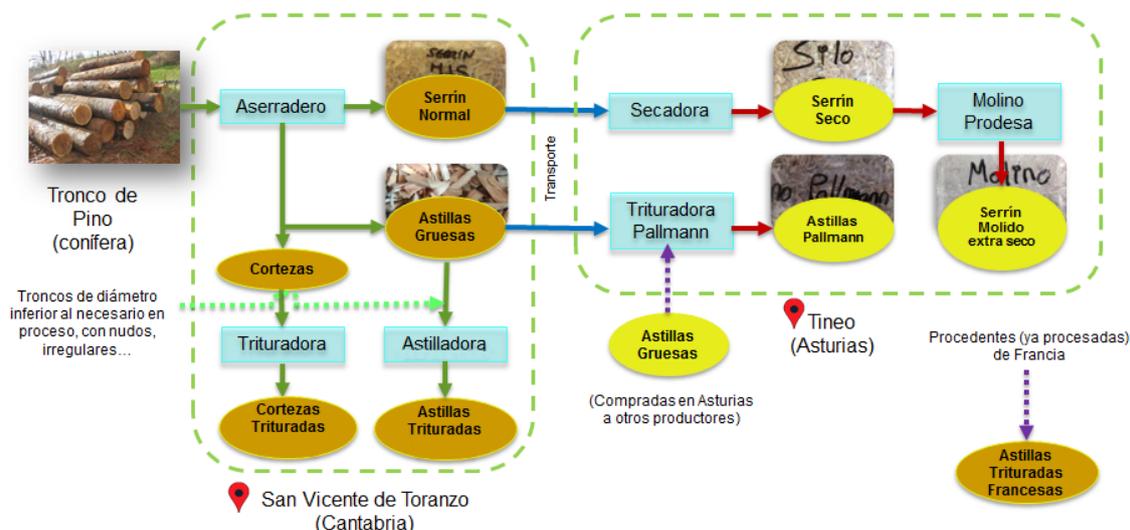


Ilustración 47: Proceso productivo subproductos del pino del principal aserradero encontrado (fuente: elaboración propia)

### 6.1.1.3 Eucalipto

Los eucaliptos son árboles de hoja perenne que pueden alcanzar alturas 60 metros de altura y que están ampliamente implantados en el norte de España para su explotación maderera, existiendo aproximadamente plantadas más de 700.000 hectáreas de ellos.



Ilustración 48: Plantación de Eucalipto (fuente: Nunet.com)

Esta especie se caracteriza por tener un rápido crecimiento y productividad y se ha utilizado recurrentemente en repoblaciones forestales. La explotación maderera del eucalipto tiene como fin obtener troncos como fuente de materia prima para empresas pasteras en forma de rollizo, minas en forma de puntales y a los aserraderos en forma de rolla (piezas de diámetro

mayor de 18 cm, para poder ser aserradas y formar tablas) y recientemente se está utilizando también para carpintería.

Los bosques donde se explota se encuentran a lo largo de la Cordillera Cantábrica (Asturias, Cantabria, País Vasco), siendo plantaciones de Eucalipto dedicadas.

La tala y recolecta de los troncos de eucalipto originan como subproductos: ramas, hojas y cortezas. Tras la entrada en vigor de una nueva normativa en 2005 sobre limpieza de suelos forestales, es necesario recolectar estos subproductos con el fin de evitar incendios.

Después de la extracción de los troncos (3/4 partes del árbol), con destino la industria papelera, es necesario la limpieza del suelo. Los residuos sobre el suelo (restos de ramas, cortezas, etc.) son empacados y transportados hasta un parque de maderas, donde aguardará para su posterior triturado, transformando así un subproducto de la actividad forestal en biomasa, adquiriendo un valor energético.

Estos residuos son almacenados al aire libre hasta ser triturados y predispuestos para ser combustiónados en una planta de biomasa dedicada a este tipo de materiales.



*Ilustración 49: Proceso de obtención de productos y subproductos del eucalipto (fuente: elaboración propia)*

#### 6.1.1.4 Arbustos energéticos

La limpieza de las masas arbustivas y matorrales tiene como objetivo reducir la cantidad de formaciones de arbustos como el tojo, jarales o brezales los cuales contribuyen en gran medida a originar incendios forestales. Estas actividades generan unos residuos que pueden ser susceptibles de adquirir un fin energético.

La gestión sostenible de formaciones de matorral para usos energéticos está enmarcada en el Proyecto Life + Enerbioscrub, llevado a cabo por el Centro de Investigaciones Energéticas,

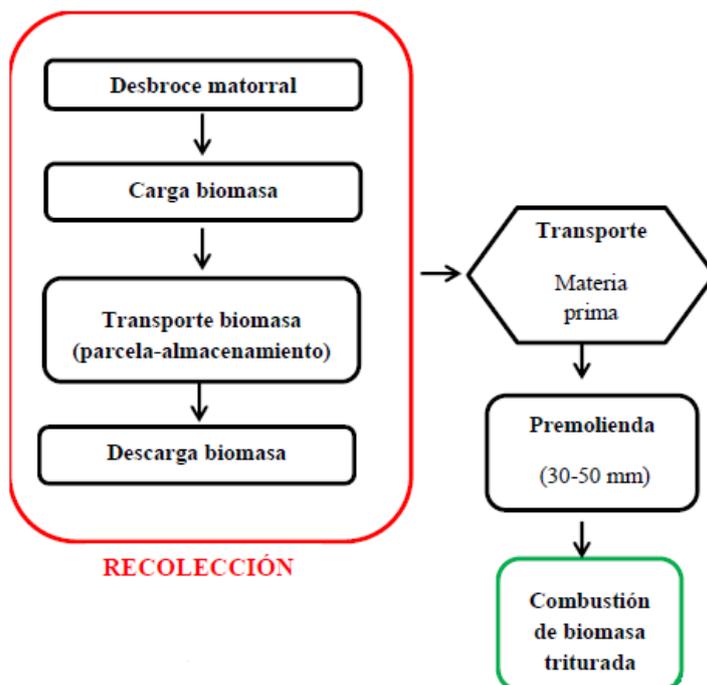
Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), que tiene por objetivos aminorar la virulencia de los incendios forestales, promover la gestión forestal económicamente viable en masas marginales y recomendar políticas que favorezcan la gestión forestal sostenible y rentable de las masas forestales marginales.

El proceso establecido para la limpieza de las masas arbustivas consiste en desbrozar las zonas marginales de matorral mediante la maquinaria especializada (tractor más desbrozadora-empacadora). Esta maquinaria procesa los matorrales empacándolos para crear fardos de biomasa.



*Ilustración 50: Maquinaria de recolecta de matorrales (fuente: Ciemat)*

Estos fardos son almacenados y posteriormente triturados para ser o bien, consumidos en centrales térmicas, o bien, peletizados.



*Ilustración 51: Proceso productivo de biomasa procedente de matorral (fuente: CIEMAT)*

Este tipo de biomasa se encuentra aún en una fase de estudio, por lo que difícilmente puede alcanzar el nivel requerido de precio y disponibilidad. No obstante, es importante no dejar de tenerla en cuenta ya que su uso podría llegar a tener beneficios económicos, medioambientales y sociales, además de poder permitir la gestión de un problema medioambiental para transformarlo beneficio como recurso renovable.

#### 6.1.1.5 Combustible Sólido Recuperado (CSR)

El combustible Sólido Recuperado (CSR) se trata de un combustible formado a partir de residuos no peligrosos para su uso de plantas de incineración o co-incineración.

La fabricación del CSR es llevada a cabo, generalmente por gestores de residuos encargados de todo el procesamiento para obtener una calidad final de producto requerida, y que permite adecuar el material al fin que va destinado, obteniendo un combustible que cumple con la certificación CEN y por los requerimientos del usuario final.

La composición de este material suele ser bastante heterogénea, formada principalmente por las siguientes fracciones:

- Restos textiles
- Espumas
- Madera
- Otros (plásticos, papel y material orgánico)



Restos textiles



Restos de Espuma



Madera



Otros  
(Plásticos, Papel,  
material orgánico)

*Ilustración 52: Materiales representativos de la fracción de muestra comprendida entre 20-50 mm  
(fuente: Cogersa)*

Su uso en España no está muy extendido limitándose su aplicación principalmente en algunas cementeras. El uso de CSR como combustible aporta numerosas ventajas tanto a nivel económico como ambiental, gestión de residuos más sostenible, reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de origen y menor dependencia de la energía exterior.

Su utilización como combustible en la caldera de carbón pulverizado de Solvay en co-combustión con el carbón, no es aceptable, ya que sería necesario, por un lado, tener permiso para por parte de la Consejería de Medio Ambiente para usar este combustible y, por otro lado, adaptar la planta térmica para procesar un combustible así. Por estas razones, no sería de momento un combustible a tener en cuenta, pero sí que puede ser tenido en cuenta para proyectos futuros.

### 6.1.2 Localización de los centros de producción y logística empleada

En el entorno cercano a la fábrica destacan dos centros de producción principales, el más cercano se encuentra en el polígono industrial de Reocín a escasos 10 km de distancia de la fábrica, y produce biomasa a partir de restos y podas de eucalipto. Se trata de un centro que dispone de dos trituradoras, las cuales reducen el tamaño de grano de los fardos de restos y podas de eucaliptos hasta el tamaño requerido por una planta de generación eléctrica a partir de biomasa situada a escasos metros. El segundo lugar encontrado, donde se puede obtener biomasa, se trata de un aserradero situado en el municipio de San Vicente de Toranzo. En dicho aserradero se producen tablas y pallets los cuales generan residuos del pino: astillas, serrín y cortezas.

Debido a que tanto los restos de eucalipto y del pino están situados a cortas distancias hacen viablemente mejor el transporte por carretera mediante camión.

El orujillo se encuentra localizado en el sur de España, para abastecerse de él existen varias posibilidades. La primera, es comprarlo directamente a las extractoras de aceite de orujo, la segunda es entrar en contacto con la asociación de productores de aceite de orujo y orujillo ANEO, los cuales ayudan facilitando el modo de suministrar más económico para ambas partes.

Para el transporte de orujillo existen varias opciones, la primera opción para realizar las pruebas es el transporte por carretera mediante camiones, la segunda opción estaría encaminada, a consumos de biomasa mucho mayores e implicaría el transporte mediante barcos. Para ello el orujillo habría de ser transportado hasta un puerto del sur (Motril, puerto fluvial de Sevilla, puerto de Málaga o puerto de Almería) y desde allí ser transportado mediante barco hasta el puerto de Santander, donde se puede establecer un transporte hacia la fábrica similar al realizado para el carbón.

Los fardos de matorral están localizados en las provincias de León y Ávila, el medio utilizado para el transporte sería mediante camión. Se ha de tener en cuenta el precio de la biomasa en comparación con el resto de alternativas, ya que el transporte a largas distancias puede encarecer el precio final de la mercancía como se verá más adelante en el presente estudio.

El CSR encontrado es producido en la provincia de Asturias, más concretamente en el municipio de Serín. Al igual que con los fardos de matorral se ha de tener en cuenta la distancia de

transporte ya que esto puede encarecer sensiblemente el transporte escogido, al igual que en el caso anterior mediante camión.



Ilustración 53: Mapa de localizaciones de proveedores (fuente: elaboración propia)

La siguiente tabla muestra de forma resumida los productos encontrados con sus localizaciones y el modo empleado de transporte.

Tabla 12: Localizaciones y logística de los combustibles encontrados (fuente: elaboración propia)

Producto	Localización	Logística
Residuos y podas de eucalipto	Reocín (Cantabria)	Camión
Residuos de pino (astillas, cortezas y serrín)	San Vicente de Toranzo (Cantabria)	Camión
Orujillo	Jaén	Camión, barco o vagón
	Pinos Puente (Granada)	Camión, barco o vagón
Matorrales	León y Soria	Camión
CSR	Serín (Asturias)	Camión

### 6.1.3 Análisis químico, granulométrico y factor de emisión

A continuación, se muestran los resultados de los análisis efectuados sobre cada una de las materias primas caracterizadas.

- **Análisis químico**

Los siguientes resultados han sido elaborados por un laboratorio externo a la fábrica, y se muestran los resultados de las muestras tal cual han sido recibidas (AR = As Received) y en base seca (DAF = Dry Ash Free).

- **Orujillo**

Los resultados de orujillo muestran que se trata de un combustible con bajo contenido en humedad. El bajo contenido en humedad repercute sobre el poder calorífico que muestra valores comprendidos entre 4000 kcal/kg, siendo dos terceras partes del poder calorífico de la hulla. Esto es importante porque cuanto mayor poder calorífico tenga menores serán los volúmenes que manejar.

Destaca también el contenido del potasio en los componentes inorgánicos. El potasio contribuye a reducir el punto de fusión de las cenizas, lo que puede originar problemas de ensuciamiento, incrustaciones y escorificación. Además, el potasio tiene un efecto nocivo sobre los catalizadores de NO<sub>x</sub>, en porcentajes de co-combustión superiores al 2% produce un efecto de envenenamiento sobre los filtros. Por lo tanto, no se puede dosificar a más del 2% de co-combustión.

*Tabla 13: Resultado análisis Orujillos (fuente: propia)*

Componente	Unidad	Orujillo 1		Orujillo 2		Orujillo 3	
		AR	DAF	AR	DAF	AR	DAF
Fecha de recepción	dd/mm/aaaa	29/07/2015		23/12/2016		23/12/2016	
Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	690	-	688	-	738	-
Humedad	% masa	11,35	-	11,3	-	13,1	-
Cenizas (550°C)	% masa	8,2	-	7,37	-	7,1	-
Cenizas (815°C)	% masa	-	-	6,4	-	6,26	-
Materia Volátil	% masa	63,77	79,27	63,8	77,5	63,4	78,7
Carbono fijo	% masa	-	0,2	18,5	22,5	17,2	21,3
Azufre	% masa	0,16	0,2	0,11	0,13	0,072	0,089
Cloro	% masa	0,27	0,3	0,21	0,24	0,16	0,19
Carbono	% masa	43,17	53,66	44	53,5	42,1	52,3
Hidrogeno	% masa	4,63	5,75	5,3	6,44	5,41	6,7
Nitrógeno	% masa	1,38	1,72	1,37	1,66	1,33	1,65
Oxigeno	% masa	31,11	38,67	31,3	38,1	31,5	39,1
Calcio	mg/kg	-	-	6000	7300	5700	7100
Magnesio	mg/kg	-	-	1300	1600	1700	2200
Potasio	mg/kg	-	-	28000	34000	25000	31000
Sodio	mg/kg	-	-	220	270	160	190
Poder calorífico Superior	kcal/kg	-	-	4307	5233	4000	4960
	MWh/ton	-	-	5,01	6,08	4,65	5,76
Poder calorífico inferior s/m.h.	kcal/kg	4005	-	3966	4899	3643	4612
	MWh/ton	4,65	-	4,61	5,69	4,23	5,36

**- Subproductos del pino: astillas, cortezas y serrín**

Al contrario que el orujillo los resultados de las astillas muestran cierta variabilidad en cuanto al contenido de humedad. Destaca también el bajo contenido de cenizas que se forma tras su combustión.

En comparación con el orujillo el contenido en potasio presenta valores más bajos.

*Tabla 14: Resultados análisis subproductos del pino (1) (fuente: elaboración propia)*

Componente	Unidad	Astillas 1		Astillas 2		Astillas 3 (Toranzo)	
		AR	DAF	AR	DAF	AR	DAF
Fecha de recepción	dd/mm/aaaa	10/01/2017		03/05/2017		03/05/2017	
Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	261	-	261	-	353	-
Humedad	% masa	35,9	-	50,1	-	55,1	-
Cenizas (550°C)	% masa	0,21	-	0,22	-	0,12	-
Cenizas (815°C)	% masa	0,2	-	0,13	-	0,04	-
Materia Volátil	% masa	53,4	83,6	41,6	83,6	37,8	84,2
Carbono fijo	% masa	10,5	16,4	8,1	16,4	7,1	15,8
Azufre	% masa	0,006	0,01	0,005	0,01	0,004	0,01
Cloro	% masa	0,008	0,012	<0,005	<0,01	<0,004	<0,01
Carbono	% masa	32,7	51,2	25,4	51	22,6	50,4
Hidrogeno	% masa	3,95	6,18	3,13	6,29	2,82	6,3
Nitrógeno	% masa	<0,06	<0,1	0,1	0,21	0,08	0,18
Oxígeno	% masa	27,3	42,7	21,1	42,5	19,4	43,2
Calcio	mg/kg	580	900	450	900	310	700
Magnesio	mg/kg	130	200	140	290	99	220
Potasio	mg/kg	380	590	380	760	300	670
Sodio	mg/kg	64	100	25	50	<20	<50
Hierro <sup>4</sup>	mg/kg						
Silicio	mg/kg						
Poder calorífico Superior	kcal/kg	3148	4926	2405	4833	2161	4818
	MWh/ton	3,66	5,73	2,79	5,62	2,51	6,60
Poder calorífico inferior s/m.h.	kcal/kg	2733	4605	1950	4506	1693	4490
	MWh/ton	3,18	5,35	2,27	5,24	1,97	5,22

<sup>4</sup> Los contenidos de Hierro y Silicio no fueron analizados debido a que por la fecha de realización del análisis no se tenían en cuenta.

Durante la búsqueda de combustibles surgió una oportunidad de mercado con respecto a un tipo de astilla proveniente de Francia (“astilla francesa”) que presentaba buenas propiedades físicas (baja humedad, adecuada granulometría) y se decidió proceder a su análisis. Además, esta variedad de astilla presentó un alto poder calorífico, superando las 3.400 kcal/kg en PCI.

Los análisis de las cortezas muestran que tienen propiedades parecidas al resto de componentes de pino. Al ser la parte más exterior del pino, presenta un menor contenido en humedad, por lo que el poder calorífico aumenta con respecto a las astillas.

*Tabla 15: Resultados análisis subproductos del pino (2) (fuente: elaboración propia)*

Componente	Unidad	Astillas 4 (Francia)		Astillas 5		Cortezas de pino 1		Cortezas de pino 2	
		AR	DAF	AR	DAF	AR	DAF	AR	DAF
Fecha de recepción	dd/mm/aaaa	19/05/2017		19/05/2017		10/01/2017		19/05/2017	
Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	272	-	263	-	228	-	217	-
Humedad	% masa	21,9	-	40,3	-	27,4	-	43,8	-
Cenizas (550°C)	% masa	2,8	-	0,87	-	0,52	-	0,74	-
Cenizas (815°C)	% masa	2,66	-	0,71	-	0,46	-	0,67	-
Materia Volátil	% masa	57,3	76	41,1	69,7	47,7	66,1	44,9	80,9
Carbono fijo	% masa	18,1	24	17,9	30,3	24,4	33,9	10,6	19,1
Azufre	% masa	0,008	0,01	0,009	0,015	0,008	0,011	0,006	0,01
Cloro	% masa	0,008	0,01	0,007	0,012	0,015	0,02	0,006	0,01
Carbono	% masa	40,8	54,1	33,4	56,6	41,7	57,9	30,1	54,1
Hidrogeno	% masa	4,61	6,11	3,4	5,77	4,12	5,72	3,52	6,35
Nitrógeno	% masa	0,23	0,3	0,18	0,3	0,07	<0,1	0,15	0,26
Oxigeno	% masa	29,8	39,5	22	37,3	26,3	36,4	21,8	39,2
Calcio	mg/kg	2000	2600	2000	3300	1600	2200	960	1700
Magnesio	mg/kg	460	610	360	610	130	180	180	320
Potasio	mg/kg	780	1000	600	1000	360	500	390	710
Sodio	mg/kg	120	170	130	210	87	120	34	61
Hierro	mg/kg								
Silicio	mg/kg								
Poder calorífico Superior	kcal/kg	3805	5044	3067	5199	3872	5367	2842	5118
	MWh/ton	4,42	5,86	3,56	6,04	4,50	6,24	3,31	5,95
Poder calorífico inferior s/m.h.	kcal/kg	3438	4727	2655	4900	3498	5071	2403	4789
	MWh/ton	4,00	5,49	3,09	5,69	4,07	5,89	2,79	5,57

Los serrines analizados mostraban una gran variabilidad en cuanto a la humedad, siendo este el parámetro más cambiante ya que en los cuatro casos de estudio el resto de parámetros resultan ser muy parecidos.

La ventaja de esta materia prima es que, en comparación con el resto de subproductos del pino poseen una granulometría más pequeña, como se ve en la tabla de análisis granulométrico.

*Tabla 16: Resultados análisis subproductos del pino (3) (fuente: elaboración propia)*

Componente	Unidad	Serrín seco 1		Serrín seco 2		Serrín húmedo 1		Serrín húmedo 2	
		AR	DAF	AR	DAF	AR	DAF	AR	DAF
Fecha de recepción	dd/mm/aaaa	03/05/2017		10/01/2017		10/01/2017		03/05/2017	
Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	229	-	189	-	191	-	288	-
Humedad	% masa	9	-	10,5	-	44,3	-	52,3	-
Cenizas (550°C)	% masa	0,59	-	0,36	-	0,12	-	0,15	-
Cenizas (815°C)	% masa	0,47	-	0,25	-	0,09	-	0,08	-
Materia Volátil	% masa	76,2	84,1	74,3	83,2	46,8	84,1	39,9	83,8
Carbono fijo	% masa	14,4	15,9	15	16,8	8,8	15,9	7,7	16,2
Azufre	% masa	0,009	0,01	0,009	0,01	0,006	0,01	0,005	0,01
Cloro	% masa	<0,009	<0,01	<0,009	<0,01	0,011	0,02	<0,005	<0,01
Carbono	% masa	46,5	51,4	46	51,5	28,6	51,5	24,3	51,1
Hidrogeno	% masa	5,78	6,38	5,68	6,37	3,41	6,13	3,04	6,38
Nitrógeno	% masa	0,17	0,19	0,18	0,2	<0,06	<0,1	0,1	0,2
Oxigeno	% masa	38,1	42,1	37,4	41,9	23,6	42,4	20,2	42,3
Calcio	mg/kg	1000	1100	810	900	450	800	380	800
Magnesio	mg/kg	240	260	250	280	120	210	110	230
Potasio	mg/kg	500	550	570	640	240	430	240	500
Sodio	mg/kg	46	50	45	50	50	90	29	60
Hierro	mg/kg								
Silicio	mg/kg								
Poder calorífico Superior	kcal/kg	4499	4970	4427	4960	2780	5000	2340	4914
	MWh/ton	5,23	5,78	5,15	5,77	3,24	5,82	2,72	5,72
Poder calorífico inferior s/m.h.	kcal/kg	4146	4638	4071	4630	2345	4681	1877	4583
	MWh/ton	4,82	5,39	4,73	5,38	2,73	5,44	2,18	5,33

**- Restos y podas de eucalipto**

En cuanto a los residuos del eucalipto, en comparación con otros análisis, presenta valores superiores de cenizas, además de tener un menor contenido en carbono.

Además de entre los compuestos inorgánicos que forman esta biomasa, destaca el alto contenido en calcio que contiene.

*Tabla 17: Resultado análisis eucalipto (fuente: elaboración propia)*

Componente	Unidad	Restos Eucalipto	
		AR	DAF
Fecha de recepción	dd/mm/aaaa	05/07/2017	
Densidad aparente	kg/m <sup>3</sup>	155	-
Humedad	% masa	29,6	-
Cenizas (550°C)	% masa	6,41	-
Cenizas (815°C)	% masa	5,41	-
Materia Volátil	% masa	52,7	81,1
Carbono fijo	% masa	12,3	18,9
Azufre	% masa	0,013	0,021
Cloro	% masa	0,077	0,12
Carbono	% masa	32,5	49,9
Hidrogeno	% masa	4,07	6,26
Nitrógeno	% masa	0,37	0,56
Oxígeno	% masa	28	43,1
Calcio	mg/kg	9200	14000
Magnesio	mg/kg	990	1700
Potasio	mg/kg	2100	1500
Sodio	mg/kg	280	3200
Hierro	mg/kg	900	6900
Silicio	mg/kg	3600	430
Poder calorífico Superior	kcal/kg	3067	4719
	MWh/ton	3,56	5,48
Poder calorífico inferior s/m.h.	kcal/kg	2683	4393
	MWh/ton	3,12	5,11

Para el resto de biomásas en lugar de hacer un análisis de laboratorio de todos los componentes lo cual supone un coste extra para el estudio, se ha utilizado la información facilitada por proveedores de cada biomasa en concreto.

- **Biomasa de matorrales**

*Tabla 18: Análisis químico biomasa de matorrales (fuente: Proyecto Enerbioscrub, Ciemat)*

		BIOMASA DE MATORRALES ENERBIOSCRUB				OTRAS BIOMASAS		
ZONA		Las Navas	Soria	Fabero	As Pontes	Pino (madera)	Chopo de turno corto (parte aérea sin hojas)	Paja de cereal
Especie principal		Escoba (parte aérea)	Jara (parte aérea)	Brezo (parte aérea)	Tojo (parte aérea)			
Parámetro	Unidad							
Ceniza	% b.s.	1,4	2,6	1,4	1,5	0,30	2,0	5,0
PCS <sub>v,0</sub>	MJ kg <sup>-1</sup>	20,7	19,9	21,8	20,1	20,5	19,8	18,8
PCI <sub>p,0</sub>	MJ kg <sup>-1</sup>	19,4	18,6	20,5	18,8	19,1	18,4	17,6
C	% b.s.	50,6	49,4	54,0	50,4	51	48	47
H	% b.s.	6,3	6,0	6,3	6,2	6,3	6,2	6
N	% b.s.	1,1	0,47	0,58	0,85	0,10	0,4	0,5
S	% b.s.	0,06	0,04	0,06	0,06	<0.02	0,03	0,1
Cl	% b.s.	0,05	0,02	0,03	0,07	0,01	<0.01	0,4

- **CSR**

Pese a no ser posible la realización de ensayos con el CSR, se ha optado por conocer un poco más acerca de su composición química antes de ser rechazado como posible combustible. El CSR aparentemente no parece un mal combustible ya que su composición química es parecida a la del resto de biomásas, además de tener buen poder calorífico y baja humedad.

*Tabla 19: Análisis CSR (fuente: elaboración propia a partir de datos de facilitados por Cogersa)*

Componente	Unid.	CSR
Fecha de recepción	dd/mm/aaaa	05/25/2017
Densidad aparente	kg/m3	-
Humedad	% masa	8,4
Cenizas (550°C)	% masa	7,4
Cenizas (815°C)	% masa	-
Materia Volátil	% masa	84,2
Carbono fijo	% masa	-
Azufre	% masa	0,5
Cloro	% masa	0,173
Carbono	% masa	52
Hidrogeno	% masa	6,5
Nitrógeno	% masa	1,9
Oxígeno	% masa	26,6
Poder calorífico Superior	kcal/kg	5987
	MWh/ton	6,96
Poder calorífico inferior s/m.h.	kcal/kg	5386
	MWh/ton	6,26

- Análisis granulométrico**

Los resultados de la granulometría se muestran a continuación:

*Tabla 20: Granulometría de la biomasa encontrada (fuente: elaboración propia)*

Partículas	Unid.	Cortezas de pino 2	Astillas 2	Astillas 3	Astillas 4	Astillas 5	Serrín seco 1	Serrín seco 2	Serrín húmedo 2	Restos Eucalipto
>80 mm	% masa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50-80 mm	% masa	6,27	0	0	0	0	0	0	0	5,59
15-50 mm	% masa	59,83	1,28	85,05	0,75	0,09	0	0,79	1,13	34,51
2-15 mm	% masa	25,42	94,17	14,67	32,76	70,96	9,35	95,03	34,41	43,81
< 2 mm	% masa	8,48	4,55	0,28	66,49	28,95	90,65	4,18	64,46	16,69

De estos resultados se puede observar que no todos poseen la granulometría adecuada para poder usarse directamente. Exceptuando a las astillas 2, 4 y 5 y los serrines, el resto de materiales deberían ser sometidos a un pretriturado antes de ser dosificados al circuito de combustible.

De lo anterior se deduce, que la granulometría también juega un papel importante dentro de los análisis en la caracterización de combustibles alternativos.

- Análisis de emisiones**

A continuación, se muestra el factor de emisión de cada combustible analizado.

*Tabla 21: Factor de emisión de cada biomasa analizada (fuente: elaboración propia)*

Componente	Contenido en Carbono	PCI	Factor de emisión	
			Unidad	% masa
Orujillo 1	43,2	4005	1582,9	97,23
Orujillo 2	44,0	3966	1613,3	97,23
Orujillo 3	42,1	3643	1543,7	101,28
Astillas 1	32,7	2733	1199,0	104,85
Astillas 2	25,4	1950	931,3	114,15
Astillas 3 (Toranzo)	22,6	1693	828,7	116,99
Astillas 4 (Francia)	40,8	3438	1496,0	104,00
Astillas 5	33,4	2655	1224,7	110,25
Cortezas de pino 1	41,7	3498	1529,0	104,47
Cortezas de pino 2	30,1	2403	1103,7	109,77
Serrín seco 1	46,5	3438	1705,0	98,29
Serrín seco 2	46,0	2655	1686,7	99,02
Serrín húmedo 1	28,6	3498	1048,7	106,88
Serrín húmedo 2	24,3	2403	891,0	113,45
Restos Eucalipto	32,5	2683	1191,7	106,16
Matorrales (Escoba)	50,6	4637	1855,3	95,64
Matorrales (Jara)	49,4	4446	1811,3	97,38
Matorrales (Brezo)	54,0	4900	1980,0	96,59
Matorrales (Tojo)	50,4	4493	1848,0	98,30
CSR	52,0	5386	1906,7	84,61

Si se comparan estos valores con el factor de emisión del carbón (valores medios tomados de análisis efectuados sobre carbones usados en Solvay), se observa que por unidad de energía el factor de emisión de la biomasa es superior al del carbón (91,5 Kg CO<sub>2</sub>/TJ), mientras que por unidad de masa los resultados son menores (factor de emisión del carbón por unidad de masa= 2.295 kg CO<sub>2</sub>/ton carbón).

Los resultados anteriores son debidos a que el carbón por unidad de masa posee más contenido en carbono y a su vez también contiene también mayor energía.

#### 6.1.4 Índices de control

Tras analizar los componentes principales de la biomasa, se exponen los resultados de los índices de control para diferentes escenarios de co-combustión (1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 8%, 10%, 100% de sustitución) para ello se han tomado como referencia análisis de carbones utilizados en Solvay.

*Tabla 22: Análisis de carbón usado en Solvay (fuente: elaboración propia)*

		Nord Pollux		Jupiter N	
		AR	DB	AR	DB
Humedad	% mass	9,6		10,04	
Cenizas	% mass	12,65	14	10,43	11,59
MV	% mass	31,75	35,09	32,53	36,16
Carbono fij	% mass	46,03	50,91	47	52,25
Gross CV	kcal/kg	6161	6815	6299	7002
	MWh/ton	7,16	7,91	7,32	8,13
Net CV, cnt	kcal/kg	5899	6588	6039	7002
	MWh/ton	6,86	7,66	7,02	8,14
Carbono	% mass	62,79		64,53	
Hidrogeno	% mass	5,08		3,93	
Nitrogeno	% mass	1,77		2,1	
Azufre	% mass	0,27		0,31	
Oxigeno	% mass	17,44		8,65	
Cloro	% mass	0,036		0,005	
CaO	% ash	4,4		5,38	
MgO	% ash	1,96		2,49	
K2O	% ash	2,45		1,89	
Na2O	% ash	1,23		1,06	
SiO2	% ash	59,67		54,94	
Fe2O3	% ash	5,04		6,4	

AR= "As Received" (Al ser recibido)

DB = "Dry Bone" (Base seca)

A continuación, se muestran las tablas de dichos índices para co-combustión con: orujillo, astillas de pino, cortezas de pino y restos de eucalipto.

Los colores representan para cada índice un valor de riesgo para la caldera. Si se encuentra entre los valores óptimos (*color verde*), si el riesgo es bajo (*color amarillo*) o si el riesgo es importante (*color rojo*).

- **Co-combustión con orujillo**

La siguiente tabla muestra la co-combustión de orujillo junto a carbón. Los índices muestran:

- Riesgo moderado de formación de álcali desde el primer momento de realización de co-combustión.
- Riesgo alto de formación de incrustaciones. Como ya se ha hablado, el alto contenido en potasio del orujillo hace que disminuya la temperatura de fusión de las cenizas llegando a originarse problemas asociados.

*Tabla 23: Co-combustión con orujillo (fuente: elaboración propia)*

		Media de carbones	1%	2%	3%	5%	8%	10%	100% Orujillo
			1% 99%	2% 98%	3% 97%	5% 95%	8% 92%	10% 90%	100% 0%
<b>Análisis</b>									
Humedad	% masa	9,82	9,84	9,87	9,89	9,94	10,01	10,06	12,20
Cenizas	% masa	11,54	11,50	11,45	11,41	11,32	11,20	11,11	7,24
Materia volátil	% masa	32,14	32,45	32,77	33,08	33,71	34,66	35,29	63,60
Carbono fijo	% masa	46,52	46,23	45,94	45,66	45,08	44,22	43,65	17,85
Azufre	% masa	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,09
Cloro	% masa	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,19
Carbono	% masa	63,66	63,45	63,25	63,04	62,63	62,01	61,60	43,05
Hidrogeno	% masa	4,51	4,51	4,52	4,53	4,55	4,57	4,59	5,36
Nitrogeno	% masa	1,94	1,93	1,92	1,92	1,91	1,89	1,88	1,35
Oxigeno	% masa	13,05	13,23	13,41	13,60	13,96	14,51	14,88	31,40
CaO	% masa	0,62	0,62	0,63	0,63	0,64	0,64	0,65	0,93
MgO	% masa	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
K <sub>2</sub> O	% masa	0,28	0,31	0,35	0,38	0,45	0,55	0,62	3,64
Na <sub>2</sub> O	% masa	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,72							
SiO <sub>2</sub>		7,36							
PCS	Kcal/kg	6230	6209	6188	6168	6126	6064	6022	4154
PCI	Kcal/kg	5969	5947	5926	5904	5861	5796	5753	3805
PCI	MWh/ton	6,94	6,912	6,887	6,862	6,812	6,736	6,686	4,42
<b>Índices de Control</b>									
Ratio S/Cl			13,01	12,02	11,17	9,75	8,14	7,31	0,49
Alcali Index			0,18	0,19	0,20	0,23	0,27	0,30	2,11
Sintering Index (SI)			1,96	1,84	1,73	1,55	1,35	1,24	0,33
Molar ratio S/(K+Na)									
(K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O)/SiO <sub>2</sub>			0,063	0,067	0,071	0,080	0,093	0,102	0,498
BAI			1,57	1,47	1,38	1,23	1,05	0,96	0,20

- Co-combustión con astilla de pino**

En este caso se ha utilizado la astilla que posteriormente, en la realización de las pruebas, se escoge en primer lugar para ensayar su comportamiento en co-combustión.

La co-combustión con astilla de pino no muestra ningún problema a priori. Los índices muestran valores positivos respecto a su uso.

*Tabla 24: Co-combustión con Astilla de pino (fuente: elaboración propia)*

	Media de carbones	1%	2%	3%	5%	8%	10%	100% Astilla
		1%	2%	3%	5%	8%	10%	100%
		99%	98%	97%	95%	92%	90%	0%
<b>Análisis</b>								
Humedad % masa	9,82	9,94	10,06	10,18	10,42	10,79	11,03	21,90
Cenizas % masa	11,54	11,45	11,37	11,28	11,10	10,84	10,67	2,80
Materia vola % masa	32,14	32,39	32,64	32,89	33,40	34,15	34,66	57,30
Carbono fijo % masa	46,52	46,23	45,95	45,66	45,09	44,24	43,67	18,10
Azufre % masa	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26	0,01
Cloro % masa	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
Carbono % masa	63,66	63,43	63,20	62,97	62,52	61,83	61,37	40,80
Hidrogeno % masa	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,51	4,52	4,61
Nitrogeno % masa	1,94	1,92	1,90	1,88	1,85	1,80	1,76	0,23
Oxigeno % masa	13,05	13,21	13,38	13,55	13,88	14,39	14,72	29,80
CaO % masa	0,62	0,62	0,61	0,61	0,61	0,60	0,59	0,36
MgO % masa	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,10
K2O % masa	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,12
Na2O % masa	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,02
Fe2O3	0,72							0,00
SiO2	7,36							0,00
PCS Kcal/kg	6230,00	6206	6182	6157	6109	6036	5988	3805
PCI Kcal/kg	5969,00	5944	5918	5893	5842	5767	5716	3438
PCI MWh/ton	6,94	6,91	6,88	6,85	6,79	6,70	6,64	4,00
<b>Índices de Control</b>								
Ratio S/Cl		14,09	14,04	13,99	13,88	13,71	13,60	1,00
Alcali Index		0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,09
Sintering Index (SI)		2,11	2,11	2,11	2,12	2,13	2,14	3,23
Molar ratio S/(K+Na) (K2O + Na2O)/SiO2		0,058	0,057	0,057	0,056	0,055	0,054	0,019
BAI		1,70	1,71	1,72	1,75	1,78	1,81	5,13

- Co-combustión con corteza de pino**

Al igual que con la co-combustión de astilla, la co-combustión de carbón junto a cortezas no muestra grandes problemas aparentemente.

*Tabla 25: Co-combustión con corteza de pino (fuente: elaboración propia)*

		Media de carbones	1%	2%	3%	5%	8%	10%	100% corteza
			1% 99%	2% 98%	3% 97%	5% 95%	8% 92%	10% 90%	100% 0%
<b>Analisis</b>									
Humedad	% masa	9,82	10,08	10,34	10,59	11,11	11,88	12,40	35,60
Cenizas	% masa	11,54	11,43	11,32	11,21	10,99	10,67	10,45	0,63
Materia vola	% masa	32,14	32,28	32,42	32,56	32,85	33,27	33,56	46,30
Carbono fijo	% masa	46,52	46,22	45,93	45,64	45,06	44,19	43,61	17,50
Azufre	% masa	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26	0,01
Cloro	% masa	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
Carbono	% masa	63,66	63,38	63,10	62,83	62,27	61,44	60,88	35,90
Hidrogeno	% masa	4,51	4,50	4,49	4,48	4,47	4,45	4,44	3,82
Nitrogeno	% masa	1,94	1,92	1,90	1,88	1,84	1,79	1,75	0,11
Oxigeno	% masa	13,05	13,16	13,27	13,38	13,60	13,93	14,15	24,05
CaO	% masa	0,62	0,62	0,61	0,61	0,60	0,59	0,59	0,28
MgO	% masa	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26	0,04
K2O	% masa	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,26	0,07
Na2O	% masa	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,01
Fe2O3		0,72							0,00
SiO2		7,36							0,00
PCS	Kcal/kg	6230	6201	6173	6144	6086	6000	5943	3357
PCI	Kcal/kg	5969	5939	5909	5878	5818	5728	5667	2951
	MWh/ton	6,94	6,90	6,87	6,83	6,76	6,66	6,59	3,43
<b>Indices de Control</b>									
Ratio S/Cl			14,08	14,01	13,94	13,79	13,57	13,42	0,67
Alcali Index			0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,06
Sintering Index (SI)			2,11	2,11	2,11	2,12	2,13	2,14	3,84
Molar ratio S/(K+Na) (K2O + Na2O)/SiO2			0,058	0,057	0,057	0,056	0,054	0,054	0,011
BAI			1,70	1,72	1,73	1,76	1,81	1,84	8,74

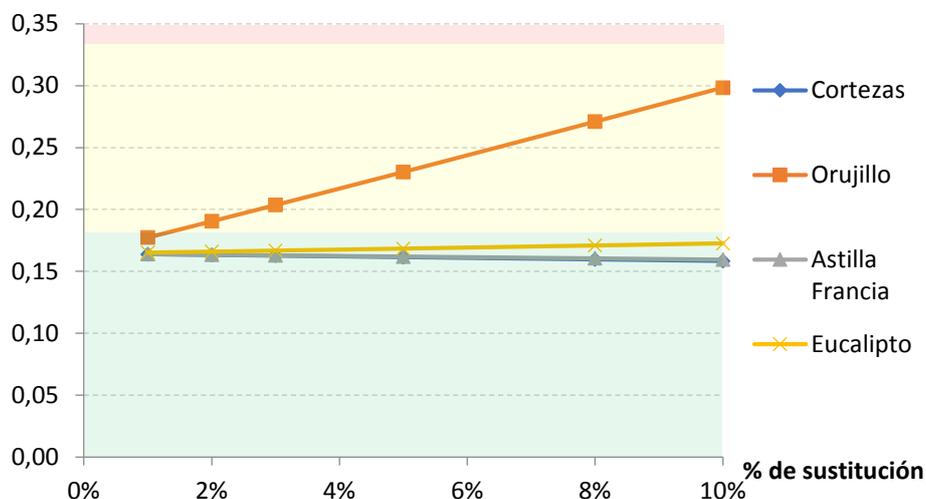
• **Co-combustión de restos de eucalipto**

Al tener los restos de eucalipto una composición química distinta a la de los residuos de pino, se puede comprobar que algunos índices, como el de álcali, muestran algún problema moderado a partir del 8 % de co-combustión.

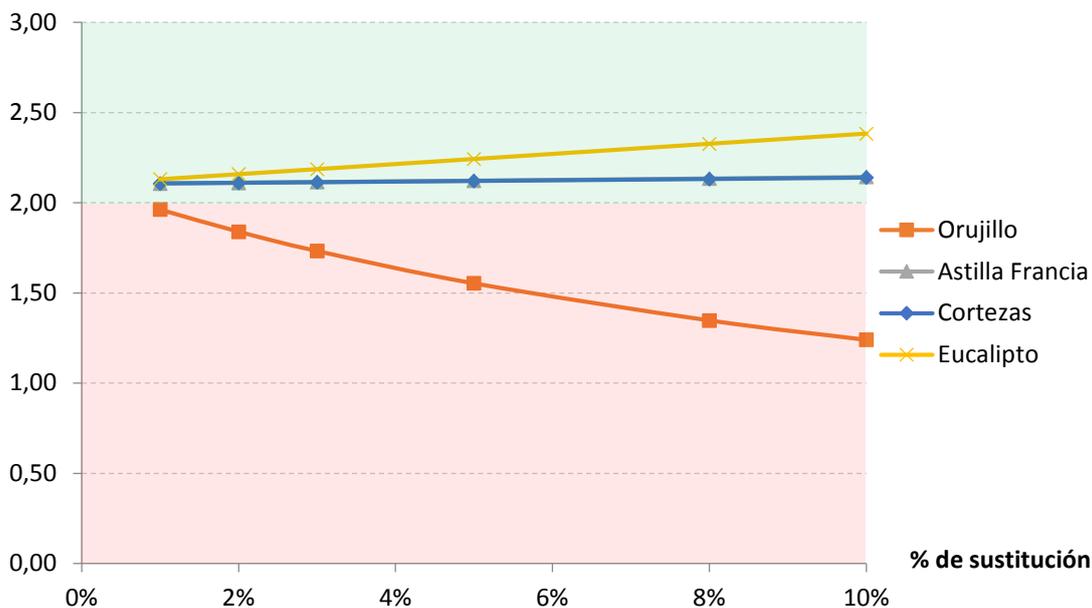
*Tabla 26: Co-combustión con eucalipto (fuente: elaboración propia)*

	Media de carbones	1%	2%	3%	5%	8%	10%	100% Eucalipto
		1% 99%	2% 98%	3% 97%	5% 95%	8% 92%	10% 90%	100% 0%
<b>Analisis</b>								
Humedad % masa	9,82	10,02	10,22	10,41	10,81	11,40	11,80	29,60
Cenizas % masa	11,54	11,49	11,44	11,39	11,28	11,13	11,03	6,41
Materia vol% masa	32,14	32,35	32,55	32,76	33,17	33,78	34,20	52,70
Carbono fijt % masa	46,52	46,17	45,83	45,49	44,80	43,78	43,09	12,30
Azufre % masa	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,27	0,26	0,01
Cloro % masa	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,08
Carbono % masa	63,66	63,35	63,04	62,73	62,10	61,17	60,54	32,50
Hidrogeno % masa	4,51	4,50	4,50	4,49	4,48	4,47	4,46	4,07
Nitrogeno % masa	1,94	1,92	1,90	1,89	1,86	1,81	1,78	0,37
Oxigeno % masa	13,05	13,19	13,34	13,49	13,79	14,24	14,54	28,00
CaO % masa	0,62	0,63	0,64	0,66	0,68	0,72	0,74	1,83
MgO % masa	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,23
K2O % masa	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,36
Na2O % masa	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,05
Fe2O3	0,72	0,72	0,71	0,71	0,70	0,68	0,67	0,18
SiO2	7,36	7,30	7,24	7,17	7,05	6,86	6,73	1,09
PCS Kcal/kg	6230	6198	6167	6135	6072	5977	5914	3067
PCI Kcal/kg	5969	5936	5903	5870	5805	5706	5640	2683
PCI MWh/ton	6,94	6,90	6,86	6,82	6,75	6,63	6,56	3,12
<b>Indices de Control</b>								
Ratio S/Cl		13,64	13,15	12,69	11,84	10,71	10,03	0,17
Alcali Index		0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,32
Sintering Index (SI)		2,13	2,16	2,19	2,24	2,33	2,38	4,99
Molar ratio S/(K+Na)								
(K2O + Na2O)/SiO2		0,059	0,059	0,060	0,061	0,062	0,063	0,378
BAI		1,68	1,66	1,65	1,63	1,59	1,57	0,44

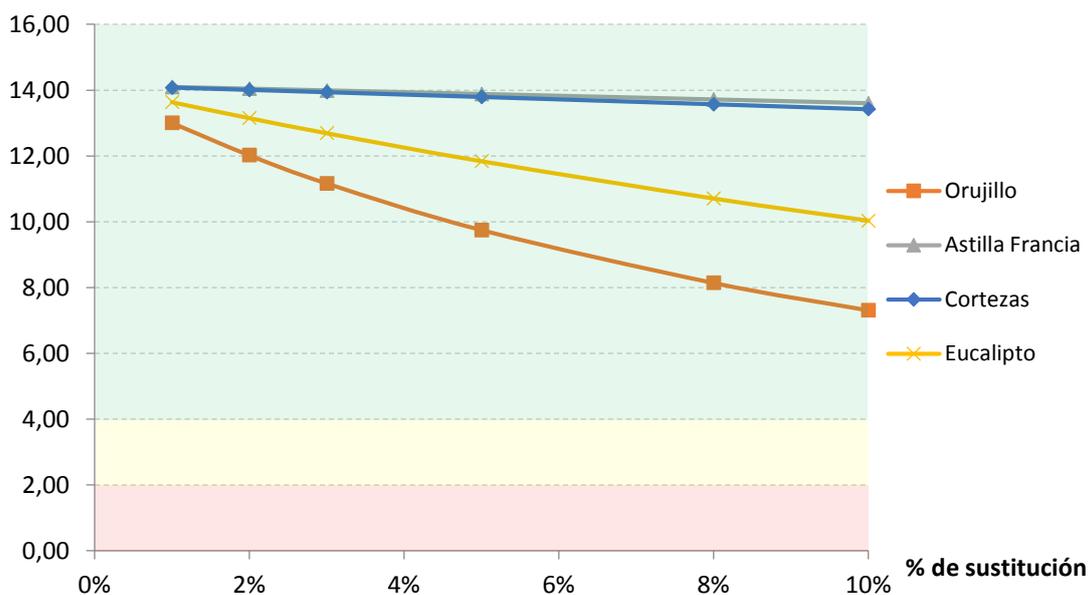
Las siguientes gráficas muestran la comparación de estos combustibles para distintos índices:



*Gráfica 1: Índice de álcali (fuente: elaboración propia)*



*Gráfica 2: Índice de sinterización (fuente: elaboración propia)*



*Gráfica 3: Ratio S/Cl (fuente: elaboración propia)*

### 6.1.5 Disponibilidades

Las disponibilidades han mostrado resultados satisfactorios en cuanto a la existencia de cantidades suficientes para poder realizar la co-combustión con éxito sin tener que consumir de varias fuentes a la vez, es decir, no hay que depender exclusivamente de un proveedor.

La sustitución de carbón por biomasa se expresa en porcentajes de energía sustituida. Por esta razón, la disponibilidad de combustible vendrá mejor expresada en valores de energía.

Como se explicó en la metodología, para saber la disponibilidad mínima que ha de existir para satisfacer las necesidades de las calderas, basta con determinar la energía anual a sustituir y compararla con los resultados de energía procedente de combustibles alternativos disponible.

El consumo de carbón anual es aproximadamente de: 270.000 toneladas. Si el poder calorífico del carbón es de aproximadamente 6000 kcal, se calcula que hay un consumo aproximado de 1900 GWh anuales repartidos entre las dos calderas de carbón de la siguiente manera:

*Tabla 27: Energía consumida por la central de carbón (fuente: elaboración propia)*

	Combustible	PCI (Kcal/kg)	Energía (GWh/año)	Sustitución 5% (GWh/año)	Sustitución 10% (GWh/año)
Sulzer	Carbón	6.000	800	40	80
B&D	Carbón	6.000	1.100	55	110
	<b>TOTAL</b>		1900	95	190

Los proveedores de biomasa cuantifican la disponibilidad o producción de sus productos en toneladas por mes o año. Para pasar de esta disponibilidad en masa a energía, basta con multiplicarla por el poder calorífico del combustible en cuestión.

Los resultados obtenidos para los combustibles estudiados son los siguientes:

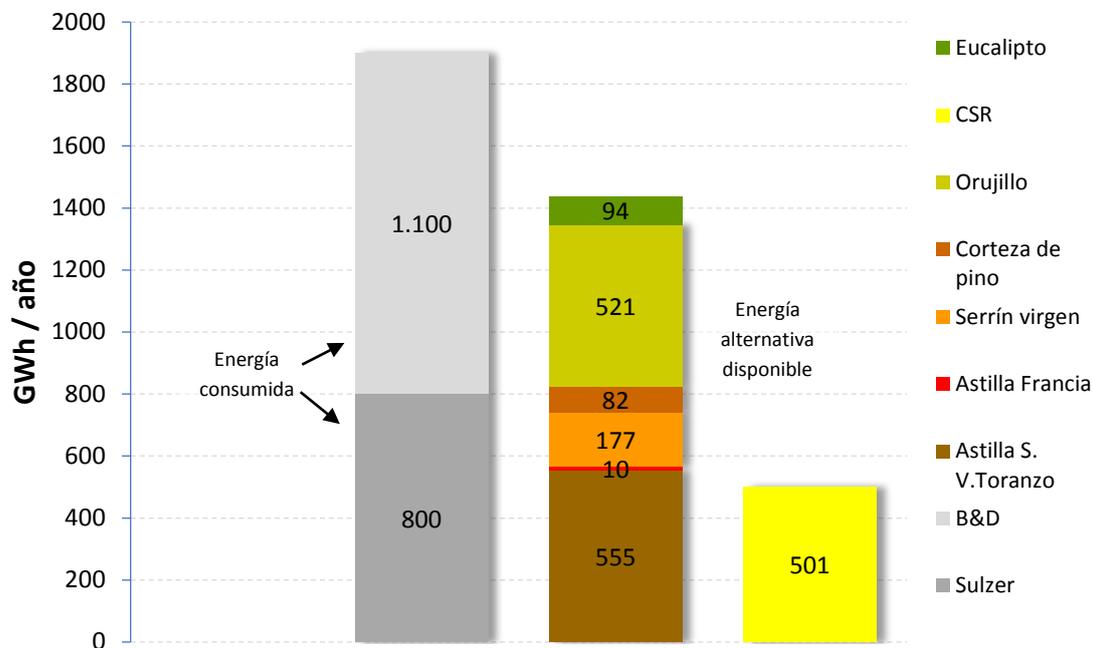
*Tabla 28: Disponibilidades de combustibles alternativos (fuente: elaboración propia)*

Tipo de combustible	PCI <sup>5</sup>	Disponibilidad	
	kcal/kg	ton/año	GWh/año
Residuo de eucalipto	2683,0	30.000	94
Astilla (S. Vicente de Toranzo)	2257,75	180.000	472
Astilla "francesa"	3.438	3000	12
Serrín Húmedo de Pino	2.111	72000	177
Serrín Seco de Pino	4108,5	72000	344
Corteza	2.951	24.000	82
CSR	5383	80.000	500
Orujillo	3804,5	120.000	531
Matorrales	4618	<1000	5

Según estos resultados, los matorrales y la astilla "francesa" no servirían desde el punto de vista de la disponibilidad, ya que el valor que presentan es relativamente bajo, menores aún que la energía mínima necesaria para sustituir.

<sup>5</sup> Los valores del poder calorífico presentes en la tabla son valores promedios de los análisis y datos disponibles

La siguiente gráfica muestra la comparativa de disponibilidad frente al consumo de carbón expresado en términos de energía por año (GWh/año):



*Gráfica 4: Representación gráfica disponibilidades de biomasa frente consumo de carbón (fuente: elaboración propia)*

Como observación, con la biomasa disponible bastaría para incluso llegar a sustituir una caldera completa.

### 6.1.6 Precios<sup>6</sup>

Los resultados de los precios son claves en la toma de decisión sobre que combustible es el más idóneo desde un punto de vista económico para poder ser utilizado como sustituto del carbón.

Uno de los objetivos principales del trabajo es encontrar aquellos combustibles que puedan competir económicamente con el precio del carbón. Para poder compararlos, es preciso establecer un precio de referencia de carbón. Este precio, tomado a coste de CO<sub>2</sub> igual a 5€uros, en el primer trimestre del año resulta ser igual a: **17,48 €/MWh**.

*Tabla 29: Precios de la biomasa (fuente: elaboración propia)*

Biomasa	Coste (€/MWh)
Serrín Húmedo (virgen)	20,38
Serrín Seco	21,14
Astilla Triturada (Toranzo)	24,31
Astilla 2	37,51
Astilla "francesa"	15,77
Corteza	17,50
Restos de Eucalipto	17,64
Orujillo 1	15,62
Orujillo 2	16,53

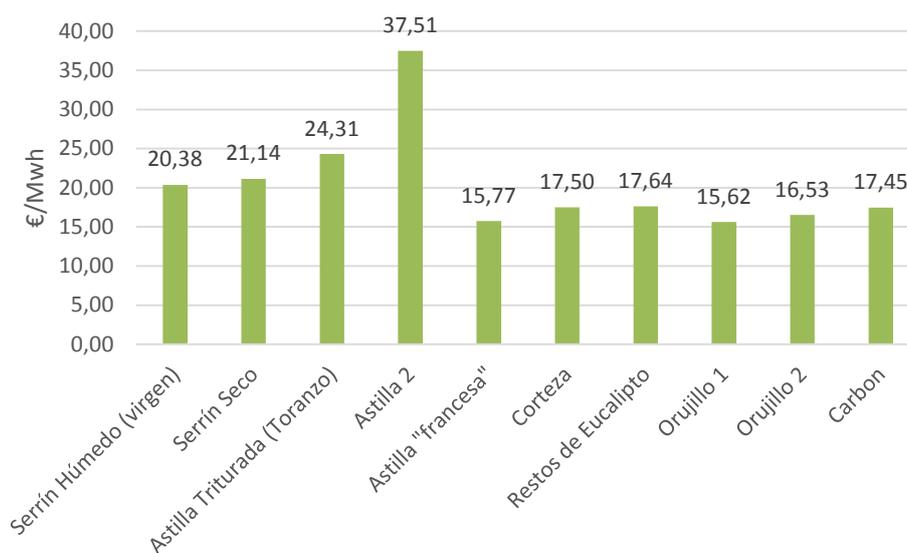
La tabla anterior muestra el precio del combustible por unidad de energía y de ella se pueden extraer las siguientes observaciones:

- El combustible con menor coste por unidad de energía es el orujillo, pese a ser un combustible localizado en el sur de España. Posee un precio Exworks muy bajo debido a que existe una gran disponibilidad y su almacenamiento en las extractoras supone un problema para la producción de aceite de orujo. El mayor coste asociado a este combustible es el coste de logística que puede llegar a triplicar el precio de venta.
- El siguiente combustible con precio más bajo, llegando a ser incluso competitivo con el carbón, es el eucalipto, entendiéndolo como los restos y las podas. Además, este material, tiene la ventaja de que su localización se encuentra cercana a la fábrica lo que abarata el coste de logística.

<sup>6</sup> **Precios:** Los precios expuestos en este apartado son orientativos. Ninguno de los precios expuestos en este apartado son ciertos, sino que varían ligeramente para no exponer datos confidenciales entre dos empresas, manteniendo el orden de combustible más barato a más caro en ambos casos. El estudio es con fines educativos, la única función de estos precios expuestos es ayudar posteriormente a la justificación de la solución escogida desde el punto de vista de la viabilidad económica.

- Los residuos del pino por otra parte poseen un coste superior al precio del carbón, exceptuando en único caso a las cortezas de pino, las cuales además presentan por otra parte una buena composición química en cuanto a poder calorífico se refiere.
- La biomasa del matorral no se incluye dentro de la tabla anterior, ya que los datos preliminares mostrados hacen ver que se trata de un combustible excesivamente caro y con baja disponibilidad por el momento.

*Gráfica 5: Precios de combustibles (fuente: elaboración propia)*



### 6.1.7 Trituradora

Los resultados obtenidos en cuanto a la caracterización de combustibles en los apartados anteriores muestran que existen ciertos combustibles con buenas propiedades químicas, disponibilidades y precio, pero que tienen un tamaño de grano excesivamente alto. Lo cual no los hace aptos para ser empleados en co-combustión.

Por la razón anterior, ha de estudiarse la posibilidad de realizar un triturado en fábrica. Para poder llevarse a cabo, se ha estudiado si implantar una trituradora que consiga reducir el tamaño de ciertos tipos de biomasa permite hacer viable su compra.

Para estudiar esto se han planteado dos escenarios:

1. Se emplean combustibles que pueden ser consumidos tal y como son comprados sin necesidad de hacer ningún pretriturado en fábrica. Debido a que existe un factor limitante en el contenido de orujillo (no puede superar el 2% en co-combustión total) se establece un mix con aquellas biomásas que pueden ser utilizadas: orujillo, serrín húmedo y astilla triturada (Toranzo).
2. Se utilizan combustibles que necesitan ser triturados. La ventaja de estos combustibles es que tienen un precio por unidad de energía más barato. Al igual que en el caso anterior, se establece un mix de combustibles con: orujillo (como en el otro escenario también al 2%), restos y podas de eucalipto y corteza de pino.

Esta comparación de escenarios se hace pensando en emplear la co-combustión en las dos calderas con porcentajes de sustitución comprendidos entre el 5% y el 10%. Los valores de sustitución comprendida son los mismos para ambos escenarios y están enmarcados en el periodo temporal de un año. Los resultados son:

- Escenario 1.

*Tabla 30: Mix de biomásas ya trituradas (fuente: elaboración propia)*

	<b>5% co-combustión</b>	<b>10 % co-combustión</b>
Energía sustituida (MWh)	118.860	237.721
Orujillo	40%	20%
Serrín húmedo	30%	40%
Astilla triturada	30%	40%
Precio Mix biomásas (€/MWh)	19,84	21,09
Precio Carbón (5€/t CO <sub>2</sub> )	17,48	
Ahorro anual	- 280.602 €	- 859.113 €

- Escenario 2.

*Tabla 31: Mix de biomásas con necesidad de triturado (fuente: elaboración propia)*

	<b>5% co-combustión</b>	<b>10 % co-combustión</b>
Energía sustituida (MWh)	118.860	237.721
Orujillo	40%	20%
Poda de eucalipto	30%	40%
Corteza	30%	40%
Precio Mix biomásas (€/MWh)	14,85	14,45
Precio Carbón (5€/t CO <sub>2</sub> )	17,48	
Ahorro anual	311.505 €	719.839 €

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, la trituración permite utilizar materiales que hacen que el precio del mix de biomásas desciendan en más de **4€/MWh** comparando ambos escenarios. Lo que, multiplicado por la energía a sustituir, produce un ahorro comparando ambos escenarios con cada porcentaje de sustitución de:

- $311.505 \text{ €} - (-280.602 \text{ €}) = \mathbf{592.107 \text{ €}}$  (5% de sustitución)
- $719.839 \text{ €} - (-859.113 \text{ €}) = \mathbf{1.578.952 \text{ €}}$  (10% de sustitución)

Si se compara el segundo escenario (ya que es el más favorable) con el precio del carbón existe un ahorro para ambos escenarios de:

- $17,48 - 14,85 = 2,62 \text{ €/MWh} \cdot 118.860 \text{ MWh} = \mathbf{311.504 \text{ €}}$  (5% de sustitución)
- $17,48 - 14,45 = 3,03 \text{ €/MWh} \cdot 237.721 \text{ MWh} = \mathbf{720.294 \text{ €}}$  (10% de sustitución)

## 6.2 Resultados de las pruebas

En este apartado se ven las pruebas llevadas a cabo agrupadas en tres bloques, según haya sido la biomasa empleada y los periodos de realización.

### 6.2.1 Pruebas con astilla “francesa”

El presente apartado explica la prueba realizada con la Astilla “francesa”. Dichas pruebas se llevaron a cabo en la caldera acuotubular GNSP0 (Balcke-Dürr) entre los días 08 de mayo de 2017 y 31 de mayo de 2017.

Esta astilla recibe el nombre debido a que viene de la zona sur de Francia. El proveedor es el mismo que posee el aserradero de San Vicente de Toranzo. La decisión de emplear este tipo de astilla surge tras una oportunidad de mercado, poseyendo un coste (a pesar del lugar de donde viene) más barato que las astillas localizadas en Cantabria.

A continuación, se muestran los resultados de las pruebas efectuadas con este tipo de astillas. Se llevaron a cabo en total un número de 4 pruebas de dosificación a la caldera, donde la biomasa llegó en 5 camiones diferentes para así, ver el comportamiento de ésta al usarse en co-combustión con el carbón.

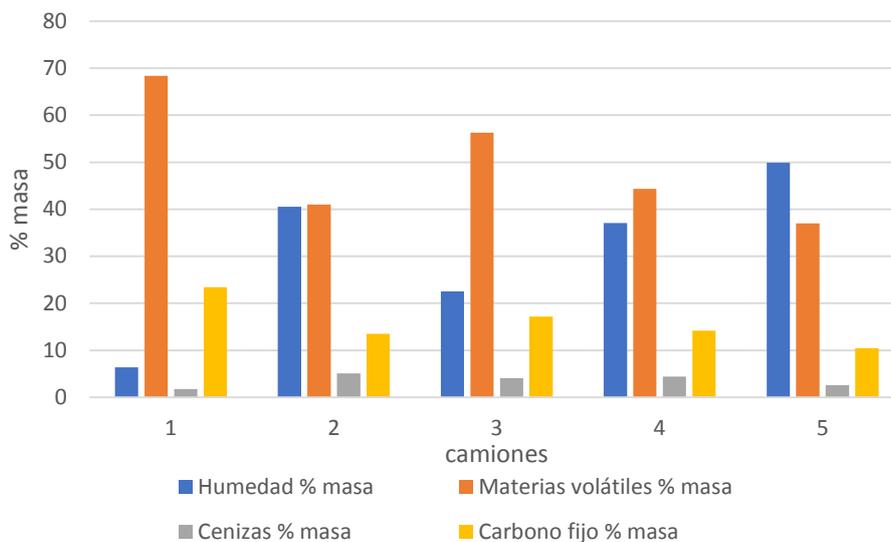
#### 6.2.1.1 Análisis de las muestras recibidas

Tras la llegada de cada camión, fue necesario tomar muestras de diferentes partes de cada carga para tomar datos de la composición química del contenido de los camiones. Estas muestras fueron analizadas por el laboratorio de Solvay y sus resultados sirvieron de utilidad para calcular que cantidad en masa de biomasa era necesaria añadir para cumplir cada porcentaje de sustitución.

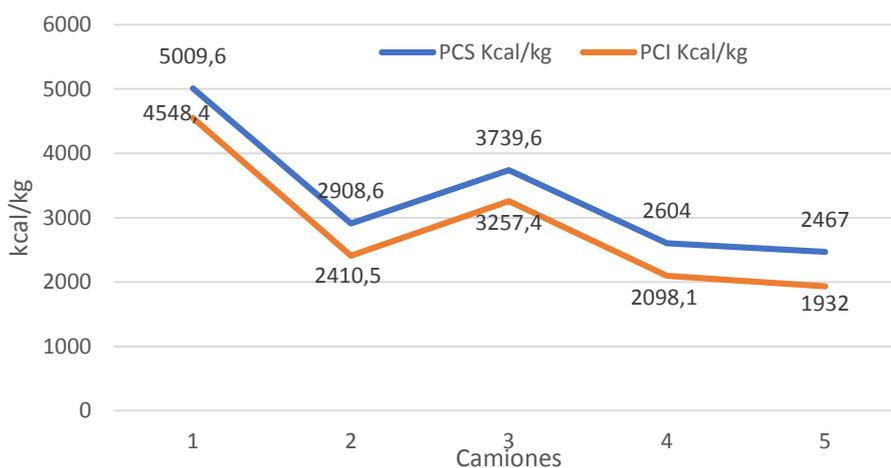
*Tabla 32: Análisis de astilla "francesa" efectuado por el laboratorio de Solvay (fuente: elaboración propia)*

Parámetro	Unidad	Astillas "francesas"				
		Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
Humedad	% masa	6,34	40,51	22,53	37,07	49,9
Materias volátiles	% masa	68,4	40,99	56,26	44,36	37,03
Cenizas	% masa	1,77	5,05	4,07	4,39	2,59
Carbono fijo	% masa	23,45	13,5	17,14	14,18	10,48
PCS	Kcal/kg	5009,6	2908,6	3739,6	2604	2467
PCI	Kcal/kg	4548,4	2410,5	3257,4	2098,1	1932

Como se puede observar en las siguientes graficas existe una gran variabilidad en la composición entre el contenido de los distintos camiones recibidos y en el poder calorífico. Esto hace ver que se trata de un compuesto muy heterogéneo en cuanto a su composición, las diferencias de poder calorífico y humedad entre el contenido de los distintos camiones recibidos son notables, lo que hace ver preliminarmente que no se trata de un combustible muy adecuado.



Gráfica 6: Variación de la composición química de las muestras de astilla (fuente: elaboración propia)



Gráfica 7: Variación del poder calorífico entre las muestras de astilla (fuente: elaboración propia)

### 6.2.1.2 Recepción y descarga de astilla “francesa”

La astilla “francesa”, como se ha descrito anteriormente, llegó en 5 camiones diferentes para la realización de 4 pruebas. Todas las descargas se llevaron a cabo en las tolvas de descarga de vagones, por consiguiente, los datos de la recepción y descarga de los camiones son expuestos según su día de llegada y de la prueba que fuera a realizarse.

#### 6.2.1.2.1 Camión 1

Los datos del primer camión recibido para realizar las pruebas están recogidos en la siguiente tabla. En ella y en las de las demás pruebas se registra, la fecha, hora de llegada y tiempo de descarga, así como también la masa de la carga.

Tabla 33: Datos de la prueba de descarga del primer camión (fuente: elaboración propia)

Día	08/05/2017
Hora de inicio de descarga	08:45
Tiempo de descarga	3h
Pesaje de camión	23,78 ton

La descarga se realizó de la siguiente manera:

- El transporte se realizó con un remolque de piso móvil el cual comenzó descargando lentamente el contenido en las tolvas de descarga.



Ilustración 54: Descarga del primer camión (fuente: propia)

- Las astillas comienzan a caer. Éstas no deslizan bien por los laterales de las tolvas de descarga, acumulándose y procediendo a obstruir las tolvas. Es necesario la intervención de personal auxiliar para desatascarlo usando una lanza de aire a presión.



Ilustración 55: Obstrucción de las tolvas de descarga (fuente: elaboración propia)

Observaciones de la prueba de descarga:

- Durante la descarga cayó un tronco de aproximadamente un metro de largo y 100 mm de diámetro que comprometió la realización de la prueba de descarga.
- Se forma una gran cantidad de polvo durante la descarga.

#### 6.2.1.2.2 Camión 2

*Tabla 34: Datos de la prueba de descarga del segundo camión (fuente: elaboración propia)*

Día	08/05/2017
Hora de inicio	09:03
Tiempo de descarga	1 h 20 min
Pesaje de camión	24,86 ton

- La descarga de las astillas se realiza mediante camión con remolque de piso móvil. Las astillas poseen mayor cantidad de finos y humedad que las de la Prueba 1, generando gran cantidad de polvo. Se observa también que las astillas tienen una temperatura de 38°C.
- El toldo del camión no es impermeable, lo que hace que el agua de lluvia contribuya al aumento de la humedad.
- Presencia de trozos de troncos y de escombros de gran tamaño en la descarga de las astillas.



*Ilustración 56: Restos de escombros y troncos contenidos junto a las astillas (fuente: elaboración propia)*

- Al igual que pasó con el primer camión, las astillas se quedan adheridas a los laterales de las tolvas de descarga, haciendo preciso que el personal auxiliar intervenga para hacer la limpieza de éstas. Esto hace que la descarga tenga que ser intermitente.

#### 6.2.1.2.3 Camión 3

*Tabla 35: Datos de la prueba de descarga del tercer camión (fuente: elaboración propia)*

Día	17/05/2017
Hora de inicio	10:30
Tiempo de descarga	2h
Pesaje del camión	24,17

- El contenido de este camión es diferente con respecto al de los camiones anteriores, siendo en este caso mayor el contenido en materiales finos, teniendo también menor humedad.
- El camión está cubierto por un toldo impermeable esta vez.
- Las astillas, además, presentan también los mismos problemas que con los camiones 1 y 2. Se queda pegado en las paredes de las tolvas obstruyéndose y creando la necesidad de desatascarlo.

#### 6.2.1.2.4 Camión 4

*Tabla 36: Datos de la prueba de descarga del cuarto camión (fuente: elaboración propia)*

Día	30 / 05 / 2017
Hora de inicio	09:30
Tiempo de descarga	2h 30 min
Pesaje del camión	23 ton

- La descarga se realiza mediante remolque de piso móvil en las tolvas de descarga de vagones. Además, las astillas contienen mayor porcentaje de humedad que en las pruebas anteriores. La temperatura de la carga también es mayor, unos 48°C, lo que produce una ligera evaporación del contenido de agua.
- El contenido de polvo es menor que en veces anteriores, estando ligado al mayor contenido en humedad y su implicación en la adherencia entre partículas de finos.
- En esta prueba, el camión se encuentra protegido por la parte superior con un toldo impermeable.

#### 6.2.1.2.5 Camión 5

*Tabla 37: Datos de la prueba de descarga del quinto camión (fuente: elaboración propia)*

Día	31 / 05 / 2017
Hora de inicio	11:00
Tiempo de descarga	2h 30 min
Pesaje del camión	22,62 ton

- La descarga se realiza mediante camión de remolque de piso móvil, trayendo las astillas gran contenido de humedad y siendo la temperatura de la carga algo elevada, del en torno a 42°C.
- La descarga se realiza en varias veces, dado que es necesario hacer paradas intermedias. Esto es debido a que el comportamiento de las astillas, como en las pruebas anteriores, no es bueno, quedándose adheridas a la pared de la tolva de descarga y necesitándose personal auxiliar para desatascarlas con aire a presión.



*Ilustración 57: Obstrucción de las tolvas de descarga (fuente: elaboración propia)*

### 6.2.1.3 Dosificación desde los silos

En el caso de la dosificación, se expondrá en base a las pruebas realizadas. Para todas ellas, además, se realizan desde el silo de almacenamiento 1, llevándose a cabo con 2 vibro-extractoras trabajando de forma alterna, que vierten a la cinta transportadora.

#### 6.2.1.3.1 Prueba 1

Prueba de dosificación al circuito de combustible mediante la vibro-extractora B del silo 1. Se configura el sistema de modo que la vibro-extractora del silo 1 y la roto-extractora de los silos 3 al 10 puedan dosificar simultáneamente.

Es necesario fabricar 2 “tajaderas” para regular la dosificación de astillas a través de la vibro-extractora B del silo 1, debido a que la vibro-extractora produce un gran flujo de astillas.



*Ilustración 58: Dosificación de astillas junto al carbón (fuente: elaboración propia)*

Al acabar a dosificación, es necesario limpiar el silo con ayuda de agua, dado que quedan restos de carbón pegados en las paredes del mismo.

El porcentaje de sustitución intentado mediante esta primera prueba de dosificación fue de entre el 1% y el 1,5 % en PCI.

#### 6.2.1.3.2 Prueba 2

La vibro-extractora del silo 1 tiene problemas a la hora de extraer las astillas, quedándose éstas pegadas en los laterales del silo.

En esta prueba se intentó aumentar el porcentaje de sustitución. El incremento del porcentaje de sustitución facilitó así, la dosificación a la cinta dado que permite aumentar el flujo de astillas disminuyendo los problemas por obstrucciones en las vibro-extractoras.

El porcentaje de sustitución en PCI, con las astillas del primer camión fue algo mayor que en la primera prueba intentando lograr un 3 y 3,5 % de sustitución.

#### 6.2.1.3.3 Prueba 3

La dosificación desde el silo 1 a la cinta transportadora, esta vez, se mantiene constante sin que haya graves incidentes.

El porcentaje de sustitución en PCI será de entre el 3 y el 3,5%. El mayor contenido en humedad hace que, para ese porcentaje de sustitución en PCI, se necesite aumentar el porcentaje de sustitución en masa hasta el 8%.

#### 6.2.1.3.4 Prueba 4

Al igual que en la prueba anterior, la dosificación desde el silo 1 se mantiene constante sin que destaque ningún problema.

El porcentaje de sustitución en PCI será igual al de la Prueba 3, llegando incluso a valores del 4%.

El alto contenido en humedad hace que el PCI de las astillas disminuya, provocando que sea necesario el aumento de la sustitución en masa para mantener los porcentajes de sustitución en PCI llegando a superar el 10% de sustitución en masa.

#### 6.2.1.4 Combustión en la caldera

En cuanto al proceso de combustión, llevado a cabo en la caldera GNSPO (Balcke-Dürr), lo relevante, en cada prueba, fue lo siguiente:

- Hasta porcentajes de sustitución 3 y el 3,5% en PCI no se observaron problemas evidentes.
- A partir de los porcentajes anteriores, la velocidad de los alimentadores dinámicos de los molinos de la caldera B&D sufren un pequeño incremento en su velocidad. La composición de las escorias se ve alterada.
- En las últimas pruebas realizadas donde el porcentaje de sustitución es superior, la caldera empieza a producir variaciones de presión significativas. Se empiezan también a producir atascos en los molinos.

### 6.2.1.4.1 Mediciones en la caldera

Los datos han sido tomados para periodos de tiempo en que la caldera estaba consumiendo biomasa comprendidos entre el 30 de mayo y el 1 de junio de 2017. Los datos han podido anotarse mediante el programa informático (*Aspen*) utilizado por la empresa para monitorizar dichos parámetros.

*Tabla 38: Resultado comportamiento de la biomasa en los molinos (fuente: elaboración propia)*

Fecha y hora	% de sustitución		Molino 1			Molino 2		
			Velocidad clasific. Dinámico	Velocidad Alimentador	Tª Carbón Pulverizado	Velocidad clasific. Dinámico	Velocidad Alimentador	Tª Carbón Pulverizado
dd/mm/aa hh:mm	% PCI	% masa	rpm	cm/min	° C	rpm	cm/min	° C
30/05/2017 14:49	3	8,1	124,5	85,6	84,5	125,1	86,9	84,5
30/05/2017 15:36	3	8,1	124,5	93,9	84,3	125,2	92,2	86,1
30/05/2017 17:18	3	8,1	124,5	96,3	83,2	125,2	94,9	83,2
30/05/2017 19:46	3	8,1	124,5	95,5	82,5	125,2	95,2	83,3
31/05/2017 23:49	4	11,5	124,6	95	84,9	125,2	97,5	81,9
01/06/2017 0:36	4	11,5	124,5	102,5	84,3	125,1	107,9	83,5
01/06/2017 2:18	4	11,5	124,6	84,6	86,7	124	83,4	78,3
01/06/2017 4:46	4	11,5	124,6	94,2	86,3	123,9	92,5	82,3

*Tabla 39: Resultados de comportamiento de la biomasa en la caldera (fuente: elaboración propia)*

Fecha y hora	% de sustitución		Caldera				
			Ton/h Vapor	CO gases salida de la B&D	O2 caldera	tº gases antes de Luvo	tª gases después de Luvo
dd/mm/aa hh:mm	% PCI	% masa	Ton/h	ppm	%	°C	°C
30/05/2017 14:49	3	8,1	172,5	34	1,9	370,7	145,8
30/05/2017 15:36	3	8,1	174,6	33	2,1	370,8	145,6
30/05/2017 17:18	3	8,1	173,5	31	1,7	371,2	146,4
30/05/2017 19:46	3	8,1	173,3	31	1,8	371,4	146,6
31/05/2017 23:49	4	11,5	171	34	1,9	372,4	145
01/06/2017 0:36	4	11,5	168,8	33	2	371,3	141,6
01/06/2017 2:18	4	11,5	168,5	34	2,2	374,2	145,4
01/06/2017 4:46	4	11,5	172,6	31	2,6	362,7	139,3

Ambas tablas muestran una continuidad de los parámetros para diferentes valores de tiempo en los que se combustionaba a la vez carbón y biomasa con porcentajes inferiores al 10%.

### 6.2.2 Prueba con astilla de Toranzo

La presente prueba se realizó con una astilla proveniente del aserradero de San Vicente de Toranzo, en los análisis se muestran los valores de esta astilla nombrada como “Astilla 3 (Toranzo)”.

Dicha prueba se llevó a cabo en la caldera acuatubular GNSPO (Balcke-Dürr) el día 25 de julio de 2017.

#### 6.2.2.1 Análisis de la muestra recibidas

En esta ocasión no se analizó ninguna muestra recibida, ya que, no se decidió realizar la dosificación a la caldera debido a que la granulometría de las astillas era excesivamente grande y presentaba posibles problemas de obstrucciones en los molinos.



*Ilustración 59: Muestra de astilla 3 (Toranzo) con granulometría excesiva (fuente: elaboración propia)*

#### 6.2.2.2 Recepción y descarga de la astilla 3 “Toranzo”

Se trata de una sola prueba de descarga debido a que, posteriormente a la llegada del camión se comprobó que la carga que transportaba no era la que se había solicitado. El tamaño de las astillas era excesivo para ser combustionado en las calderas.

Pese a esto, el camión descargó las astillas al igual que en las pruebas anteriores de descarga. Se utilizó un camión con remolque de piso móvil. La descarga se realizó de forma rápida, el gran tamaño de la materia primo facilitó la descarga evitándose problemas de obstrucción en tolvas.



*Ilustración 60: Descarga de astillas de "Toranzo" (fuente: elaboración propia)*

*Tabla 40: Datos de la prueba de descarga del sexto camión (fuente: elaboración propia)*

Día	25 / 07 / 2017
Hora de inicio	09:00
Tiempo de descarga	25 min
Pesaje del camión	23 ton

Las astillas no se correspondían a las que se habían solicitado en un principio. Las recibidas poseían un tamaño de granulometría mayor al permitido para poder ser procesado por los molinos de las tolvas de las calderas. Por esta razón, se decidió devolver la mercancía recibida no realizando así las pruebas de dosificación.

### 6.2.3 Prueba con orujillo

En este apartado se muestran los resultados de las pruebas efectuadas con orujillo. Dichas pruebas se llevaron a cabo en la caldera GNSPO (Balcke-Dürr) entre el 1 de agosto de 2017 y el 4 de agosto de 2017.

#### 6.2.3.1 Análisis de las muestras recibidas

Tras la llegada de cada camión, fue necesario tomar muestras de diferentes partes de la carga para así determinar la composición química de la misma. Estas muestras fueron analizadas por el laboratorio de Solvay y sus resultados sirvieron de utilidad para calcular que cantidad de biomasa en peso era necesaria añadir a la mezcla con carbón para cumplir cada porcentaje de sustitución establecido antes de la prueba de dosificación.

*Tabla 41: Resultados análisis de orujillo (fuente: elaboración propia)*

Componente	Unidad	Muestra 1	Muestra 2
Humedad	% masa	6,96	6,96
Materia volátil	% masa	72,52	67,47
Carbono fijo	% masa	19,89	18,5
Cenizas	% masa	7,59	7,06
Azufre	% masa	0,22	0,2
PCS	kcal/kg	4885,7	4545,7

PCI	Kcal/kg	4425,4	4075,7
-----	---------	--------	--------

### 6.2.3.2 Recepción y descarga de orujillo

El Orujillo llegó en el que sería el camión número 7 de transporte de biomasa de las pruebas de co-combustión. Los datos de la recepción y descarga del camión de Orujillo son los siguientes:

*Tabla 42: Datos de la prueba de descarga del séptimo camión (fuente: elaboración propia)*

Día	1 de agosto de 2017
Hora de descarga	11:20
Tiempo de descarga	10 min
Pesaje del camión	26,7

Tras comenzar la descarga puede observarse la gran cantidad de polvo que se levanta. Esto es debido a que el orujillo posee gran cantidad de finos y una humedad relativa baja.

La descarga se produce de forma rápida comparada a las otras pruebas realizadas con astillas. El medio usado para el transporte y la descarga se trata de un camión con remolque de volquete.



*Ilustración 61: Descarga de orujillo (fuente: Santiago Salguero)*

### 6.2.3.3 Dosificación de orujillo

En el caso de la dosificación, se desarrolló de la siguiente forma:

El porcentaje de sustitución en PCI teórico era del 3 al 3,5 %. Debido a que las guillotinas de las vibro-extractoras A y B del silo 1, incluso en su posición de mínima apertura, daban un caudal másico muchísimo mayor, análogo a una sustitución del 10% en PCI, se optó por hacer una dosificación con un 10% de sustitución en PCI de forma intermitente en la realización de las pruebas. Esto se debe a que la densidad relativa del Orujillo es mayor que la de las otras biomásas, de en torno a 0,74.

Durante la realización de las pruebas, se realizaron varias mediciones para ver cuál era el caudal másico que iban dando las vibro-extractoras A y B en 1,5 m de cinta. Los resultados arrojaron que los valores oscilaban entre los 4 y los 7 kg, siendo comunes los valores cercanos a 5 kg. A estos valores, habría que descontar el peso del recipiente utilizado para realizar el pesaje, que era de 1,085 kg.

### 6.2.3.4 Combustión

En cuanto al proceso de combustión lo relevante fue lo siguiente:

- La combustión de la mezcla carbón y Orujillo se realiza en la caldera Balcke-Dürr.
- Cuando la mezcla entra al molino lo hace con un porcentaje de sustitución en masa del 10%, por lo que al alimentar los molinos a una velocidad de 70 cm/min se originan atragantamientos.
- En vista de que los molinos, a la velocidad anterior, no son capaces de trabajar con la mezcla en condiciones óptimas, se decide probar a 65 cm/min, con el fin de ver si dicha velocidad ocasiona algún problema.

### 6.2.4 Impacto ambiental

En cuanto al impacto ambiental de las pruebas, son varios los resultados a tener en cuenta. Por un lado, ya que un claro objetivo de este estudio es reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, es necesario ver que reducciones de CO<sub>2</sub> existen al realizar la sustitución de carbón en la fábrica de Torrelavega, y también ver que reducciones de CO<sub>2</sub> anuales se pueden llegar a conseguir a nivel regional. Por otro lado, es necesario controlar las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas para comprobar que no sobrepasan los límites de emisión establecidos.

#### 6.2.4.1 Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>

Según los datos del Ministerio de Medio Ambiente el valor de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Cantabria en 2015 fueron de 5.748.000 toneladas de CO<sub>2</sub>.

Si tenemos en cuenta que Solvay consume anualmente del orden de 270.000 toneladas de carbón de importación, aplicando el factor de emisión medio de CO<sub>2</sub> del carbón: 93,5 toneladas de CO<sub>2</sub>/ TJ, se obtiene que produce del orden de **620.000 toneladas de CO<sub>2</sub>** a la atmosfera anualmente. Lo que representaría casi el **11 % de las emisiones de Cantabria**.

Con estos valores es necesario saber cómo influye la sustitución de biomasa sobre estos valores. Se calculará la reducción de emisiones, medida como toneladas de CO<sub>2</sub> evitada y el

porcentaje de reducción con respecto a la Comunidad Autónoma. La siguiente tabla muestra como influiría la sustitución de carbón por biomasa empleando co-combustión:

*Tabla 43: Reducción de emisiones usando biomasa (fuente: elaboración propia)*

Posibles escenarios	ton CO <sub>2</sub> emitidas	ton de CO <sub>2</sub> evitadas /año	% sobre emisiones de Cantabria	% reducción de emisiones
Combustión de carbón (100%)	620.000	-	10,79%	-
Co-combustión (5%)	589.000	31.000	10,30%	0,48%
Co-combustión (10%)	558.000	62.000	9,81%	0,97%

Como se observa de la tabla anterior, la implantación de co-combustión al 10% en PCI conseguiría reducir las emisiones de Cantabria hasta un 1%.

#### 6.2.4.2 Control de valores límites de emisión

Por último, ha de controlarse que no se sobrepasen los valores establecidos por el Real Decreto 815 en cuanto a emisiones.

Estos valores solo pudieron ser tomados para las dos últimas pruebas con astilla francesa (prueba 3 y prueba 4) debido a que no se tuvo acceso a más datos de pruebas, ya que el programa utilizado para visualizarlo (Aspen) no estaba totalmente accesible a todo el mundo.

*Tabla 44: Resultados de contaminantes emitidos a la atmosfera (fuente: elaboración propia)*

Fecha y hora	% de sustitución		Chimenea			
			NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	Opacidad
dd/mm/aa hh:mm	% PCI	% masa	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	mg/Nm <sup>3</sup>	%
30/05/2017 14:49	3	8,1	459,9	555	1,4	7,5
30/05/2017 15:36	3	8,1	453,4	561,7	1,4	7,7
30/05/2017 17:18	3	8,1	478,6	588,7	2,3	7,7
30/05/2017 19:46	3	8,1	430,4	586,2	7	7,6
31/05/2017 23:49	4	11,5	431,2	552	6,1	7,5
01/06/2017 0:36	4	11,5	420,7	549,8	7,4	7,4
01/06/2017 2:18	4	11,5	443	558,3	7,6	7,9
01/06/2017 4:46	4	11,5	448,5	555,2	4,8	8,1
Valores limites			450	400	100	

Como se observa de la tabla las emisiones de NO<sub>x</sub> se encuentran en el límite establecido, mientras que las emisiones de SO<sub>2</sub> están ligeramente por encima de los permitido por la legislación. Las emisiones de CO se mantienen correctamente.

## 7. Conclusiones

A continuación, se describen las conclusiones obtenidas del estudio. Por un lado, existen conclusiones de la caracterización y, por otro lado, conclusiones obtenidas de las pruebas de co-combustión realizadas y medioambientales.

### 7.1 Conclusiones de la caracterización

Como conclusión de la caracterización la mejor opción disponible como combustible es el orujillo, ya que cumple los requisitos de precio competitivo, disponibilidad, composición química y granulometría medianamente adecuadas. El único problema es la limitación al 2 % debido al filtro de NO<sub>x</sub> de la fábrica, luego sería necesario desarrollar un mix de combustibles alternativos en el que se mezcle con otros combustibles (rebajando así el contenido de potasio) o buscar una alternativa para el filtro de NO<sub>x</sub> que permita aumentar el porcentaje de orujillo sustituido.

Por otra parte, los siguientes tipos mejor posicionados para ser consumidos serían los residuos y podas de eucalipto junto con las cortezas de pino, ya que tienen un precio por unidad de energía parecido o incluso más barato que el del carbón, y también cumplen con los requisitos de disponibilidad y composición química adecuada. El único problema sería que ambos tipos necesitarían de un triturado previo ya que poseen un tamaño de grano demasiado grande.

La caracterización también ha servido para conocer qué variables son importantes sobre el uso de biomasa como la humedad o la granulometría. La granulometría limita el tamaño de grano que puede usarse sin que perjudique la dosificación a la caldera, mientras que la humedad influye directamente sobre el poder calorífico inferior, los cuales juegan un papel fundamental en el aprovechamiento energético y el manejo de volúmenes de combustible (cuanto menor PCI, mayor volumen de biomasa necesario), además de encarecer el precio del combustible al disminuir su PCI.

La opción de implantar una trituradora en fábrica quedaría a priori justificada, ya que permitiría utilizar combustibles más baratos, reduciendo el precio de mix de combustibles a utilizar y permitiendo poder ahorrar más de 300.000€ anuales.

Otro punto que ayudaría a mejorar la caracterización, en este caso la parte química, consistiría en realizar un mayor número de análisis de muestras de biomasa para crear una base de datos y cálculos mediante métodos estadísticos que ayuden a conocer mejor los parámetros químicos (parte orgánica, parte inorgánica, humedad, materia volátil, poder calorífico...) sobre los que gira la composición de cada combustible.

### 7.2 Conclusiones de las pruebas

Las conclusiones extraídas durante las pruebas realizadas radican en la descarga, el almacenamiento, dosificación y combustión en la caldera de la biomasa.

- La descarga en la zona de vagones de carbón no es la más idónea en cuanto a tiempo y espacio, generando problemas que tuvieron que ser solucionados de forma extraordinaria.

- La dosificación y almacenamiento en el silo 1 no ha sido de lo más acertada ya que en varios momentos no ha funcionado correctamente con varios tipos de biomasa.
- La combustión en ocasiones ha originado problemas, puesto que ha habido atascos en los molinos de alimentación de la caldera, ya que los molinos están preparados para el carbón, no para la biomasa.

Por lo anterior, se deduce que no existe una infraestructura adecuada en la fábrica de Solvay Torrelavega para la realización de co-combustión de biomasa. Lo cual hace necesario la adecuación de dicha infraestructura para adaptarla al uso de biomasa. Dicha infraestructura podría contar con una zona de descarga que evite problemas de obstrucciones y formaciones de polvo (caso del orujillo), triturado que rebaje el tamaño de grano al necesario y un sistema de dosificación al circuito de combustible.

Del mismo modo, es posible estudiar también una dosificación directa a la caldera por medio de uno o más inyectores sustituyendo alguno de los utilizados para insertar fuel-oil al interior del hogar, transportando la biomasa, ya triturada o pulverizada, por medio de un sistema neumático.

Además de lo anterior se extraen otras conclusiones más relacionadas con la biomasa que con la infraestructura utilizada. Las variaciones de la humedad de las muestras recibidas hacen necesario la elaboración de una fórmula de penalización al precio de la biomasa. La granulometría o la densidad de la biomasa también han sido parámetros influyentes en las pruebas.

### 7.3 Conclusiones ambientales

La sustitución de carbón por combustibles más amigables con el medio ambiente ayudaría sustancialmente reducir la intensidad de emisión de gases de efecto invernadero en Cantabria, desde un 1% usando co-combustión a 11% de las emisiones de la comunidad, si se sustituyera todo el carbón de Solvay Torrelavega. Lo cual tendría un claro beneficio para el medio ambiente. Las emisiones de otros contaminantes como los NO<sub>x</sub> o el SO<sub>2</sub> se mantienen en niveles ligeramente por debajo de los del carbón (en el caso de la astilla).

Por otro lado, se obtienen otras conclusiones medioambientales más relacionadas con el aprovechamiento de la biomasa que con las propias emisiones. Por un lado, el aprovechamiento masivo de los bosques para fines energéticos convirtiéndolos en biomasa contribuye a la destrucción de hábitats animales, deforestación excesiva que puede tener efectos sobre el suelo creando desprécienos, falta de drenaje, etc., además de crear un importante impacto visual. Por lo que la explotación ha de hacerse controladamente.

Además, la creación de nuevos cultivos energéticos a partir de árboles puede poner en riesgo la existencia de muchas especies de árboles autóctonos y utilización de otras especies invasoras que contribuyen a la alteración del ecosistema.

## 8. Bibliografía

IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía):

- “*Mapa tecnológico: Calor y Frio Renovables*”.  
[\[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Calor\\_y\\_Frio\\_Renovables\\_Biomasa\\_11012012\\_global\\_v2\\_09570f12.pdf\]](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Calor_y_Frio_Renovables_Biomasa_11012012_global_v2_09570f12.pdf)
- “*Energía de la biomasa (Manuales de energías renovables)*”.  
[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10374\\_Energia\\_de\\_la\\_biomasa\\_07\\_28e17c9c.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_de_la_biomasa_07_28e17c9c.pdf)
- “*Gasificación de la biomasa*”.  
[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)

MAPAMA (Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente)

- “*Cambio climático y como nos afecta*”. <http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/que-es-el-cambio-climatico-y-como-nos-afecta/>
- “*Cuarto inventario forestal nacional*”.  
[http://www.mapama.gob.es/es/prensa/13.05.14%20Cuarto%20Inventario%20Forestal%20Nacional\\_tcm7-278187\\_noticia.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/prensa/13.05.14%20Cuarto%20Inventario%20Forestal%20Nacional_tcm7-278187_noticia.pdf)
- “*Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios*”.  
[http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Gu%C3%ADas%20t%C3%A9cnicas/Guia\\_Instalaciones\\_Biomasa.pdf](http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Gu%C3%ADas%20t%C3%A9cnicas/Guia_Instalaciones_Biomasa.pdf)

BOE (Boletín Oficial del Estado):

- Real Decreto 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Orden IET/1045/2014, de 16 de junio, por la que se aprueban los parámetros retributivos de las instalaciones tipo aplicables a determinadas instalaciones de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos.
- Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación.

Otras:

- “*Ventajas y desventajas de biomasa*”.  
<http://www.energiasrenovablesinfo.com/biomasa/biomasa-ventajas-desventajas/>
- “*IEA’s Report on 1st- to 2nd-Generation Biofuel Technologies*”.  
<http://www.renewableenergyworld.com/articles/2009/03/ieas-report-on-1st-to-2nd-generation-biofuel-technologies.html>

- “Biomass Co-firing”. <http://www.americancoalcouncil.org/?page=biomasa>
- “Biomass energy resources”. <https://www.forestry.gov.uk/fr/bec>
- “District Heating drives urban heating transition”.  
<https://corporate.vattenfall.com/about-energy/energy-distribution/district-heating/>
- “Cambio Climático”.  
[http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE\\_83\\_117140\\_78E2E154C2BB213409D09C083013930C.pdf](http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_83_117140_78E2E154C2BB213409D09C083013930C.pdf)
- “Small Modular Biomass Systems”. <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33257.pdf>
- “Guía metodológica para la caracterización y evaluación de la calidad de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos”.  
[http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/IsdocCombustibles/anexo\\_1\\_guia\\_metodologica\\_caracterizacion\\_de\\_combustibles.pdf](http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/IsdocCombustibles/anexo_1_guia_metodologica_caracterizacion_de_combustibles.pdf)
- “Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico”.  
[http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/17777/6/TFM\\_Ana\\_AlvarezProteg.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/17777/6/TFM_Ana_AlvarezProteg.pdf)
- “Robust global ocean cooling trend for the pre-industrial Common Era”.  
<http://www.nature.com/ngeo/journal/v8/n9/full/ngeo2510.html>
- “Solvay Torrelavega”. <http://www.solvay.es/es/solvay-in/locations/torrelavega.html>
- “Los problemas de los combustibles fósiles”. <http://www.geotermia.com/blog/informacion-general/problemas-uso-combustibles-fosiles.html>
- “Emisiones de GEI por comunidad autónoma a partir del inventario español – Serie 1990-2015”. [http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/resumenemisionesgeiporccaaserie1990-2015\\_tcm7-454960.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/resumenemisionesgeiporccaaserie1990-2015_tcm7-454960.pdf)
- <https://www.energias-renovables.com/>
- “Paquete de medidas sobre el clima energía hasta 2020”.  
[https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es)
- <http://www.irena.org/home/index.aspx?PriMenuID=12&mnu=Pri>

Libros:

- “Biomasa y sus distintas valoraciones” (2007, Retema, ISSN 1130-9881, Madrid : C & M Publicaciones. -- N. 121)

Trabajos utilizados (UCrea):

- TFG de Yuliya Voloshyna.  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/7923/YV.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Artículos:

- ACS Publications / energy&fuels.
  - Fuel Indexes: A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels.

- 
- Measuring and Predicting the Slagging of Woody and Herbaceous Mediterranean Biomass Fuels on a Domestic Pellet Boiler
  - Fouling Deposits from Residual Biomass with High Sodium Content in Power Plants
  - Elsevier.
    - Classification and characterization of SRF produced from different flows of processed MSW in the Navarra region and its co-combustion performance with olive tree pruning residues.
    - Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain.
  - Free alkali-index for optimizing the fuel mixture in biomass co-firing (T.E. Blomberg).

## 9. Anexo

### 9.1.1 Índice de tablas

Tabla 1: Composición de diferentes ejemplos de biomasa (fuente: ETS de Ingenieros de Minas de Oviedo).....	16
Tabla 2: Ejemplos de composición química de la biomasa sólida (fuente: Manual de combustibles sólidos. AVEBIOM).....	18
Tabla 3: Clasificación de centrales según origen de la biomasa (elaboración propia usando RD 661/2007).....	31
Tabla 4: Ejemplo central tipo b.6 y b.8 año con entrada en funcionamiento 2013 (fuente: elaboración propia).....	33
Tabla 5: Análisis de serrín. Pruebas 2006 (fuente: Solvay) .....	35
Tabla 6: Datos combustibles utilizados en las pruebas de 2008 (fuente: Solvay) .....	37
Tabla 7: Datos geográficos de Solvay Torrelavega (fuente: Sigpac).....	42
Tabla 8. Datos representativos de calderas Sulzer y Balcke-Dürr (fuente: elaboración propia) 46	
Tabla 9: Parámetros a determinar para caracterización analítica de biomasa (fuente: propia) 56	
Tabla 10: Índices de control (fuente: elaboración propia).....	59
Tabla 11: Valores límite de emisión RD 815/2013 (fuente: elaboración propia).....	65
Tabla 12: Localizaciones y logística de los combustibles encontrados (fuente: elaboración propia) .....	75
Tabla 13: Resultado análisis Orujillos (fuente: propia) .....	76
Tabla 14: Resultados análisis subproductos del pino (1) (fuente: elaboración propia).....	77
Tabla 15: Resultados análisis subproductos del pino (2) (fuente: elaboración propia).....	78
Tabla 16: Resultados análisis subproductos del pino (3) (fuente: elaboración propia).....	79
Tabla 17: Resultado análisis eucalipto (fuente: elaboración propia).....	80
Tabla 18: Análisis químico biomasa de matorrales (fuente: Proyecto Enerbioscrub, Ciemat)...	81
Tabla 19: Análisis CSR (fuente: elaboración propia a partir de datos de facilitados por Cogersa) .....	81
Tabla 20: Granulometría de la biomasa encontrada (fuente: elaboración propia).....	82
Tabla 21: Factor de emisión de cada biomasa analizada (fuente: elaboración propia) .....	82
Tabla 22: Análisis de carbón usado en Solvay (fuente: elaboración propia) .....	83
Tabla 23: Co-combustión con orujillo (fuente: elaboración propia).....	84
Tabla 24: Co-combustión con Astilla de pino (fuente: elaboración propia) .....	85
Tabla 25: Co-combustión con corteza de pino (fuente: elaboración propia) .....	86
Tabla 26: Co-combustión con eucalipto (fuente: elaboración propia) .....	87
Tabla 27: Energía consumida por la central de carbón (fuente: elaboración propia) .....	89
Tabla 28: Disponibilidades de combustibles alternativos (fuente: elaboración propia) .....	89
Tabla 29: Precios de la biomasa (fuente: elaboración propia).....	91
Tabla 30: Mix de biomosas ya trituradas (fuente: elaboración propia).....	93
Tabla 31: Mix de biomosas con necesidad de triturado (fuente: elaboración propia).....	93
Tabla 32: Análisis de astilla "francesa" efectuado por el laboratorio de Solvay (fuente: elaboración propia).....	94
Tabla 33: Datos de la prueba de descarga del primer camión (fuente: elaboración propia) .....	96

Tabla 34: Datos de la prueba de descarga del segundo camión (fuente: elaboración propia) ..	97
Tabla 35: Datos de la prueba de descarga del tercer camión (fuente: elaboración propia) .....	98
Tabla 36: Datos de la prueba de descarga del cuarto camión (fuente: elaboración propia).....	98
Tabla 37: Datos de la prueba de descarga del quinto camión (fuente: elaboración propia) .....	98
Tabla 38: Resultado comportamiento de la biomasa en los molinos (fuente: elaboración propia) .....	101
Tabla 39: Resultados de comportamiento de la biomasa en la caldera (fuente: elaboración propia).....	101
Tabla 40: Datos de la prueba de descarga del sexto camión (fuente: elaboración propia) .....	103
Tabla 41: Resultados análisis de orujillo (fuente: elaboración propia).....	103
Tabla 42: Datos de la prueba de descarga del séptimo camión (fuente: elaboración propia) ..	104
Tabla 43: Reducción de emisiones usando biomasa (fuente: elaboración propia) .....	106
Tabla 44: Resultados de contaminantes emitidos a la atmosfera (fuente: elaboración propia) .....	106

### 9.1.2 Índice de imágenes

Ilustración 1. Evolución de la temperatura media a lo largo de la historia de la Tierra (fuente: <a href="http://www.ccpems.exactas.uba.ar/cms/">http://www.ccpems.exactas.uba.ar/cms/</a> ).....	6
Ilustración 2. Efecto de los gases de efecto invernadero (fuente: <a href="http://www.habana-radio.cu">http://www.habana-radio.cu</a> )	6
Ilustración 3: Ciclo del carbono (fuente: <a href="http://www.emaze.com">www.emaze.com</a> ).....	7
Ilustración 4. Máquina de vapor, símbolo de la revolución industrial (fuente: Google imágenes) .....	8
Ilustración 5: Efectos de la lluvia ácida (fuente: <a href="http://ecologia-hoy.net">http://ecologia-hoy.net</a> ).....	9
Ilustración 6: Fuentes de energía renovables (fuente: <a href="http://icasasecologicas.com">http://icasasecologicas.com</a> ).....	10
Ilustración 7: Objetivos energéticos para 2020 UE (fuente: Eurostat) .....	12
Ilustración 8. Generación de biomasa (fuente: IDAE) .....	15
Ilustración 9. Ciclo de CO <sub>2</sub> (Fuente: IDAE).....	15
Ilustración 10: Residuos forestales empacados (fuente: <a href="http://eucalyptusenergy.com">eucalyptusenergy.com</a> ) .....	19
Ilustración 11: Residuos de la industria forestal (fuente: <a href="http://www.interempresas.net/Madera/">http://www.interempresas.net/Madera/</a> ) .....	20
Ilustración 12: Ciclo de la revalorización energética de residuos (fuente: elaboración propia). 21	
Ilustración 13: Esquema tipos de biomasa (fuente: elaboración propia).....	22
Ilustración 14: District Heating (Fuente: Vattenfall) .....	24
Ilustración 15: Central de generación eléctrica mediante biomasa (fuente: UNESA). .....	25
Ilustración 16: Co-combustión directa en calderas de carbón pulverizado (Fuente: Sacyr Industrial) .....	27
Ilustración 17: Co-combustión indirecta (Fuente: Sacyr Industrial) .....	27
Ilustración 18: Esquema del reactor multi-etapa de Guascor (fuente: IDAE).....	29
Ilustración 19: Sistema comunitario modular de 100KW de potencia (fuente: U.S. Department of energy) .....	30
Ilustración 20: Descarga de serrín en las tolvas de descarga de vagones (fuente: Solvay) .....	36

---

Ilustración 21: Perspectiva de una cinta que transportaba carbón y serrín mezclado hacia la caldera (Fuente: Solvay).....	36
Ilustración 22: Carga de la tolva (Fuente: Solvay).....	38
Ilustración 23: Descarga de la cinta del serrín a la cinta transportadora (Fuente: Solvay).....	38
Ilustración 24: Sistema construido para desarrollar las pruebas en CT Velilla del Campo (Fuente: Iberdrola).....	40
Ilustración 25: Fábrica Solvay Torrelavega (fuente: www.Solvay.es) .....	41
Ilustración 26: Representación esquemática de una central térmica de carbón (Fuente: Enciclopedia CEAC de Electricidad, centrales Eléctricas, José Ramírez y Lorenzo Beltrán). .....	43
Ilustración 27: Tolvas de descarga de carbón (fuente: elaboración propia).....	44
Ilustración 28: Imán para cintas transportadoras (fuente: <a href="http://www.masanes.com">http://www.masanes.com</a> ) .....	44
Ilustración 29: Silos de almacenamiento de carbón de Solvay (fuente: Google maps viewer) ..	45
Ilustración 30: Esquema de caldera de carbón pulverizado soplado al interior del hogar (fuente: <a href="http://es.pfernandezdiez.es/">http://es.pfernandezdiez.es/</a> ).....	46
Ilustración 31: Pulverizador vertical de rodillos (Fuente: <a href="http://es.pfernandezdiez.es/">http://es.pfernandezdiez.es/</a> ).....	47
Ilustración 32: Recirculación de carbón en el pulverizador vertical (fuente: <a href="http://es.pfernandezdiez.es/">http://es.pfernandezdiez.es/</a> ).....	48
Ilustración 33: Quemador convencional (fuente: <a href="http://es.pfernandezdiez.es/">http://es.pfernandezdiez.es/</a> ) .....	48
Ilustración 34: Hogar caldera Sulzer en proceso de limpieza (fuente: elaboración propia).....	49
Ilustración 35: Puntos sobre los que gira la caracterización de combustibles (fuente: elaboración propia).....	51
Ilustración 36: Radio de búsqueda de combustible alternativos (fuente: Google Earth y elaboración propia).....	52
Ilustración 37: Mapa del potencial de biomasa en Cantabria (fuente: <a href="http://bionline.idae.es/biomasa">http://bionline.idae.es/biomasa</a> ).....	53
Ilustración 38: Distribución pluviométrico anual en Cantabria (fuente: Termo pluviometría de Cantabria durante el periodo 1981-2010-AEMET).....	54
Ilustración 39: Proceso de producción de la biomasa (fuente: elaboración propia).....	55
Ilustración 40: Diagrama de flujo caracterización de combustibles alternativos (fuente: elaboración propia).....	61
Ilustración 41: Logotipos Gobierno de Cantabria y Unión Europea (fuente: Proyecto Co-COMbio).....	62
Ilustración 42: Proceso productivo del orujillo (fuente: ANEO).....	67
Ilustración 43: Anatomía del tronco (fuente: <a href="http://conceptosdeanatomiadela madera.blogspot.com.es">http://conceptosdeanatomiadela madera.blogspot.com.es</a> ) .....	68
Ilustración 44: Ejemplos de calidades de Astilla de pino (fuente: elaboración propia).....	68
Ilustración 45: Corteza de pino (fuente: elaboración propia).....	69
Ilustración 46: Serrín de pino (fuente: elaboración propia).....	69
Ilustración 47: Proceso productivo subproductos del pino del principal aserradero encontrado (fuente: elaboración propia) .....	70
Ilustración 48: Plantación de Eucalipto (fuente: Nunet.com).....	70
Ilustración 49: Proceso de obtención de productos y subproductos del eucalipto (fuente: elaboración propia).....	71

---

Ilustración 50: Maquinaria de recolecta de matorrales (fuente: Ciemat) .....	72
Ilustración 51: Proceso productivo de biomasa procedente de matorral (fuente: CIEMAT) .....	72
Ilustración 52: Materiales representativos de la fracción de muestra comprendida entre 20-50 mm (fuente: Cogersa) .....	73
Ilustración 53: Mapa de localizaciones de proveedores (fuente: elaboración propia) .....	75
Ilustración 54: Descarga del primer camión (fuente: propia) .....	96
Ilustración 55: Obstrucción de las tolvas de descarga (fuente: elaboración propia).....	96
Ilustración 56: Restos de escombros y tronco contenido junto a las astillas (fuente: elaboración propia) .....	97
Ilustración 57: Obstrucción de las tolvas de descarga (fuente: elaboración propia).....	99
Ilustración 58: Dosificación de astillas junto al carbón (fuente: elaboración propia) .....	99
Ilustración 59: Muestra de astilla 3 (Toranzo) con granulometría excesiva (fuente: elaboración propia) .....	102
Ilustración 60: Descarga de astillas de "Toranzo" (fuente: elaboración propia) .....	103
Ilustración 61: Descarga de orujillo (fuente: Santiago Salguero).....	104

### 9.1.3 Índice de gráficas

Gráfica 1: Índice de álcali (fuente: elaboración propia).....	87
Gráfica 2: Índice de sinterización (fuente: elaboración propia).....	88
Gráfica 3: Ratio S/Cl (fuente: elaboración propia) .....	88
Gráfica 4: Representación gráfica disponibilidades de biomasa frente consumo de carbón (fuente: elaboración propia) .....	90
Gráfica 5: Precios de combustibles (fuente: elaboración propia).....	92
Gráfica 6: Variación de la composición química de las muestras de astilla (fuente: elaboración propia) .....	95
Gráfica 7: Variación del poder calorífico entre las muestras de astilla (fuente: elaboración propia) .....	95

### 9.1.4 Índice de formulas

(1) Carbono fijo.....	57
(2) Factor de emisión de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /ton biomasa) .....	57
(3) Factor de emisión de CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /TJ) .....	57
(4) CaO.....	57
(5) Na <sub>2</sub> O.....	58
(6) K <sub>2</sub> O.....	58
(7) CO <sub>2</sub> .....	58
(8) MgO.....	58
(9) Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	58
(10) SiO <sub>3</sub> .....	58
(11) SO <sub>2</sub> .....	58
(12) Ratio S/Cl.....	58
(13) Índice de álcali.....	58
(14) Ratio Molar.....	58

---

(15) Índice Sinterización.....	58
(16) Índice Aglomeración.....	60
(17) Ensuciamiento por silicio.....	60
(18) Coste de precio de combustible a partir de precio (€/ton) y PCI (Kcal/kg).....	61
(19) Porcentaje de sustitución en masa.....	63
(20) Porcentaje de sustitución en energía.....	64