Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Determinación de la viabilidad de nuevos combustibles biomásicos mediante análisis del ensuciamiento en quemador experimental de biomasa

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Carlos Ceballos Darnaude

DIRECTORES: Araceli Regueiro Pereira

Juan Jesús Rico Fuentes

CURSO ACADÉMICO: 2019-2020

Universidade Vigo

Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Determinación de la viabilidad de nuevos combustibles biomásicos mediante análisis del ensuciamiento en quemador experimental de biomasa

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

RESUMEN

El estudio llevado a cabo en este proyecto de fin de grado se centra en el análisis de ensuciamiento (tanto en el tubo de intercambio de calor, como en la cámara de combustión y cenicero) de una caldera acuotubular, de lecho fijo con una configuración versátil ubicada en los laboratorios de investigación de la Universidad de Vigo.

Se han realizado varios ensayos fijando parámetros de tipo de combustible, cauda total de entrada en la caldera y distribución de este caudal entre el primario y el secundario. De esta manera se ha permitido un estudio de estas variables y su influencia sobre los distintos métodos de ensuciamiento en la instalación.

Las muestras recogidas han sido tratadas, pesadas y analizadas con el fin de buscar tendencias y conclusiones.

PALABRAS CLAVE

Biocombustible; Caldera; Pellet; Ensuciamiento; Slaggin; Fouling.

AGRADECIMIENTOS

A la F1 por los buenos ratos que hemos echado durante la realización de este trabajo, haberme aguantado cuando ni yo mismo lo hacía y haberme sacado una sonrisa cuando no había motivos para ello.

A Rocío, por su apoyo incondicional. Por creer en mí más que yo mismo. Por levantarme en los momentos duros de este mes y ayudarme a despejarme siempre que lo he necesitado. En definitiva, por estar siempre ahí.

A Juan, Pablo, Gonzalo… a Suicide squad, por no ser el grupo que merecemos, pero sí el que necesitamos.

A mis tutores, Araceli y Jesús, por toda la ayuda que me han prestado en la realización del proyecto. Por la paciencia y comprensión que han tenido.

A mi familia y amigos, por todo el apoyo y cariño recibido durante estos 5 años.

A Luisete. DUC IN ALTUM.

CONTENIDO

Contenido 1
Índice de Figuras 3
Índice de Tablas 5
1 Introducción 1
1.1 Introducción 1
1.2 Situación energética global 1
1.3 Situación energética Europa 4
1.4 Situación energética España 5
2 Biomasa 7
2.1 Clasificación Biomasa 8
2.1.1 Según su estado 9
2.1.2 Según su origen 9
2.2 Características energéticas de la biomasa 10
2.2.1 Influencia del tamaño y forma 11
2.2.2 Influencia de la densidad 11
2.2.3 Influencia de las cenizas 11
2.3 Metodos de procesado y de aprovechamiento de la biomasa 12
2.4 Ventajas e inconvenientes de la biomasa 13
2.4.1 Ventajas 13
2.4.2 Desventajas 13
3 Combustión de biomasa 15
3.1 El combustible 15
3.1.1 Fabricación del pellet 17
3.1.2 Combustible utilizado en este proyecto 18
3.2 Tipos de calderas 22
3.3 Tipos de Lecho 23
4 Problemáticas asociadas a la combustión de biomasa 25
4.1 Deposición 25
4.2 Sinterizado 27
4.3 Determinación de índices de deposición 28
5 Instalación experimental 31
5.1 Introducción 31
5.2 Componentes de la instalación 32

5.2.1 Componentes de alimentación 32
5.2.2 Componentes de la combustión 33
5.2.3 Elementos de control 35
5.2.4 Circuito de refrigeración 37
5.2.5 Circuito de aire 38
5.2.6 Adquisicion de datos 38
6 Metodología experimental 39
6.1 Limpieza 39
6.2 El ensayo 39
6.3 Recogida de muestras 41
6.4 Tratamiento de muestras 43
7 Análisis de resultados 45
7.1 Ensayos realizados 45
7.2 Estabilidad de la planta 45
7.3 Deposición 47
7.3.1 Pellet de tojo 47
7.3.2 Ensayos 30_70 49
7.4 Sinterizado 51
7.4.1 Pellet de tojo 51
7.4.2 Ensayos 30_70 52
8 Conclusiones 55
9 Líneas futuras 57
10 Bibliografía 59

ÍNDICE DE FIGURAS

1-1 Evolución del consumo de energía primaria mundial. Fuente: [1] 1
1-2 Consumo global de energía. Fuente: elaboración propia. 2
1-3 Inversión por sectores en energías renovables- BNEF 3
1-4 Consumo de energía primaria en Europa 2018- Autoría propia 4
1-5Consumo interior bruto de renovables, EU-28, 1990-2017 4
1-6 Porcentaje de energía procedente de fuentes renovables, 2017 5
1-7 Consumo de energía primaria en España por fuentes, año 2015 5
2-1 Ciclo del CO2. Fuente: IMARTE, Biomass Energy Evolution 8
2-2 Clasificación de biomasa. Fuente: Elaboración propia 8
2-3 Poderes caloríficos de biomasas. Fuente: CIEMAT. 10
2-4 Factor de corrección en función de la humedad. Fuente: CIEMAT 11
2-5 Imagen deposiciones en un quemador de biomasa. Fuente: E&M Combustión 12
3-1 Imagen de pellet. Fuente: La Ronda 15
3-2 Proceso de fabricación del pellet. Fuente: lamadera2014 17
3-3 Caldera pirotubular. 22
3-4 Caldera acuotubular. 22
3-5 Clasificación de calderas según la circulación del agua. Fuente: elaboración propia 23
3-6 Diferencia lecho fijo y lecho fluidizado 23
3-7 Clasificación de las calderas segun la forma de combustión. Fuente: elaboración propia. 24
4-1 Mecanismo de formación y deposicion sobre la superficie del intercambiador de calor [2] 26
4-2 Proceso de difusión. Fuente: [4] 27
4-3 Imagen de escáner microscópico de pellet sinterizado 1h. Fuente: [4] 28
4-4 Tabla deposición de fouling para el pellet de madera comercial 29
4-5 Tabla deposición de fouling para el pellet de tojo común 30
4-6 Tabla deposición de fouling para el pellet de tojo N1 30
4-7 Tabla deposición de fouling para el pellet de tojo N2 30
4-8 Tabla deposición de fouling para el pellet de tojo N3 30
5-1 Caldera modular de investigación. 31
5-2 Tolva con conducto hacia el tornillo sin fin. Con imagen de peso digital. 32
5-3 Tornillo sin fin alimentado por motor. 33
5-4 Módulo de combustión 33
5-5 Parrilla y cámara de combustión. 34
5-6 Entrada de aire primario. 34
5-7 Entrada de aire secundario e intercambiador de calor. 35

5-8 Caudalímetro aire (izq.) y caudalímetro agua de refrigeración (dcha.) 35

5-9 Esquema del circuito de refrigeración. 37

5-10 Sistema de llenado del circuito de refrigeración. 37

6-1 Cámara de alimentación llenada para realizar el ensayo. 40

6-2 Conmutador de alimentación 40

6-3 Sistema de programación del temporizador. 41

6-4 Tubo después de ensayo completo. Se puede ver el papel de aluminio sobre el que se van a extraer las muestras. 42

6-5 Se puede observar sobre el tubo la materia adherida y depositada. 42

7-1 Gráfica que muestra la estabilidad de la planta relacionando la Tª de entrada y salida del agua de la caldera y la Tª de los gases de expulsión. 46

7-2 Gráfica que muestra la masa depositada en g/m^{2}h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire. 47

7-3 Gráfica que muestra la masa adherida en g/m^{2}h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire. 47

7-4 Gráfica que muestra la masa total depositada en g/m^{2}h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire. 48

7-5 Gráfica que muestra la masa depositada en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min. 49

7-6 Gráfica que muestra la masa adherida en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min. 49

7-7 Gráfica que muestra la masa depositada en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min. 50

7-8 Gráfica que muestra la masa de slaggin en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min. 51

7-9 Gráfica que muestra la masa de ceniza en g/m^{2}h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire. 51

7-10 Gráfica que muestra la masa total de ceniza y slagging en g/m^{2}h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire. 52

7-11 Gráfica que muestra la masa de slagging en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min. 52

7-12 Gráfica que muestra la masa de ceniza recogida en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min. 53

7-13 Gráfica que muestra la masa total de ceniza y slagging en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min. 53

ÍNDICE DE TABLAS

3-1 Tabla resumen pellet. Fuente: autoria propia 16
3-2 Analítica pellet de tojo 18
3-3 Analítica pellet de tojo N1 19
3-4 Analítica pellet de tojo N2 20
3-5 Pellet de tojo N3 21
7-1 Tabla de diferencia de pesos tras paso por mufla 54

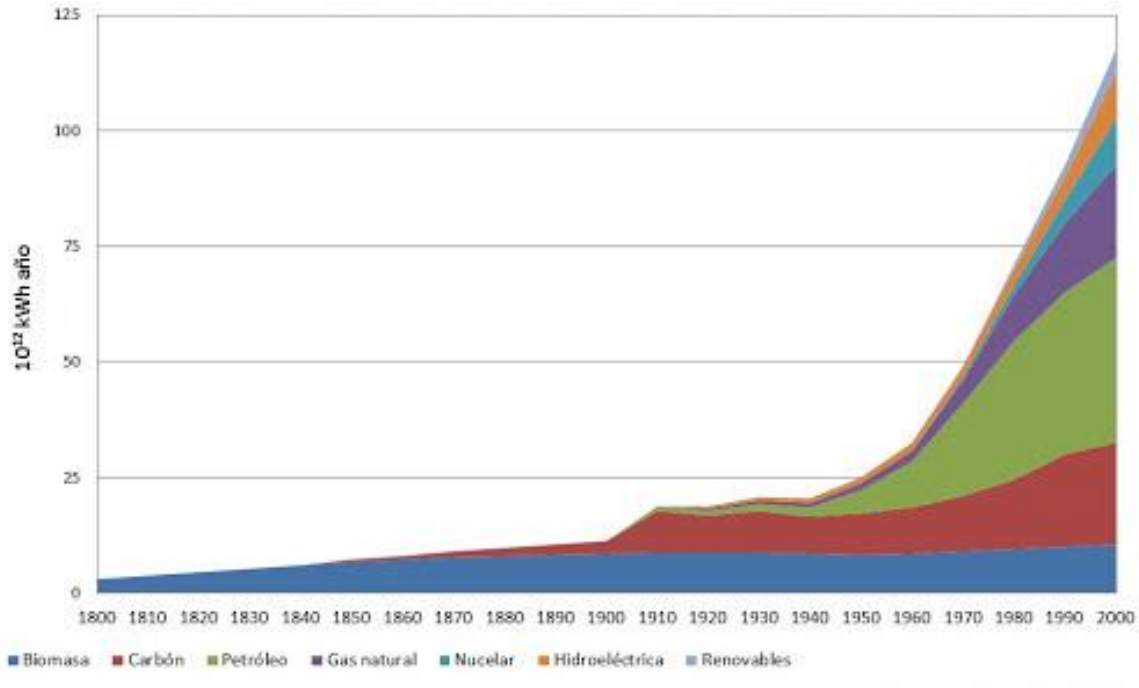
1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El modelo actual de consumo de energía no es sostenible a largo plazo. El escenario que se nos presenta en la actualidad debido a crisis tanto políticas (inestabilidad de los partidos), económicas (escasez de combustibles fósiles) y sociales (debido a la creciente sensibilización global con la contaminación) crean un marco en el que es necesario seguir desarrollando la eficiencia de fuentes de energía no renovables para, por un lado, contaminar menos, y por el otro, no depender de otro país energéticamente.

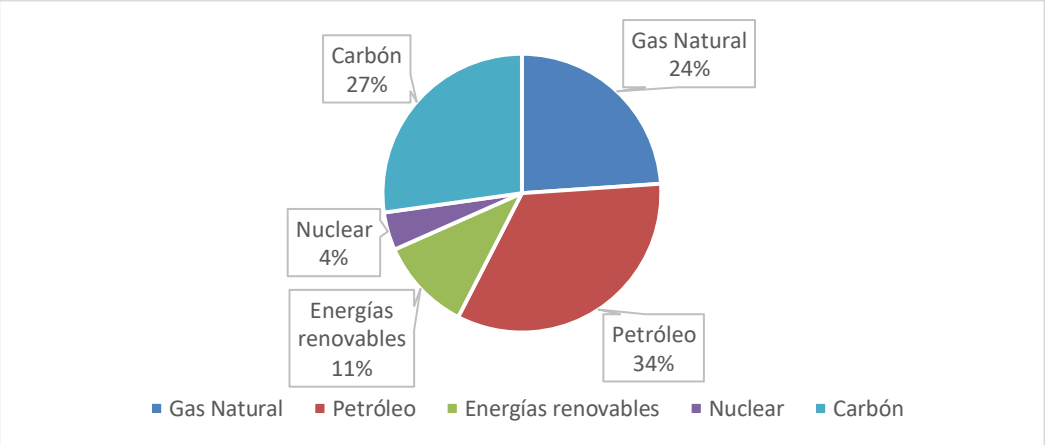
1.2 Situación energética global

El consumo energético mundial ha experimentado un crecimiento acelerado desde el inicio de la explotación de los recursos fósiles. Este crecimiento no ha sido lineal, ya que solo en la última década ha aumentado más de un 25%, y 40 años atrás era la mitad que actualmente. En 2015, el consumo mundial de energía primaria era de 57,0 kWh por persona y día.



1-1 Evolución del consumo de energía primaria mundial. Fuente: [1]

Toda esta energía está repartida en diferentes fuentes de obtención, entre las que destacan por su cantidad el petróleo, el gas natural y el carbón (entre las tres superan más del 80% de la energía mundial producida) (2). En el año 2018, el consumo de petróleo para obtener energía disminuyó un 0,5% y el carbón bajó un 0,4%. No obstante, el uso de gas natural ascendió un 0,5%.



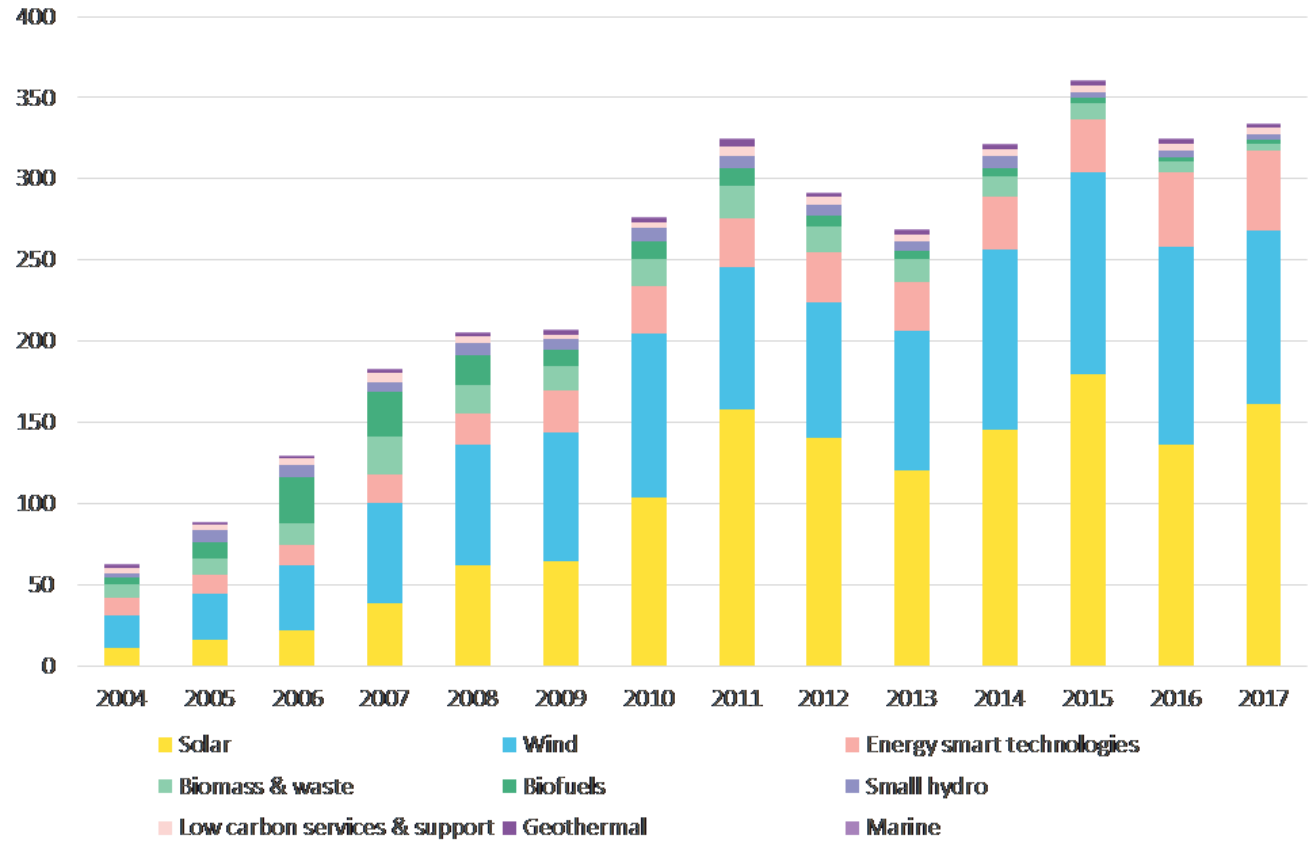
1-2 Consumo global de energía. Fuente: elaboración propia.

La inversión global en energías renovables y tecnologías inteligentes alcanzó los 333.500 millones en 2017, un 3% más que en 2016 y la segunda cifra anual más alta, tras el récord de 360.300 millones alcanzado en 2015, según un informe de la BNEF[1].

El informe de BNEF atribuye gran parte de este éxito a una fuerte inversión de las instalaciones solares fotovoltaicas en China, que hizo de 2017 un año récord para la inversión del país en energía limpia. El abaratamiento de la obtención de energía solar ha traído consigo un crecimiento de la inversión de varios países, entre los que destacan Australia (un 150% más, llegando a los 9.000 millones) y de México (un 516% más, alcanzando los 6.200 millones).
Europa en general invirtió 57.400 millones, un 26% menos que en 2016, aunque no en el caso español que, con las nuevas subastas de renovables registró un impulso del 36% hasta los 1.100 millones, que suponen el resurgir de un sector que estaba 'muerto' desde 2012.

Como se mencionó anteriormente, las inversiones solares lideraron el camino el año pasado, con un total de 160.800 millones, equivalentes al 48% del total mundial de todas las inversiones en energía limpia. La eólica fue el segundo mayor sector de inversión en 2017, con 107.200 millones. Aunque el informe dice que bajó un 12% sobre los niveles de 2016, hubo proyectos récord financiados tanto en tierra como en mar. El tercer sector, fueron las tecnologías energéticas inteligentes, donde destacan, entre otras, los activos de contadores inteligentes, almacenamiento en batería, redes inteligentes, eficiencia y almacenamiento. Este sector aumento un 7% respecto al año anterior, la subida más alta registrada. Como se puede observar en el gráfico, el resto de sectores quedaron un poco rezagados en comparación con los principales.

[1] Bloomberg New Energy Finance



1-3 Inversión por sectores en energías renovables- BNEF

A lo largo de las últimas décadas, la biomasa y sus derivados han mantenido una cuota del 10% del total, en buena parte debido al consumo de biomasa tradicional, única fuente de energía de que dispone una fracción importante de la población mundial. La energía hidráulica, con un 2,5%, es la que tiene un peso más importante entre el resto de fuentes de energía renovables, mientras que todas las demás alcanzan poco más del 1%. —La tendencia del consumo global continúa siendo creciente y sin cambios significativos en el peso de las diferentes fuentes, de forma que se sigue potenciando el cambio climático y agotando fuentes de energía no renovables.

En 2015 según la OCDE[2]más de la mitad de la electricidad generada a nivel global fue obtenida por quema de hidrocarburos.

Según este informe, el consumo energético en todos los países no es igual, ni tampoco su método para obtenerlo. A priori, según las cifras recopiladas en la última década, muestran que los países con menor poder adquisitivo representan índices de consumo de energía menores que los que tienen mayor poder. Sin embargo, los países que se encuentran en proceso de desarrollo, o los países que tienen concentración de industria (véase China o India), presentan unos índices de consumo de energía mayor, debido también al aumento de población que presentan.

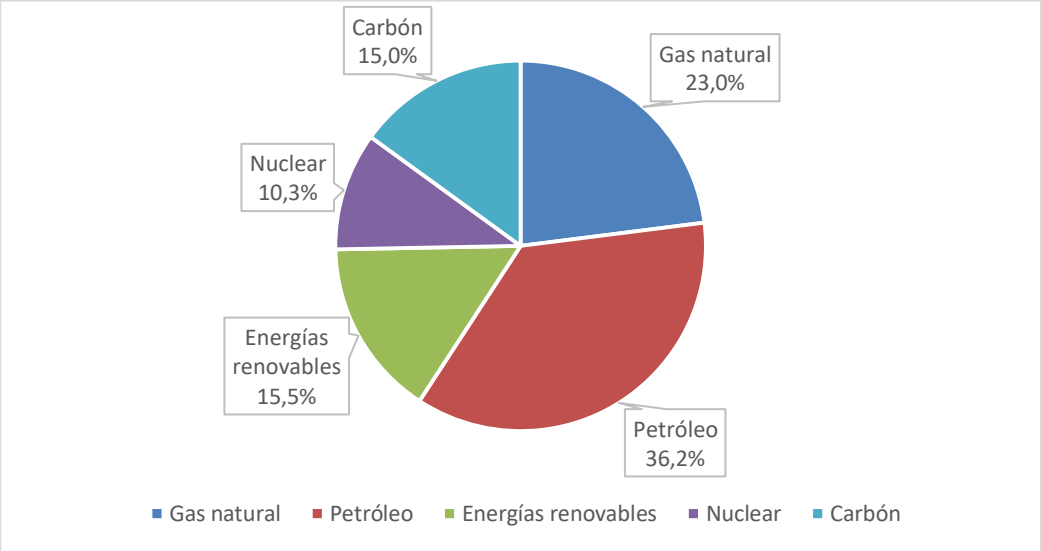
Recientes estudios muestran como la descarbonización del sistema energético es tanto técnica como económicamente viable. Con esta descarbonización, para el año 2050, se reducirían las emisiones en torno a un 85% con respecto a los máximos registrados en 1990. A largo plazo se prevé también que estas fuentes de energía sean menos costosas, y por lo tanto más rentables, a largo plazo. [2]

[2] Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico

1.3 Situación energética Europa

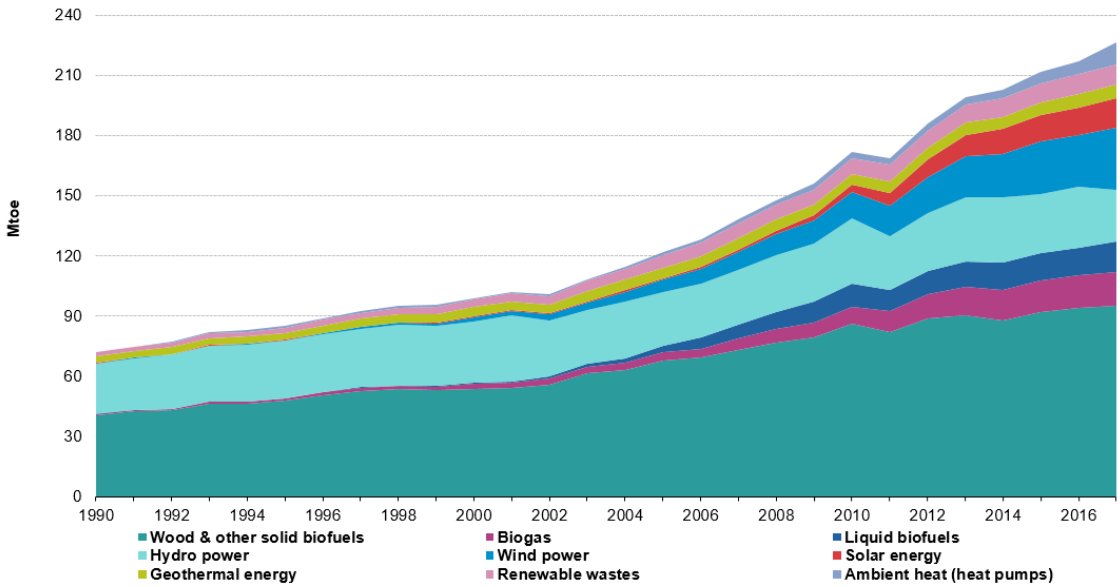
Las energías renovables representaron el 15,5% de la energía primaria consumida en la Unión Europea durante el año 2018, lo que supuso un aumento en su contribución del 7,8% respecto al año anterior. Al igual que en el resto del mundo, los combustibles fósiles ocuparon los primeros tres lugares en el consumo de energía primaria. [3]

Entre los tres hidrocarburos (gas natural, petróleo y carbón) se alcanza casi el 75% de la energía primaria consumida por la Unión Europea. Estas fuentes son todas importadas de otros países (la mayoría de países africanos y árabes) lo que hace que se mantenga la dependencia energética exterior muy alta, superior al 55%. La contribución de la energía nuclear es del 10,3%.



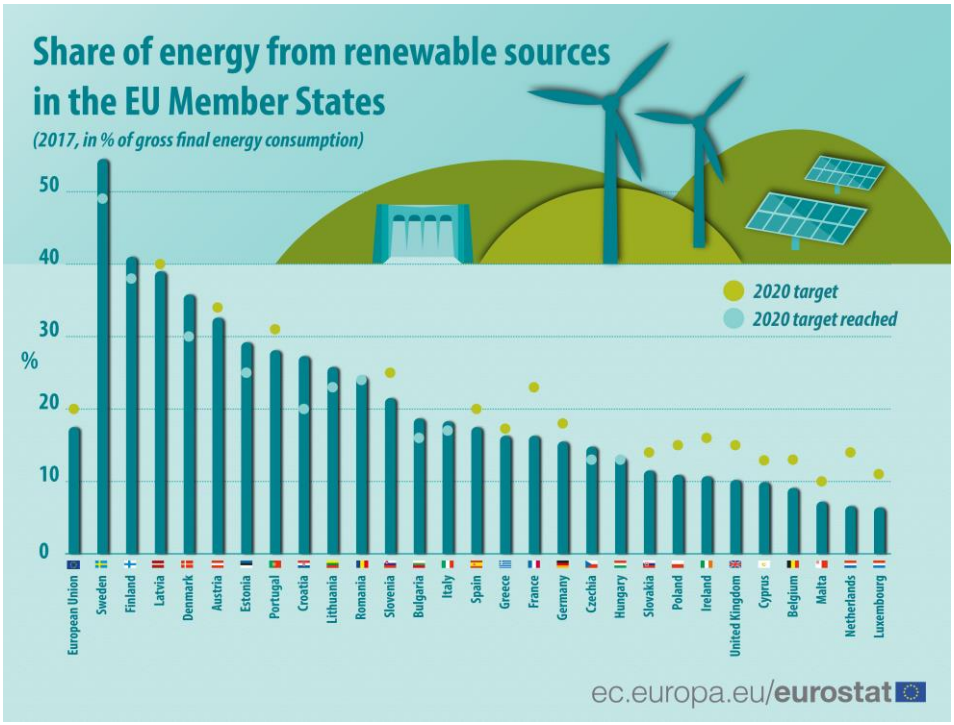
1-4 Consumo de energía primaria en Europa 2018- Autoría propia

En 2017, las fuentes de energía renovables representaron un 15,5 % del porcentaje de consumo interior bruto de energía de la EU-28. La madera y otros biocombustibles sólidos siguen siendo las fuentes que contribuyen en mayor medida a la combinación energética renovable. En 1990, la energía hidroeléctrica y la madera representaban el 91,3 %. Sin embargo, su porcentaje ha ido disminuyendo frente al aumento de energías como la eólica y la solar, que han experimentado un crecimiento enorme en los últimos años a nivel global, y consecuentemente en Europa.



1-5Consumo interior bruto de renovables, EU-28, 1990-2017

De aquí a 2020, la intención de la UE es lograr que el 20 % de su consumo final bruto de energía proceda de fuentes renovables; este objetivo se distribuye entre los Estados miembros de la UE con planes nacionales de acción diseñados para establecer una hoja de ruta para el desarrollo de las energías renovables en cada uno de los Estados miembros. En 2017 había 11 países de los 28 que ya había alcanzado el objetivo que se había marcado para 2020.

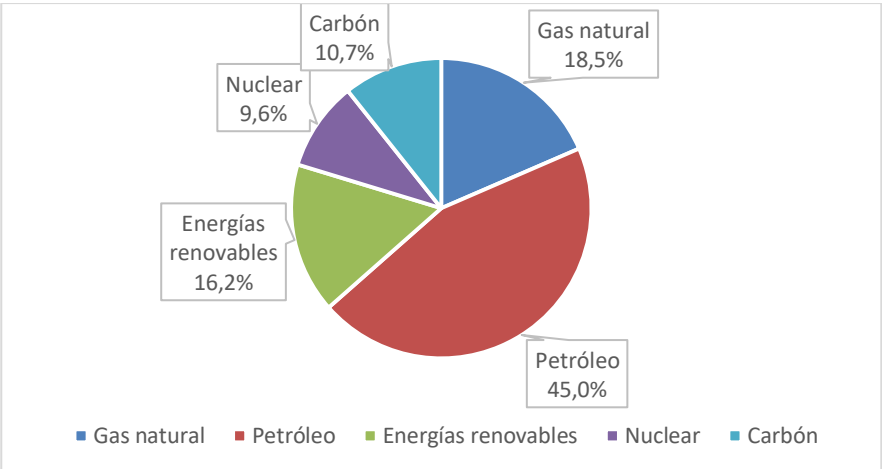


1-6 Porcentaje de energía procedente de fuentes renovables, 2017

1.4 Situación energética España

España prácticamente no dispone de reservas propias de combustibles fósiles ni de uranio. Únicamente cuenta con una muy pequeña cantidad de carbón de baja calidad, unas muy escasas reserves de uranio, y unas reservas de petróleo casi inapreciables.

El consumo de energía primaria de España en el año 2015 fue de 1.563 millones de MWh, lo que supone una media de 92,3 kWh por persona y día. Cerca de la mitad proviene del petróleo, y un 18,5%, del gas natural, que se importan ambos de forma íntegra. En tercera posición se sitúan las energías renovables, gracias al impulso efectivo que se les dio hace unos años, cuando España se llegó a convertir en referencia mundial. En 2015, representaron el 11,5% (sin contar la hidráulica). [4]



1-7 Consumo de energía primaria en España por fuentes, año 2015

Según datos ofrecidos por la REE[3] se prevén instalar campos fotovoltaicos y eólicos con capacidad de 87.000 MW. Para hacernos una idea, la totalidad de potencia que generan todas las centrales eléctricas en España ronda los 100.000MW. La motivación de estos parques energéticos se debe al nuevo mecanismo de financiación para proyectos a largo plazo, que consiste en un acuerdo de compraventa de electricidad entre un generador y un comprador a largo plazo. Mediante estos acuerdos se consigue que las energías renovables cada vez tengan un precio más competitivo con respecto a las energías tradicionales.

España se ha puesto como objetivo que para 2050 toda su energía provenga de energías renovables y sus emisiones de gases contaminantes de efecto invernadero se reduzcan hasta cero. Para ello se ha fijado varios objetivos temporales que se plasma en la Directiva 2012/27/UE. En él se van fijando la reducción progresiva de las emisiones de gases de efecto invernadero y el aumento del porcentaje de energías renovables utilizadas. Para llevar a cabo este plan, la biomasa va a cobrar una mayor importancia, mejorando las infraestructuras con grandes inversiones para: ampliar y mejorar el rendimiento energético de la biomasa forestal, asegurar que la biomasa utilizada proceda de fuentes renovables, mejorar las tecnologías empleadas, aplicar e integrar instalaciones de biomasa en edificios de la administración y comprometerse al cumplimiento de las disposiciones legales y acuerdos relativos a esta materia.

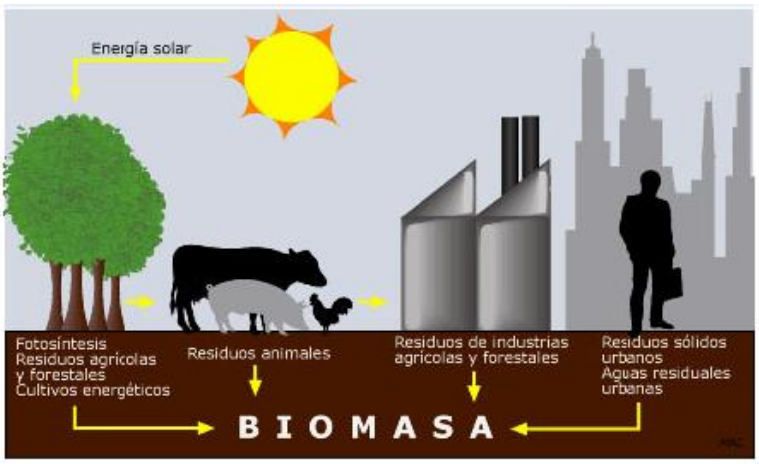
Según el CIEMAT[4], a partir del 2% del terreno cubierto por matorral (375 000 ha), podrían ser cosechadas de forma sostenible anualmente unas 3,75 millones de toneladas de biomasa. Esto podría sustituir más de 1,5 millones de toneladas de combustibles fósiles al año, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero además de tener un impacto económico positivo. [5]

[3] Red Eléctrica Española

[4] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.

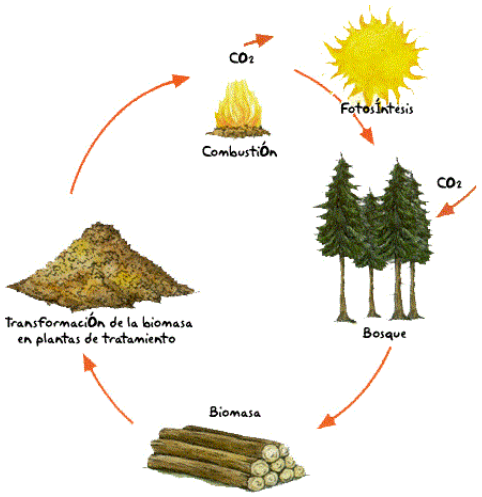
2 BIOMASA

En este apartado se va a hacer una introducción de la biomasa (particularizando en el pellet), ver una clasificación, capacidad energética, ventajas e inconvenientes y métodos de procesado.



Según la Directiva 2009/28/CE en la que se regula y fomenta el uso de energía procedente de fuentes renovables, se define biomasa como "la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales" [5] En este documento se resalta la importancia de la biomasa para un futuro energético limpio, y se insta a los Gobiernos a fomentar el desarrollo de esta energía limpia fomentando también la producción de biomasa de manera sostenible.

El ciclo cerrado de CO_2 y energía en la biomasa viene explicado por: las plantas transforman la energía que radia el sol en energía química mediante la fotosíntesis, en este proceso las plantas absorben CO_2 de la atmósfera. Parte de esa energía química queda almacenada en la planta en forma de materia orgánica. Al quemar esa planta (o transformarla en algún combustible que se quemará posteriormente) se recupera esa energía y se expulsa el CO_2 de vuelta a la atmósfera. La diferencia entre la quema de un combustible conseguido mediante biomasa y un combustible fósil, es que el CO_2 que se desprende en el combustible de la biomasa, forma parte de la composición actual de la atmósfera, y el del combustible fósil es CO_2 "almacenado" en el pasado. Por lo que se considera un ciclo neutro de CO_2.



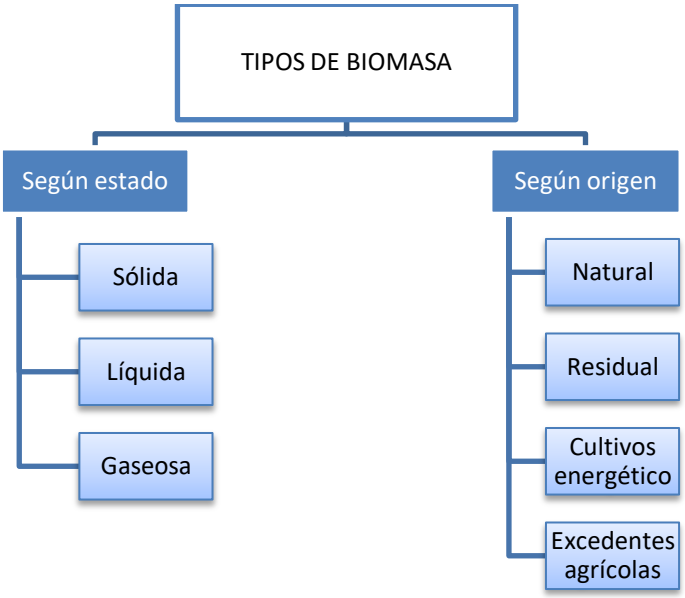
2-1 Ciclo del CO_2. Fuente: IMARTE, Biomass Energy Evolution

La biomasa de la madera, residuos agrícolas y estiércol continúan siendo una fuente principal de energía en países poco industrializados. Y cada vez en más países desarrollados en los sectores de calefacción y transporte.

Una de las líneas de investigación más prometedoras en el campo de la biomasa es que se están utilizando los restos de excedentes agrícolas y la biomasa residual, que hasta ahora eran desperdiciados, como podas, restos agrícolas, restos de limpiezas del monte, etc. Estos restos pueden ser utilizados como combustible o se pueden tratar para obtener combustibles con mejores capacidades energéticas.

2.1 Clasificación Biomasa

Se puede hacer una clasificación de la biomasa según su origen, composición o según su estado:



2-2 Clasificación de biomasa. Fuente: Elaboración propia

2.1.1 Según su estado

2.1.1.1 Biomasa sólida

Este tipo de biomasa es el más común y en él está incluido el pellet que vamos a utilizar en nuestros experimentos. En este apartado se engloba la madera obtenida de tratamientos forestales, residuos de la industria que trabajan con biomasa (fábricas de papel, carpinterías…), residuos obtenidos de limpieza de parques, jardines y montes, así como de las podas, subproductos de naturaleza agrícola, como la paja, residuos agroindustriales, como el orujo, serrín, huesos de aceitunas… y la FORSU[5].

2.1.1.2 Biomasa líquida

En este grupo se engloban los residuos industriales biodegradables, los residuos ganaderos, aceites y biocarburantes (bioetanol y biodiesel) y las aguas residuales urbanas.

2.1.1.3 Biomasa gaseosa

A partir de residuos agroalimenticios, vertederos, animales y escombreras a través de diversos procesos termoquímicos o microbiológicos se obtiene metano o biogás.

2.1.2 Según su origen

2.1.2.1 Biomasa natural

Es la que se produce en ecosistemas naturales. Hay que buscar un equilibrio de la explotación de este recurso, ya que hacerlo de manera intensiva, no es compatible con la protección del medio ambiente.

La biomasa natural no necesita la intervención del hombre para generarse ni potenciarse. Se trata de residuos forestales derivados de limpiezas de bosques, restos de plantaciones, leñas, ramas…

2.1.2.2 Biomasa residual

En esta hay intervención del ser humano, ya que procede de residuos generados por el desarrollo de diferentes actividades y de los vertidos denominados biodegradables. Son residuos que generalmente son considerados como desechos como pueden ser residuos de industrias agrícolas o forestales (producción de aceite, industria vinícola, serrín…), residuos agroindustriales (industrias lácteas, papeleras…), residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería (pajas de cereales, excedentes agrícolas…) y aceites alimentarios usados entre otros.

Este es el tipo de biomasa que más ventajas aporta a la hora de utilizarlo como combustible, ya que no se daña el medio natural, los costes de producción y transporte son bajos y, además, se generan puestos de trabajo gracias a esta actividad.

2.1.2.3 Biomasa de cultivos energéticos

Son aquellos cultivos con fines no alimentarios destinados a la producción de energía. Los cultivos agro-energéticos son seleccionados en base a la producción de cantidad de biomasa y la resistencia de los cultivos y no se le da mucha importancia a la calidad. Esto hace que los cultivos rara vez se pierdan y garantiza un precio final más bajo para la biomasa.

2.1.2.4 Biomasa de excedentes agrícolas

Son los excedentes del sector agrícola que no pueden aprovecharse para alimentación. Pueden ser tratados químicamente para producir biocombustible o utilizarse por sí solos como combustible.

[5] Fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.

2.2 Características energéticas de la biomasa

No se puede hablar en términos generales de la capacidad energética de la biomasa, ya que como hemos visto hasta ahora hay muchos tipos distintos de biomasa y cada uno tiene un poder calorífico determinado además de depender también de la humedad.

El contenido calórico por unidad de masa es la energía que se libera en forma de calor cuando el combustible se quema completamente. El poder calorífico superior (PCS) es aquel calor que se produce en la reacción de combustión, mientras que el poder calorífico inferior (PCI) es el que realmente se aprovecha. Es decir, el PCS es la cantidad total de calor desprendido en la combustión, cuando el vapor de agua está condensado y, por lo tanto, se tiene en cuenta el calor desprendido en este cambio de fase. Y el PCI es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa sin contar la fracción que corresponde al calor latente del vapor de agua generado en la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor.

Para calcular el poder calorífico que tiene un tipo determinado tipo de biomasa, lo podemos calcular con el poder calorífico superior (PCS) al 0% de humedad. Estos valores nos los proporciona el CIEMAT en diferentes provincias. Con este dato calcularemos el valor del poder calorífico inferior (PCI) a una humedad determinada:

$$PCI\ (h\%)=[(PCS0*1000*(1-x)-11{,}27*x\%-1.322)/1000]$$

Los resultados se presentan en tep/t[6] por lo que tendremos que transformar el valor obtenido anteriormente con la fórmula:

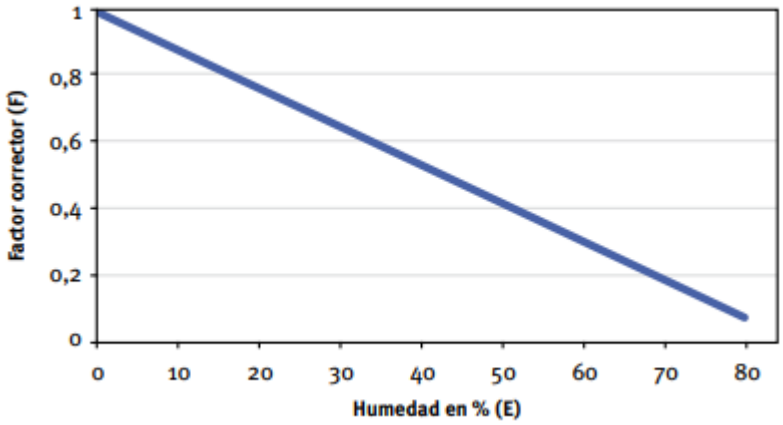
$$tep/t= PCI\ (h\%)*0.0239$$

El CIEMAT también proporciona tablas con el PCI para otros porcentajes de humedad, con otra tabla donde obtener el factor de corrección aproximado según la humedad.

Productos		Humedad (%)	PCI (kcal/kg)	Humedad (%)	PCI (kcal/kg)
Leñas y ramas	Coníferas	20	3.590	40	2.550
	Frondosas		3.310		2.340
Serrines y virutas	Coníferas	15	3.790	35	2.760
	Frondosas autóctonas		3.580		2.600
	Frondosas tropicales		3.780		2.760
Cortezas	Coníferas	20	3.650	40	2.650
	Frondosas		3.370		2.380
Vid	Sarmientos	20	3.280	40	2.310
	Ramilla de uva	25	2.950	50	1.770
	Orujo de uva	25	3.240	50	1.960
Aceite	Hueso	15	3.860	35	2.810
	Orujillo		3.780		2.760
Cáscara frutos secos	Almendra	10	3.940	15	3.690
	Avellana		3.710		3.470
	Piñón		4.090		3.830
Cacahuete		10	3.480	15	3.260
Paja de cereales		10	3.630	20	3.160
Cascarilla de arroz		10	3.370		
Girasol	Residuo del campo	10	3.310	15	3.090
Papel	Cartón, papel vario	5	3.780	10	3.630
	RSU frac. Plást.-pap.		4.480		4.210

2-3 Poderes caloríficos de biomasas. Fuente: CIEMAT.

[6] Toneladas equivalentes de petróleo por tonelada de biomasa verde (h%)



2-4 Factor de corrección en función de la humedad. Fuente: CIEMAT

2.2.1 Influencia del tamaño y forma

Son dos aspectos a tener en cuenta, ya que después de la humedad, son las dos características que más afectan al poder calorífico del combustible. Dependiendo de la forma y el tamaño del combustible, este se quemará de la manera más eficiente o por lo contrario no tendrá un buen rendimiento. Y cuando esto ocurre se produce un aumento de CO en la combustión y de combustible inquemado. Se puede calcular la velocidad de la combustión relacionada con estos factores de la siguiente manera:

$$v = \frac{\frac{V}{S}}{Vol.\,t}$$

Siendo la v la velocidad de carbonización, la V el volumen de la partícula (mm^3), la S la superficie de la partícula (mm^2), el Vol el contenido volátil en base seca y t la duración del experimento en s.

2.2.2 Influencia de la densidad

La importancia de la densidad del combustible se puede estudiar desde distintas perspectivas. En primer lugar, un combustible muy denso, como el pellet, aporta la ventaja de que resulta más barato el transporte y el almacenaje.

En términos energéticos observando estas fórmulas resulta claro que a mayor densidad, se obtiene una mayor energía, dejando fijas las otras variables.

Energía = Masa x Poder calorífico

Masa = Volumen x Densidad

Para calcular el poder energético de un combustible se debe tener en cuenta el peso en seco.

2.2.3 Influencia de las cenizas

Uno de los principales inconvenientes en la quema de biomasa es la generación de cenizas que se acumulan en el quemador durante el transcurso de la combustión. Esta cantidad de ceniza se puede regular con las proporciones de combustible/aire que metemos en nuestro quemador ya que, aunque es inevitable que se produzca ceniza en la combustión de la biomasa, uno de los factores que hace que aumente la cantidad de ceniza es que se produzca una combustión incompleta. Así pues, la acumulación de ceniza en el quemador trae consigo un aumento en la producción de ceniza, debido al arrastre hacia las chimeneas. Como el punto de fusión de las cenizas es bajo, estas se solidifican perjudicando a la entrada de combustible y a la salida de gases de escape, aquí es donde intervienen los aditivos, ya que el calcio y el silicio (entre otros) aumentan los puntos de fusión de los residuos. [6]

Dentro de los residuos que quedan de la combustión, se pueden diferenciar las cenizas (color grisáceo) y los inquemados (color negro).

2-5 Imagen deposiciones en un quemador de biomasa. Fuente: E&M Combustión

2.3 Métodos de procesado y de aprovechamiento de la biomasa

Según dato de la AVEBIOM[7], la biomasa es la energía limpia con más previsión para el futuro entre todas las energías renovables en la Unión Europea. Este futuro crecimiento se debe a sus ventajas medioambientales y a la eficiencia de la energía obtenida con el aprovechamiento energético de residuos.

Antes de que el combustible esté listo para el uso, la biomasa puede precisar de un tratamiento, según esto se clasifican:

- Uso directo: la fuente primaria solo sufre transformaciones físicas, como hacer ralladura, ejercer presión… ejemplos de este tipo son la madera y la paja.

- Fermentación alcohólica: si partimos de una materia prima seca, es necesario primero producir un mosto azucarado. Tras esto, se realiza una fermentación anaeróbica liderada por levaduras en las que se obtiene una mezcla de alcohol y agua con emisión de dióxido de carbono a partir del mosto con azúcares. Mediante la destilación, se elimina el agua y obtenemos el etanol.
- Descomposición anaeróbica: se genera en ausencia de oxígeno. Se consigue la degradación de la materia orgánica gracias a unos microorganismos que generan un gas de gran contenido energético (biogás) y en una especie de abono para suelos que posee componentes minerales. El biogás producido es una composición de metano y anhídrido carbónico que puede generar energía eléctrica o térmica o producir ambas mediante la cogeneración.
  Un ejemplo de este proceso se puede observar en la fórmula de la fermentación anaeróbica para transformarse en etanol y dióxido de carbono:
  $$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$$
- Transformación de ácidos grasos: aceites vegetales y grasas animales mediante un proceso de esterificación, eliminación de agua, transesterificación y destilación con metanol, al final se obtiene una mezcla de hidrocarburos similar al diésel.

El resultado de estos procesos es energía, y esta energía puede utilizarse de diferentes formas:

- Producción de energía térmica: se utilizan para dar calor. Su uso va desde la cocina, hasta para generar vapor para la industria y generar electricidad.
- Producción de biogás: su principal finalidad es conseguir combustible para aplicaciones térmicas para el sector ganadero o agrícola.

[7] Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa

- Producción de biocombustibles: para el transporte. Puede ser bioetanol (sustitutivo de la gasolina) producido a partir de cultivos como el cereal, maíz o remolacha, o biodiesel (sustitutivo del gasoil).
- Producción de energía eléctrica: por combustión o gasificación y se pueden obtener potencias de hasta 50MW.

2.4 Ventajas e inconvenientes de la biomasa

2.4.1 Ventajas

- Como ya se ha mencionado anteriormente, la primera ventaja que presenta en la biomasa se encuentra en que se trata de una fuente de energía con un ciclo de dióxido de carbono neutro. Por lo que es una energía limpia.
- Se consigue una reducción de nitratos y fosfatos comparado con los combustibles fósiles, así como de CO siempre que se produzca una combustión correcta.
- Comparado con otros combustibles tiene un coste menor, y en ocasiones este coste es nulo, ya que se utilizan residuos que si no serían desechados como basura.
- Se puede combinar con otros combustibles biomásicos e incluso con combustibles fósiles. Es decir, se trata de una fuente de energía muy diversa con posibilidad de hibridación.
- Evita la erosión del suelo en tierras abandonadas, así como la degradación.
- A nivel socioeconómico, gracias a este tipo de energías disminuye la dependencia externa energética.
- Da nuevas oportunidades al sector agrícola y aumentar económicamente el entorno rural.

2.4.2 Desventajas

Si bien se han nombrado numerosas ventajas del uso de biomasa como combustible, también tiene algunas desventajas que se nombrarán ahora:

- Poseen menor rendimiento energético que los combustibles tradicionales. Las calderas aún no están desarrolladas, por lo que se pueden optimizar aún más.
- Necesidad de acondicionar o transformar para su utilización.
- Logísticamente hablando, es más cara que otros combustibles, tanto por el transporte, como por el almacenamiento.

3 COMBUSTIÓN DE BIOMASA

3.1 El combustible

Dentro de los biocombustibles catalogados como biomasa sólida se encuentra el pellet de madera. Está formado por pequeños cilindros de serrín natural comprimidos a alta presión.

3-1 Imagen de pellet. Fuente: La Ronda

El pellet está normalizado según la ISO 17225-3 de 2014e está normalizado, es decir tiene unas características definidas y por eso se puede comparar con otros combustibles. La tabla con sus características es la siguiente:

Poder calorífico	4,8 kWk/kg = 4180 kcal/kg		
Densidad	680-720 kg/m^3		
Humedad	<10%		
Tamaño	6mm<L<40mm D = 6 ± 1		
Calidad	A1	A2	A3

3-1 Características pellet normalizado

El pellet normalizado está compuesto 100% por madera sin tratar (desechos de madera como serrín, astillas, virutas…) sin aglomerantes, ya que se mantiene unido después de ser sometido a altas presiones por la lignina, un componente interno natural de la madera.

Viendo su poder calorífico se puede observar que en torno a 2,2 kilos de pellet equivalen energéticamente a un litro de gasóleo (en torno a 10.000 kcal).

Para saber si es de buena calidad un pellet, se tienen en cuenta varias características:

- Brillo: debe de ser brillante, con una longitud uniforme, sin polvo y una superficie lisa acabada en rotos.
- Color: debe de tener un color uniforme. Si posee colores extraños es debido a que contiene aditivos como papel, tierra o colas.
- Estructura: debe de ser compacta, sin grietas ni cortes, ni debe desmoronarse al tocarlo.
- Densidad: para saber si un pellet es de buena calidad, debemos sumergirlo en agua y este debe de hundirse. Además, si pasados cinco minutos sigue hundido y de forma compacta, significa que posee aglutinantes o colas artificiales.

ENplus es la marca que certifica el pellet en base a la normativa ISO 17225-2 aprobada por la Unión Europea en 2011. En esta certificación se controla todo el sistema productivo, desde la elección de la materia prima para producir el pellet, almacenaje del pellet ya hecho y la entrega al consumidor final.

El método de análisis se basa en las siguientes características: humedad, ceniza, dimensiones, fuente, aditivos, potencia calorífica y polvo.

Según esta norma hay tres categorías de calidad de pellets:

- A1: formada por los pellets de mayor calidad. Son los que poseen un mayor rendimiento. Proceden de maderas vírgenes y naturales sin tratar químicamente a la que se le ha quitado la corteza y su contenido en cenizas, Cl_2 y N_2 es muy bajo. Es la óptima para utilizar en calderas de hogares, ya que produce menos del 1% de residuos y cuida la instalación, alargando la vida de la caldera.
- A2: son pellets que proceden de desperdicios de serrerías, carpinterías, restos de poda… por lo que no son maderas tan puras y dejan más residuos, tanto cenizas como elementos químicos. Además, contienen humedades un poco más altas que los A1.
- B: en esta clase se permite utilizar maderas recicladas y residuos industriales, por lo que pueden contener restos de pinturas o barnices. Si bien, están marcados muy estrictos los límites de metales pesados y quedan excluidas las maderas que hayan sido tratadas químicamente. Por todas estas razones, el contenido en cenizas, cloro y nitrógeno son mayores.

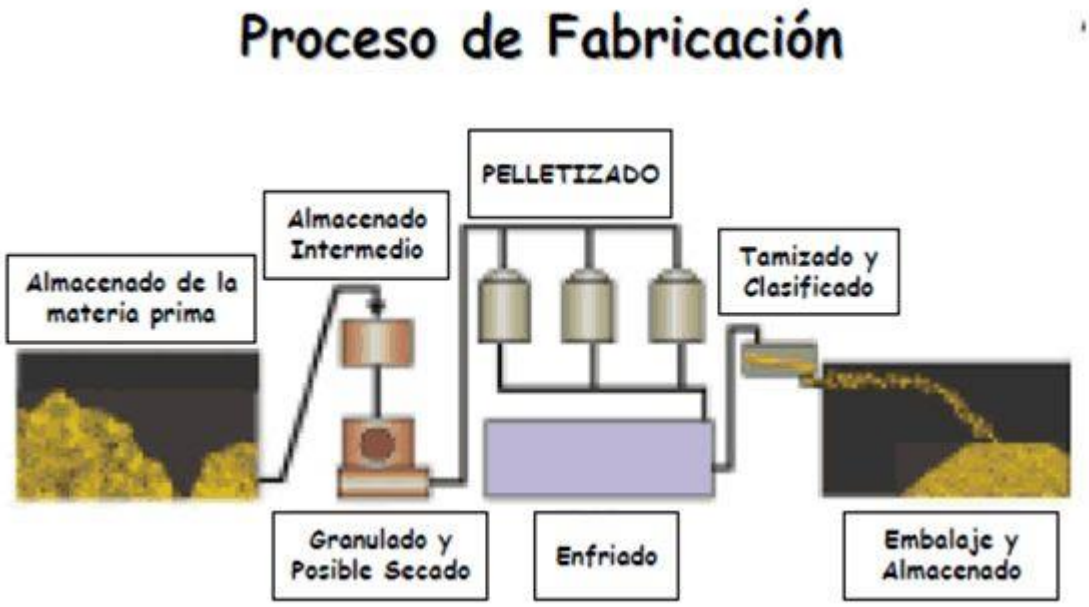
	VENTAJAS	INCONVENIENTES	CONSIDERACIONES
PELLET	Elevado poder calorífico. Muy bajo contenido en cenizas, reduciendo las necesidades de operación y mantenimiento. Las calderas de pellets son de alta eficiencia. Se comercia a nivel internacional con características estandarizadas	Elevado precio en comparación con otras biomasas.	Precisa de almacenamiento en lugar seco. No necesita ningún tipo de tratamiento una vez producido. Alta fiabilidad de operación y menor esfuerzo para la operación y mantenimiento de la caldera.

3-2 Tabla resumen pellet. Fuente: autoría propia

3.1.1 Fabricación del pellet

Como se ha citado anteriormente, el pellet se hace a base de serrín, virutas o residuos de madera sin ningún tratamiento químico. Su fabricación se basa en un proceso industrial con varias etapas:

- Lo primero que se debe que hacer antes de todo el proceso es reducir la humedad de la madera al % de humedad que rige la normativa (menos de un 10%). Es una etapa imprescindible, ya que como se ha visto antes, la humedad es uno de los principales factores a tener en cuenta en los pellets. Se hará a temperatura baja para asegurarse de que no se queme el material. Cuanto más seco quede, mayor será la energía que desprenda luego.
- En segundo lugar, hay que reducir el tamaño de la materia prima, cortar las ramas, paja, cáscaras… En este cortado, la materia prima ha de quedar del tamaño aproximadamente del serrín (<2mm) [7]. Es importante que el tamaño quede estable, ya que ayudará a que quede más compacto después del prensado.
- Posteriormente, han de mezclarse las diferentes materias primas con agua para proseguir a la compactación. Tras esto comienza el proceso de prensado. Se hará a alta presión y temperatura para conseguir una compactación de calidad. Ese aumento de temperatura hará que la lignina actúe como conglomerante plastificándose. Cuanto más fuerte y denso quede el pellet, mayor será su calidad. Al salir de la extrusionadora, unas cuchillas lo cortaran del tamaño requerido por las especificaciones.
- Para aumentar la dureza y resistencia, el pellet ya formado pasará por una etapa de enfriamiento controlado, formado por una cámara vertical con ventiladores que generan un flujo de aire continuo.
- Finalizando con el proceso, hay que eliminar los residuos que puedan dañar nuestra caldera o producir humo o ceniza con una eficiencia baja. También hay que separar los pellets según su calidad como vimos en el anterior apartado.
- Por último, se empaquetará para su mejor distribución y almacenamiento, así como asegurarse de que no gane humedad.



3-2 Proceso de fabricación del pellet. Fuente: lamadera2014

3.1.2 Combustible utilizado en este proyecto

Para el presente proyecto se han utilizado varios tipos de pellet para estudiar la influencia de aditivos en el pellet de tojo, empleando como parámetro de referencia la conformación de deposiciones. Posteriormente estos resultados se comparan con el pellet de comercial, dado como pellet comercial estándar.

Disponemos de cuatro tipos de pellets de tojo: pellet de tojo común; N1, al cual se le ha aplicado un tamizado para la retirada de finos, N2, que contiene un 2% de caolín, y N3, con un 2% en $CaCO_3$

Análisis inmediato [%]	
Humedad	9.801
Volátiles	72.249
Carbono fijo	16.107
Cenizas	1.843
Análisis elemental [%]	
N	1.073
C	49.513
H	6.100
O	43.314
S	-
Parámetros varios	
PCI [kJ/kg] (e)	17162.6
PCS [kJ/kg] (e)	18485.0
Durabilidad [%]	99.2
Densidad partículas [kg/m^3]	1.0
Densidad a granel [kg/m^3]	504.6
Fusibilidad (T<1000°C)	WS (sinterizado débil)
Fusibilidad (1000 °C < T < 1100 °C)	HS (sinterizado fuerte)
Fusibilidad (1100 °C < T < 1150 °C)	MELT (sinterizado fundido)

3-3 Analítica pellet de tojo

Análisis inmediato [%]	
Humedad	8.85
Volátiles	80.163
Carbono fijo	17.735
Cenizas	2.102
Análisis elemental [%]	
N	1.200
C	48.977
H	6.620
O	43.203
S	-
Parámetros varios	
PCI [kJ/kg] (e)	18508.8
PCS [kJ/kg] (e)	19831.3
Durabilidad [%]	90.9
Densidad partículas [kg/m^3]	1.2
Densidad a granel [kg/m^3]	553.9
Fusibilidad (T<1000°C)	WS
Fusibilidad (1000 °C < T < 1100 °C)	HS
Fusibilidad (1100 °C < T < 1150 °C)	MELT

3-4 Analítica pellet de tojo N1

Análisis inmediato [%]	
Humedad	7.155
Volátiles	78.714
Carbono fijo	17.319
Cenizas	3.967
Análisis elemental [%]	
N	1.197
C	48.110
H	6.471
O	44.220
S	-
Parámetros varios	
PCI [kJ/kg] (e)	18122.0
PCS [kJ/kg] (e)	19444.5
Durabilidad [%]	90.9
Densidad partículas [kg/m^3]	1.2
Densidad a granel [kg/m^3]	568.1
Fusibilidad (T<1000°C)	No
Fusibilidad (1000 °C < T < 1100 °C)	WS
Fusibilidad (1100 °C < T < 1150 °C)	MELT

3-5 Analítica pellet de tojo N2

Análisis inmediato [%]	
Humedad	7.418
Volátiles	78.509
Carbono fijo	17.237
Cenizas	4.254
Análisis elemental [%]	
N	1.373
C	48.477
H	6.483
O	43.667
S	-
Parámetros varios	
PCI [kJ/kg] (e)	18113.7
PCS [kJ/kg] (e)	19436.1
Durabilidad [%]	85.8
Densidad partículas [kg/m^3]	1.2
Densidad a granel [kg/m^3]	528.8
Fusibilidad (T<1000°C)	WS
Fusibilidad (1000 °C < T < 1100 °C)	WS
Fusibilidad (1100 °C < T < 1150 °C)	HS

3-6 Pellet de tojo N3

Se puede observar que tanto los pellets con aditivos como el pellet sin finos tienen una humedad menor que el pellet de tojo común, lo que repercute en un poder calorífico mayor como se puede observar en las columnas de PCI y PCS. Se puede ver que los cuatro tipos de pellet utilizados cumplen con la normativa de humedad (<10%).

Respecto a las cenizas se observa que como es usual, los valores son más altos que en otros combustibles y oscilan entre el 2-5%, teniendo el mayor porcentaje el tojo N3 (4.254%) y el menor el de tojo normal, por debajo del 2% (1.843%), se verá que esto luego tiene repercusión a la hora de generar slagging y fouling. [8]

Los materiales volátiles están en gran concentración, es una de las características de la biomasa, uno de los factores que favorece su combustión. Debido a la alta concentración de volátiles, las calderas de biomasa poseen una entrada superior de aire secundario para completar la reacción de combustión y mejorar la eficiencia y los niveles de emisiones.

Acerca de la densidad ya hemos visto cómo afecta anteriormente (2.2.2).

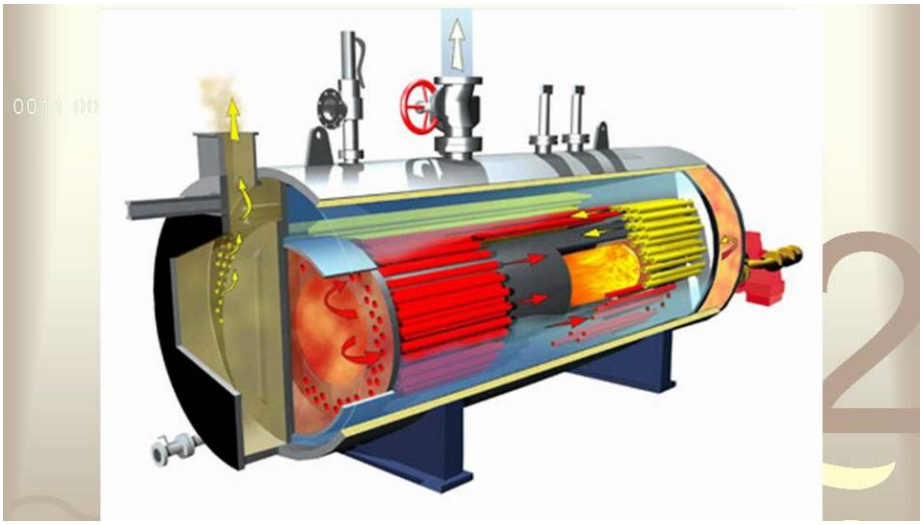
El sinterizado es el proceso a través del cual el enlace entre partículas se hace más fuerte, y se debe a un aumento de temperaturas durante un espacio de tiempo prolongado. Cuando la temperatura es muy

alta, hay material que se funde y rellena los poros de la masa existente en el depósito. Este proceso tiene una gran importancia en las calderas de biomasa debido a que los sinterizados se solidifican y acumulan perjudicando al correcto funcionamiento de la caldera. En ocasiones cuando hay mucha masa fundida en la ceniza, esta se pega al enfriarse obstaculizando la entrada y salida de la caldera.

3.2 Tipos de calderas

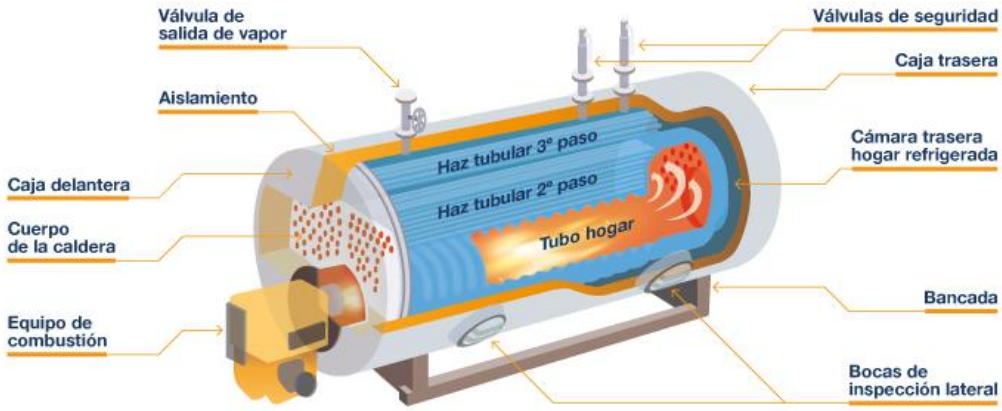
Una caldera es un equipo que consta de diferentes elementos destinados a la producción de vapor de agua aplicando calor en el agua líquida. Según su principio de funcionamiento se clasifican en:

- Pirotubulares: son las calderas en las que los humos de la combustión circulan por el interior de los tubos y el agua por el exterior. Fueron las primeras calderas industriales. Según EN12953, actualmente se utilizan para presiones de hasta 30 bares, temperaturas de 300ºC del vapor sobrecalentado y una producción de hasta 55t/h de vapor.

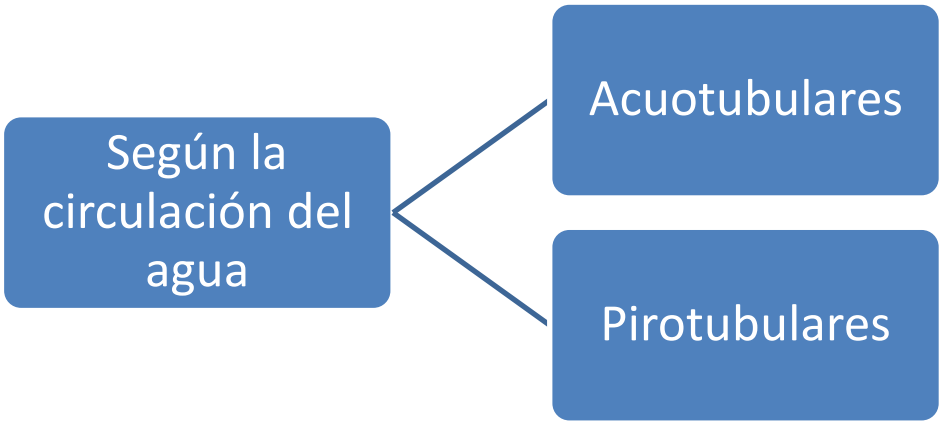


3-3 Caldera pirotubular.

- Acuotubulares: son las calderas en las que el agua circula por el interior de los tubos y los humos de combustión por el exterior. Su ventaja es que permite la incorporación de sobrecalentadores, lo que mejora el rendimiento y que trabaja a altas presiones. La caldera utilizada en el proyecto es de este tipo.



3-4 Caldera acuotubular.

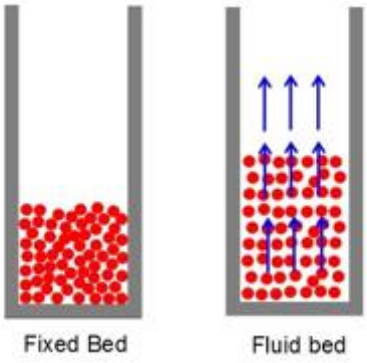


3-5 Clasificación de calderas según la circulación del agua. Fuente: elaboración propia

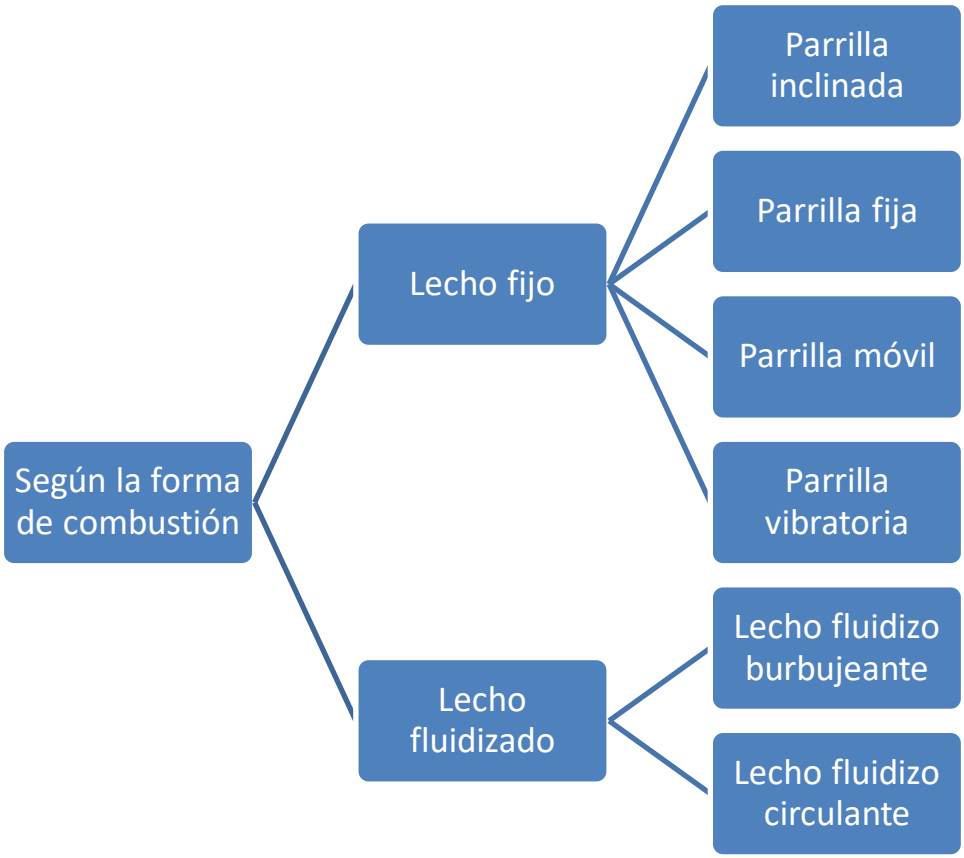
3.3 Tipos de Lecho

- Calderas de lecho fijo o parrilla: la combustión ocurre en una parrilla (puede ser fija o móvil), mediante la entrada de aire por un conducto primario, por la parte inferior de la parrilla, y mejorando la eficiencia con la entrada de aire por un conducto secundario, normalmente en la parte superior. La combustión en estas calderas comienza con la reducción de humedad en la parrilla, donde se quema la biomasa sólida. Por encima de la parrilla en la entrada de aire secundaria se queman los volátiles de la biomasa. La parrilla es una estructura metálica que permite el paso del aire primario. Estas parrillas deben presentar la posibilidad de retirar las cenizas y escorias, por lo que suelen ser móviles o estar inclinadas. La caldera utilizada en el proyecto es de este tipo.

- Calderas de lecho fluidizado: el combustible es suspendido por la entrada de aire primario, y en ocasiones por la parte superior, con el secundario. La temperatura del reactor varía entre 800ºC y 900ºC. Esta tecnología es más versátil, al permitir quemar una amplia gama de combustibles con gran cantidad de humedad (más de 50%), presentan menores emisiones (NOx , SOx y CO_2) y es en general más eficiente. Esta eficiencia viene en parte porque en el lecho fijo se apila el combustible, impidiendo que se recubra la cámara uniformemente. Además, estas calderas se pueden subdividir en: calderas de lecho fluidizado burbujeante, con velocidades de fluidización más bajas (1-3 m/s) y de lecho fluidizado circulante, con velocidades de (3-6 m/s)



3-6 Diferencia lecho fijo y lecho fluidizado



3-7 Clasificación de las calderas según la forma de combustión. Fuente: elaboración propia.

4 PROBLEMÁTICAS ASOCIADAS A LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA

Los principales problemas que se encuentran en la combustión de biomasa son la emisión de gases y partículas contaminantes, la corrosión, la deposición y los sinterizados y la erosión, entre otros.

Este proyecto se centrará en la deposición y sinterización dentro de las calderas y a resumir brevemente ahora el resto.

- Emisiones de gases contaminantes y partículas. Están muy relacionadas con el combustible y el entorno en el que se produce la combustión. Es un factor a tener en cuenta por el uso de muchas calderas en entorno doméstico y la toxicidad de ciertos gases como el CO.
- Corrosión: es el deterioro de las propiedades de un material al reaccionar con algún elemento exterior. Pueden ser debido a un gas, por la deposición de partículas o por ambos. En las calderas este fenómeno se asocia normalmente a la reacción de las superficies metálicas por las altas temperaturas y la alta concentración de azufre, cloro, oxígeno y metales alcalinos.
- Erosión de ciertas partes de la caldera debido a las altas velocidades que se transportan las partículas.

Los principales problemas detectados en este proyecto se detallan a continuación.

4.1 Deposición

Se entiende por deposición el ensuciamiento de las superficies de la caldera. Este fenómeno ocurre en la cámara de combustión, quedando depositado en la parte inferior de esta, en el cenicero, y en el tubo del intercambiador de calor. Dentro de este apartado se pueden distinguir dos tipos distintos de deposiciones según su formación, “fouling” y “slagging”. Ambos términos adquiridos del inglés.

En términos generales, se habla de “fouling” para referirse al ensuciamiento en los tubos del intercambiador de calor y del “slagging” cuando este ensuciamiento solidifica en la parte inferior de la instalación.

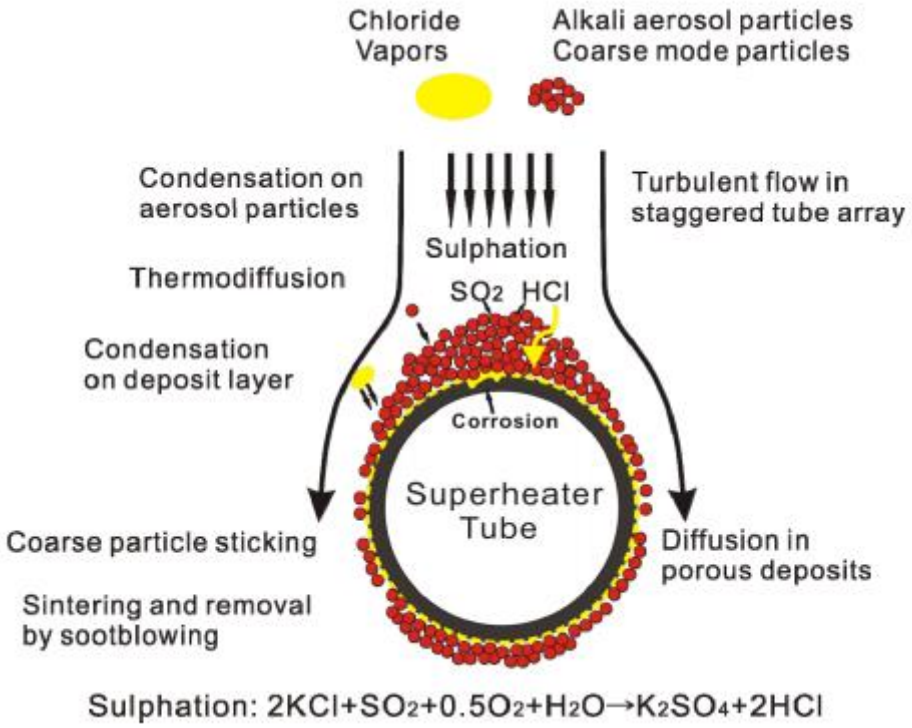
En los procesos de ensuciamiento intervienen varios fenómenos, entre ellos está la reacción de los componentes inorgánicos presentes en las cenizas debido a las altas temperaturas y el posterior enfriamiento y las reacciones químicas entre gases, líquidos y partículas sólidas.

Durante la combustión de un combustible sólido, la materia incombustible e inorgánica se transforma en compuestos líquidos, sólidos y gaseosos. La composición del combustible, el proceso de combustión, las condiciones físicas que se den en el interior de la caldera, así como su diseño, serán los responsables de determinar la composición y el tipo de cenizas resultantes de la combustión. Las cenizas secas y las cenizas volantes serán las que formen los diferentes depósitos en las superficies de la caldera.

El principal problema que genera la deposición de estas cenizas, en general, es pérdida de eficiencia en el intercambiador de calor debido al crecimiento de las capas del depósito de cenizas conforme al tubo, que baja el nivel de transferencia de calor entre los gases de combustión y el vapor. Del mismo modo, también se puede tomar como pérdida de eficiencia el tiempo invertido en la limpieza.

El mecanismo de creación de la ceniza es complejo. Los metales, como el sodio y el potasio, en combinación con otros elementos como el silicio o el azufre y el cloro, producen reacciones indeseables en el quemador. El cloro incrementa la volatilidad y la movilidad de los metales alcalinos, por lo que la concentración de cloro dicta la cantidad de alcalinos vaporizados. Estos elementos se encuentran en la biomasa en forma de sales inorgánicas solubles en agua como nitratos, cloruros u óxidos, lo que les facilita la volatilización durante la combustión dando lugar a una alta movilidad de los alcalinos con tendencia a ensuciamiento. Estos compuestos al enfriarse al paso por los tubos intercambiadores de calor condensan, como el cloruro potásico. Los compuestos alcalinos tienen una naturaleza pegajosa lo que favorece al posterior crecimiento mediante el impacto de partículas de más deposiciones. En presencia de azufre, estos compuestos alcalinos pueden reaccionar y formar sulfatos.

Por otro lado, los compuestos no volátiles, mayormente inorgánicos como el calcio, magnesio o silicio, forman parte de las cenizas de parrilla o de las cenizas volantes. En caso de ser de las segundas, impactarán contra las paredes del quemador y contra los tubos intercambiadores de calor, adhiriéndose a las paredes pegajosas por los alcalinos.



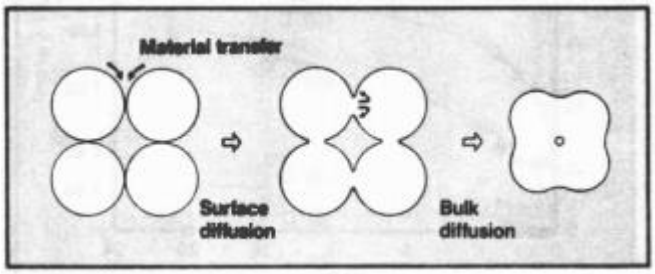
4-1 Mecanismo de formación y deposición sobre la superficie del intercambiador de calor [9]

Los principales mecanismos de formación de ensuciamiento son:

- Impacto inercial: es el mecanismo que más destaca en la cara del tubo por donde viene la corriente y apenas apreciable en la parte trasera. Las partículas grandes (>10µm) se acoplan a los depósitos por este mecanismo. Depende del tamaño, la densidad y la geometría de la partícula, y de las propiedades del gas de combustión. También tiene un factor importante la viscosidad de la partícula, en caso de no ser muy viscosa, la partícula puede rebotar y no adherirse.
- Termoforesis: partículas de ceniza muy pequeñas se transportan a la superficie enfriada impulsadas por el gradiente térmico de los gases o de sí mismas. A medida que el grosor va

aumentando en relación al tubo, se disminuye la adherencia por termoforesis, ya que disminuye el gradiente térmico.

- Difusión: la difusión es un proceso de transporte de partículas originado por la existencia de una alta concentración de partículas próxima a una baja. La diferencia de presiones de los gases de combustión provocadas por la diferencia de temperatura entre los gases de combustión y la superficie del intercambiador de calor origina la difusión de partículas de los gases hacia el tubo.
  Tras este proceso, se produce otro de condensación. Las partículas de vapor se condensan sobre las partículas ya depositadas. La cantidad de Cl, S y K altera las propiedades del depósito al condensar en forma de sales. Estas nuevas partículas reducen considerablemente la porosidad, aumentando la fuerza de unión entre partículas, haciendo más complicado el proceso de eliminación de depósitos. [10]



4-2 Proceso de difusión. Fuente: [11]

4.2 Sinterizado

La sinterización es un proceso por el que la unión entre átomos se hace más fuerte debido a los cambios geométricos que se producen al someter las partículas a temperaturas muy elevadas durante un tiempo prolongado. Cuando dos partículas que no están en equilibrio termodinámico (su energía superficial no es mínima) al verse sometidas a temperaturas altas se crea una unión entre las dos partículas, disminuyendo así la energía superficial del sistema.

Para que se produzca sinterización, existen numerosos mecanismos de transferencia. Entre estos está el de evaporación-condensación, debido a una diferencia de presión en diferentes partes del sistema. Esta diferencia de presión se produce entre la superficie de la partícula y la unión mencionada anteriormente y provoca que la materia se transfiera hacia la unión.

También puede deberse a la aparición de una masa fundida. La cantidad de masa fundida determinará la velocidad a la que se forme la unión, y si el líquido fuese muy viscoso, también tendría una gran influencia en el crecimiento de la unión.

Durante la sinterización se producen cambios en la porosidad del material, reduciéndose notablemente.

Este fenómeno se produce en los depósitos de los quemadores de biomasa. Los depósitos de ceniza aumentan su dureza considerablemente, lo cual perjudica a la retirada de estos. [12]

El proceso de sinterización se puede dividir en:

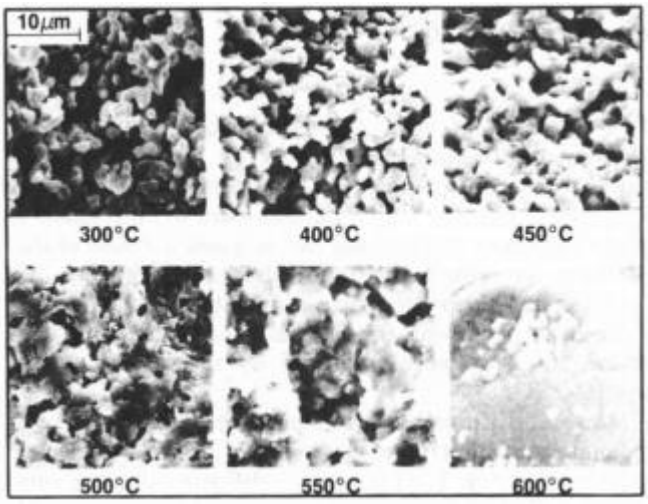
- Densificación: se produce cuando la materia que está en fase líquida llena los poros de los depósitos. A su vez se divide en tres partes: la primera es la aparición de los poros al salir los gases internos de los depósitos, la segunda es la contracción de estos poros y, por último, los poros se rellenan de masa fundida. La temperatura de sinterización característica es a la cual se corresponde la mínima densidad aparente y el máximo volumen de la muestra. Es aquella temperatura en la que se produce el cambio, contracción y posterior llenado de los poros por masa fundida. Esta temperatura, ofrece información del grado de sinterización que

puede tener un depósito dependiendo de la temperatura a la que se encuentre. A partir de esta temperatura el nivel de sinterizado y la dureza de los depósitos aumentan. [12]

- Contracción: es el resultado del cambio de forma de los depósitos. Este proceso depende de las propiedades físicas de la ceniza, la tensión superficial de las partículas, la difusividad y la viscosidad.
  Cuando existe una cantidad pequeña de masa fundida en la ceniza, se produce una densificación local de un número de partículas debido a que esta masa fundida proporciona adhesión al depósito con la formación de los cuellos. Los depósitos que se encuentran en el calentador y en la parte inferior de la caldera son duros y densos, ya que son las zonas más frías de la caldera. Es decir, en esos puntos se consiguen los puntos óptimos de sinterización, efecto no deseado.

Dependiendo de dónde depositen las partículas, estas sufren diferentes procesos por las temperaturas a las que se ven sometidas:

- Los valores típicos que se encuentran a la entrada y salida del calentador son 850-900ºC y 550-650ºC, respectivamente. A estas temperaturas se puede producir fusión, sinterizado y crecimiento del grano depositado. En la zona más baja del sobrecalentador se llega a una temperatura de 500ºC, lo que favorece a una rápida sinterización. Por el contrario en la zona más alta, la temperatura ronda los 450ºC, por lo que serán más fáciles de eliminar al no estar tan sinterizados. [11]
- La temperatura de los gases producidos en la combustión a la entrada de los evaporadores ronda los 600ºC y los 400ºC a la salida. La superficie de los tubos se encuentra a unos 320ºC, lo que ralentiza el proceso de sinterizado. Durante el funcionamiento de la caldera, el espesor de los depósitos hace que la transferencia de calor sea menor, aumentando la temperatura y provocando una mayor sinterización y con ello la resistencia del depósito. Si la caldera alcanza los 500ºC se pueden crear depósitos muy duros. [11]



4-3 Imagen de escáner microscópico de pellet sinterizado 1h. Fuente: [11]

4.3 Determinación de índices de deposición

Se pueden predecir los índices de deposición teóricos de un combustible en base a ciertos parámetros. Tras realizar los experimentos con los tipos distintos de pellets, se compararán con los índices teóricos y se analizarán los resultados. Con estos valores teóricos se puede calcular la cantidad que se produciría de "fouling" según la composición de los combustibles.

Para ello, primero se verán las relaciones entre base-ácido (B/A) donde se agrupan en el numerador los compuestos básicos, que son los que generalmente tienen puntos de fusión más bajos, frente a los compuestos ácidos, que en general tienen puntos de fusión más altos.

$$B/A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

Esta relación también puede ser definida de manera simplificada.

$$B/A_{simp} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

Sin embargo, esta relación no es del todo correcta para el presente combustible, ya que ha sido desarrollada para combustibles bajos en P, que como podemos ver no es el caso de estos pellets. El fósforo está presente en esta reacción en forma de P_2O_5. Este compuesto actúa como base en el sistema, es decir, se añade en el numerador y hace que aumente el índice de deposición.

$$B/A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + P_2O_5}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

También es relevante el índice alcalino, que sirve para aproximar el comportamiento de la ceniza, aunque no es del todo determinante. Se basa en la cantidad de alcalinos (principalmente sodio y potasio) que está presente para poder reaccionar con el cloro y el sulfuro. Un valor de 1 indica que hay suficiente Cl y S para reaccionar con los alcalinos, pero como ya se ha dicho no es determinante, ya que influyen otros factores como la temperatura, y más variables de la combustión para que esto ocurra. Valores muy bajos de este índice indican que hay exceso de alcalinos en nuestro sistema como se observa que es el caso de todas nuestras muestras.

Todos estos valores, indican la tendencia general al ensuciamiento, pero sin especificar si es fouling o slagging. Para eso, se dispone de otros datos para calcular los índices de slag y fouling.

Para el ensuciamiento en zonas de slagging, existe la fórmula:

$$R_S = B/A * S_d$$

Donde S_d hace referencia a la concentración de azufre sobre combustible en base seca.

Para el ensuciamiento en zonas de fouling, tenemos:

$$F_U = B/A * (Na_2O + K_2O)$$

Índices Deposición		Value	
Base to acid	B/A	0,975	Low slagging/founling
Modified Base to acid	B/A (+P)	1,345	
Simplified Base to acid	B/a (simp)	0,538	Low to medium slagging (Pronobis)
Alkali index	kg alkali/GJ	0,038	kg alkali/GJ
Slag ratio	Sr	47,23	High slag ratio
Fouling index	Fu	0,0965	low fouling
Chloride-sulfate ratios		0,253	

4-4 Tabla deposición de fouling para el pellet de madera comercial

Índices Deposición		Value	
Base to acid	B/A	1,084	Low slagging/founling
Modified Base to acid	B/A (+P)	1,579	
Simplified Base to acid	B/a (simp)	1,014	Low to medium slagging (Pronobis)
Alkali index	kg alkali/GJ	0,010	kg alkali/GJ
Slag ratio	Sr	23,42	High slag ratio
Fouling index	Fu	0,1430	low fouling
Chloride-sulfate ratios		1,893	

4-5 Tabla deposición de fouling para el pellet de tojo común

Índices Deposición		Value	
Base to acid	B/A	2,736	Low slagging/founling
Modified Base to acid	B/A (+P)	2,736	
Simplified Base to acid	B/a (simp)	2,762	Low to medium slagging (Pronobis)
Alkali index	kg alkali/GJ	0,004	kg alkali/GJ
Slag ratio	Sr	15,50	High slag ratio
Fouling index	Fu	0,0358	low fouling
Chloride-sulfate ratios		13,224	

4-6 Tabla deposición de fouling para el pellet de tojo N1

Índices Deposición		Value	
Base to acid	B/A	2,512	Low slagging/founling
Modified Base to acid	B/A (+P)	2,512	
Simplified Base to acid	B/a (simp)	1,560	Low to medium slagging (Pronobis)
Alkali index	kg alkali/GJ	0,052	kg alkali/GJ
Slag ratio	Sr	22,59	High slag ratio
Fouling index	Fu	1,2086	low fouling
Chloride-sulfate ratios		0,366	

4-7 Tabla deposición de fouling para el pellet de tojo N2

Índices Deposición		Value	
Base to acid	B/A	0,914	Low slagging/founling
Modified Base to acid	B/A (+P)	0,914	
Simplified Base to acid	B/a (simp)	0,827	Low to medium slagging (Pronobis)
Alkali index	kg alkali/GJ	0,011	kg alkali/GJ
Slag ratio	Sr	24,01	High slag ratio
Fouling index	Fu	0,1068	low fouling
Chloride-sulfate ratios		1,738	

4-8 Tabla deposición de fouling para el pellet de tojo N3

5 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

5.1 Introducción

La caldera utilizada en los experimentos ha sido construida por personal de la Universidad de Vigo con fines de investigación. Es modular, con zonas desmontables que facilitan el uso de esta y la obtención de datos tras los experimentos. También se pueden controlar ciertos parámetros de la combustión, como entradas en aire primario y secundario, caudal de combustible introducido, circuito de agua enfriado o no…

Según los tipos de clasificaciones vistos anteriormente (3.2,3.3) se puede clasificar esta caldera como acuotubular de lecho fijo con parrilla inclinada.

5-1 Caldera modular de investigación.

Es una caldera con quemador de sección cuadrada alimentada por un tornillo sin fin que llena la cámara de combustión mediante un temporizador. Tiene dos entradas de aire, una primaria que se encuentra en la parte inferior y que introduce el aire en el interior de la cámara y otra secundaria ubicada sobre esta y cuyo aire completa la combustión. Estas dos entradas pueden ser controladas. Sobre la cámara de combustión se dispone un tubo de acero inoxidable por el que circula el agua del circuito mediante el cual se produce el intercambio del calor. Sobre este tubo se estudiarán los materiales adheridos y depositados durante la combustión.

Tras esto se encuentra la chimenea, donde hay una toma de muestras para estudiar la composición de los gases de combustión y partículas en él presentes y un ventilador para enfriar los gases antes de su salida al exterior.

Vamos ahora a ver las partes de la instalación:

5.2 Componentes de la instalación

5.2.1 Componentes de alimentación

Consta de una tolva que tiene una célula de carga para calcular la masa de combustible y un tornillo sin fin.

- Tolva: es un recipiente colgado de unas cadenas que tienen en la parte superior una célula de carga que recoge la masa de combustible que está presente en la tolva para calcular la cantidad de combustible utilizado en el ensayo. Los datos aparecen en una pantalla en el panel de control. Tiene forma de pirámide invertida para facilitar el flujo descendente del combustible, aunque como se comentará más adelante, debido a la forma del pellet, es frecuente que se generen atascos.

5-2 Tolva con conducto hacia el tornillo sin fin. Con imagen de peso digital.

- De la tolva cae por un conducto de plástico (donde se generan los taponamientos) hasta un tornillo sin fin el cual lleva el combustible hasta la cámara de combustión. Este tornillo se programa mediante un temporizador, que se emplaza en el panel de control, y se mueve debido a un motor eléctrico. Es necesario debido a que la combustión no se produce a la

misma velocidad que la alimentación, y si esta fuese continua, se acabaría ahogando la combustión.

5-3 Tornillo sin fin alimentado por motor.

5.2.2 Componentes de la combustión

Está formado por la cámara de combustión, cenicero, entrada de aire primario, entrada de aire secundario, intercambiador de calor y chimenea.

5-4 Módulo de combustión

- Cámara de combustión: es la zona donde se produce la combustión. En su parte inferior se encuentra la parrilla, plancha inclinada de acero inoxidable agujereada donde se deposita el combustible. En la cámara de combustión hay tres termopares para controlar la temperatura, ya que aquí se dan las temperaturas más altas. Tiene una puerta extraíble que se retira para limpiarla tras su uso. Entre la puerta y el metal de la cámara hay unas capas de grafito que actúan como aislante.

5-5 Parrilla y cámara de combustión.

- Cenicero: en la parte inferior de la estructura de combustión, se sitúa un recipiente donde se acumulan las cenizas que van cayendo por los agujeros de la parrilla durante la combustión. Esta bandeja se puede desatornillar para limpiarla y recoger las muestras de ceniza de cada ensayo.
- Entrada de aire primario y secundario: la cámara de entrada de aire primario está situada en la parte inferior de la cámara de combustión y a través de ella, con el ventilador primario se introduce aire en el sistema para iniciar la reacción. La cámara de aire secundario se encuentra en la parte superior de la cámara de combustión e introduce el aire necesario para terminar de quemar los volátiles presentes en los gases de combustión y mejorar el rendimiento de la caldera. Esta cámara de admisión está formada de dos secciones cuadradas concéntricas entre las cuales se introduce el aire con un ventilador y la sección interior tiene orificios que distribuyen la entrada por toda su superficie.

5-6 Entrada de aire primario.

Tanto el caudal de entrada en el primario como en el secundario se puede regular desde el panel de control. En dicho panel hay un variador de frecuencia que acciona el ventilador. Hay un caudalímetro que informa al conmutador del valor real de aire suministrado, y si detecta un exceso o defecto de aire, el variador de frecuencia modifica la velocidad de giro del ventilador.

- Intercambiador de calor: tubo que se encuentra sobre la entrada de aire secundario por el que fluye el agua que se busca calentar como en una caldera comercial. Sobre su superficie es donde se va a estudiar la deposición y las partículas adheridas. Más adelante se explicará su extracción y como se recogen las muestras.

5-7 Entrada de aire secundario e intercambiador de calor.

- Chimenea: se encarga de expulsar al exterior los gases producidos en la combustión. Para evitar que los gases salgan a temperaturas demasiado elevadas, cuenta con un ventilador que introduce aire del exterior, enfriando los gases, y un termopar que registra las temperaturas y las presenta con una pantalla en el panel de control. En la tubería de la chimenea, se encuentran unos tubos más pequeños para extraer las muestras a analizar y conectar el impactador.

5.2.3 Elementos de control

- Caudalímetros: Tanto para el agua de refrigeración como para las entradas de aire primario y secundario.

5-8 Caudalímetro aire (izq.) y caudalímetro agua de refrigeración (dcha.)

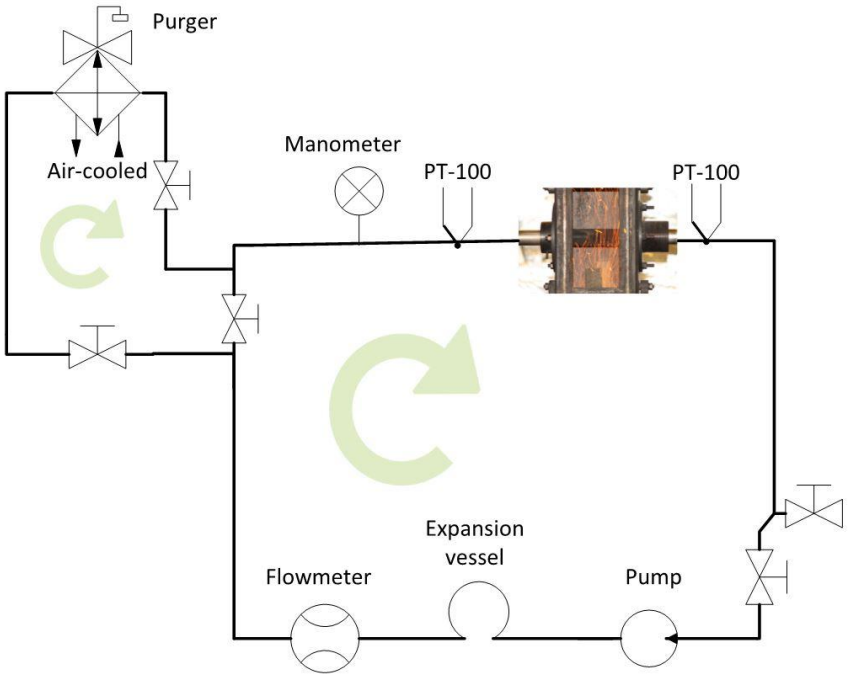
- Manómetro: para el circuito de agua de refrigeración. El circuito de agua debe de estar a 3 bares de presión, si la presión aumenta hay que regular la presión vaciándolo.

- Panel de control: en él se encuentran varios elementos para controlar la combustión.

1. Seleccionador de velocidad del ventilador extractor de humos.
2. Pantalla de la célula de carga. Indica la masa de pellet en kilogramos que hay en la tolva.
3. Temperatura de gases a la salida de la chimenea.
4. Temperatura de agua de refrigeración.
5. Panel para controlar el caudal del secundario en l/min.
6. Mandos para controlar la alimentación de combustible en la caldera. Puede estar en automático, vaciado o parado.
7. Panel para controlar el caudal del primario en l/min.
8. Diferencial para encender el panel.

5.2.4 Circuito de refrigeración

La instalación utilizada simula una caldera convencional doméstica, y como tal también tiene el módulo de transferencia de calor mediante el cual se calienta agua. Esta agua está en un circuito cerrado y se puede tener en dos modos, que circule el agua por los aerotermos, el modo más utilizado, o que no circule por éstos para estudiar cómo se comporta la instalación y hacer pruebas energía entregada por el combustible al agua.



5-9 Esquema del circuito de refrigeración.

El circuito debe de estar idealmente entre 2 y 3 bares. Esa presión se alcanza mediante el llenado del circuito mediante una manguera conectada a la boca y abriendo las llaves adyacentes. La es indicada por el manómetro.

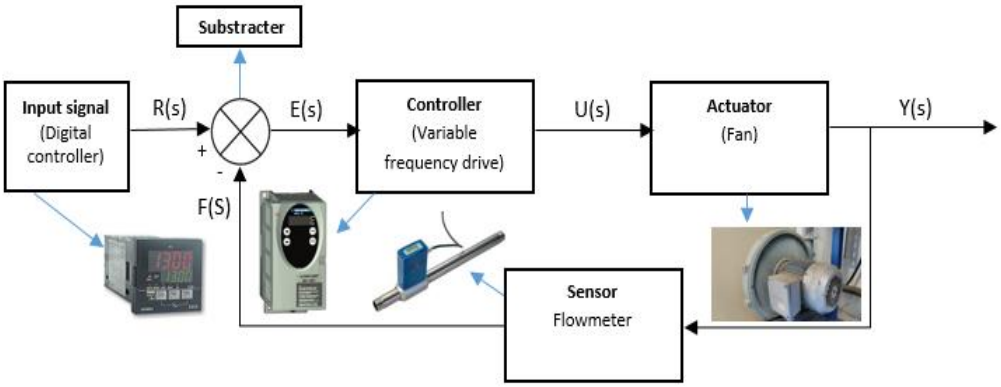
5-10 Sistema de llenado del circuito de refrigeración.

Tras pasar por el intercambiador de calor, el agua pasa por unos aerotermos situados en el exterior del laboratorio para volver a enfriarla y que no se eleve demasiado la temperatura dentro del circuito. En estos aerotermos se encuentran también unos purgadores para expulsar las burbujas de aire que pueda contener el circuito y que pueden suponer un problema de seguridad.

El circuito cuenta con un sistema de seguridad que absorbe la presión del circuito (hasta 9 bares), el vaso de expansión.

5.2.5 Circuito de aire

Como ya se ha comentado anteriormente, en la caldera está presente un circuito de aire que puede modificar tanto la entrada de aire primario, como la del secundario mediante los mandos de control. Mediante los caudalímetros se puede comprobar el aire que está entrando y aumentar o disminuir dicha cantidad.



5.2.6 Adquisición de datos

Los datos de la caldera son enviados al ordenador y allí se procesan y se archivan en un Excel para su posterior análisis. Estos datos van desde la temperatura del agua a la entrada y la salida, temperatura de gases de combustión, masa del combustible quemado, caudales de aire…

6 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

6.1 Limpieza

Antes de realizar un ensayo en la caldera, lo primero que se realiza es la correcta limpieza de la caldera para asegurar de que los resultados que se obtienen son correctos y válidos.

Lo primero es comprobar que en la cámara de alimentación no quedan restos de ceniza del experimento anterior. Para ello se aspira la cámara de alimentación hasta constatar que está completamente limpia.

Tras esto, se abre el cenicero desenroscando los 4 tornillos que lo sujetan por debajo de la estructura y se procede a su vaciado.

Lo siguiente que se debe hacer es purgar el circuito de agua. Se conecta la manguera a la boquilla vista anteriormente (5.2.4) y se abre la llave para vaciarla completamente

Una vez se ha vaciado el circuito de agua, se puede separar el tubo intercambiador de calor. Para ello, se quitan los tubos que conectan el circuito de agua con el tubo de ensayo, se retira los tres tornillos que tiene en el lado de la izquierda, aflojando el tornillo con cabeza Allen que queda y se saca la carcasa que lo sujeta. Una vez quitada, se extrae el tubo y se limpia, frotándolo para quitar cualquier resto adherido que pudiese quedar.

Con esto, ya se ha terminado la limpieza de la instalación.

6.2 El ensayo

Como se ha mencionado en el punto anterior, lo primero al realizar el ensayo, es la limpieza. Una vez realizada esta, lo primero que se debe que hacer es llenar el circuito de agua hasta que el manómetro marque una presión de 3 bares. (5.2.4) Se abre la válvula que permite la circulación del agua y se da corriente mediante el diferencial y se enciende la instalación en el panel de control.

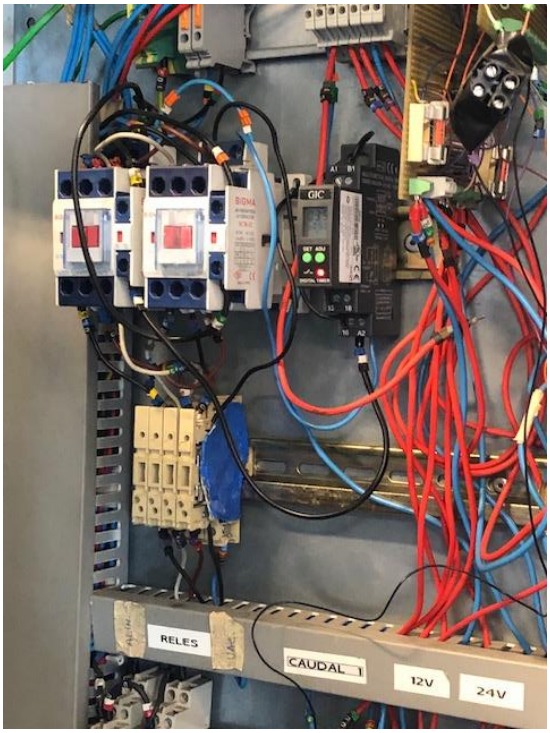
A continuación, se añade el combustible a la tolva y se debe llenar la cámara de alimentación hasta un nivel adecuado para el arranque del ensayo.

6-1 Cámara de alimentación llenada para realizar el ensayo.

Para este proceso, se debe abrir la caja de alimentación y desactivar el temporizador de alimentación. Se tiene que bajar el relé que está conectado al temporizador y poner el conmutador de la alimentación en "ALIMENTACIÓN FEED". Cuando esté por la marca, lo volvemos a poner en "PARO STOP", y se vuelve a conectar el relé del temporizador.

6-2 Conmutador de alimentación

Continuando con el proceso de alimentación para el ensayo, hay que configurar el temporizador. Presionando el botón de "ADJ" hasta que parpadeen los números permite el ajuste de los tiempos y con el botón de "SET" se selecciona el tiempo total del ciclo y luego el tiempo de encendido del temporizador. Reseñar que el tiempo de encendido es el tiempo que no se está alimentando, es decir, si se desea alimentar 4 segundos cada minuto, se establecen 56 segundos encendido y 4 de apagado.



6-3 Sistema de programación del temporizador.

Una vez con la cámara llena de combustible, el circuito de refrigeración con presión y el temporizador programado, resta programar los caudales de primario y secundario.

Para esto se dispone de los mandos en el panel de control (7 y 5). Para encender la instalación se debe poner el caudal de aire primario con un valor bajo, para que se encienda correctamente.

Con todos los parámetros ya introducidos, se enciende el ordenador y se inicia la adquisición de datos mediante LabView y se procede a iniciar la combustión en la cámara de alimentación mediante un decapador.

Tras unos minutos, se consigue la llama y cuando ha comenzado a arder bien se cierra la cámara de combustión. Se van aumentando los valores del caudal de primario y secundario hasta obtener los valores requeridos para el ensayo.

Durante el ensayo hay que asegurarse de que el circuito de refrigeración funciona correctamente y no hay ninguna válvula cerrada. Un buen indicador para eso es el manómetro, y también el valor de la temperatura de agua.

Una vez encendida la planta se esperan 45 minutos de para alcanzar la estabilidad y se empiezan a tomar los valores desde ese momento, el ensayo dura 3 horas.

6.3 Recogida de muestras

Este proyecto se basa en el estudio de ensuciamiento en quemadores de biomasa, por lo que será necesario recoger muestras tanto de los elementos adheridos como de las deposiciones.

Para recoger estas muestras, el primer paso es parar la máquina. Para este proceso, se pasa a “STOP” el conmutador de la alimentación y se va reduciendo progresivamente el caudal del aire y se esperan entre 15 y 20 minutos. Tras estos 20 minutos, en los que se ha dado tiempo a que se enfríe el sistema, se apaga el panel de control.

Con el quemador ya apagado, se abre la cámara de combustión se extrae toda la ceniza que haya. La que no se pueda sacar se empuja hasta caer al cenicero. Una vez vaciada la cámara de combustión, se retira el cenicero y se vacía la muestra en el mismo recipiente de barro. Toda esa muestra se tratará térmicamente para sacar el peso total de ceniza.

También hay que recoger las muestras del tubo del intercambiador. Primero se vacía el circuito de refrigeración mediante el procedimiento explicado en 6.1 y cuando está vacía se desenroscan los tubos metálicos que están conectados al intercambiador, se desatornilla la sujeción y se saca el tubo con cuidado de que no se caiga la ceniza depositada. Hay que hacerlo con especial cuidado debido a que no hay mucho espacio para sacarlo, como se puede observar en la imagen.

6-4 Tubo después de ensayo completo. Se puede ver el papel de aluminio sobre el que se van a extraer las muestras.

Después de retirarlo, se coloca el tubo sobre una tira de papel de aluminio donde se acumulará la ceniza cuando se golpee el tubo. Esta deposición se recoge en una bandeja de papel de aluminio para pesarla posteriormente.

Una vez se ha quitado la ceniza depositada, se procede a quitar la adherida. Mediante el raspado se separa la ceniza que se quedó pegada al tubo. Esta ceniza también se pone en otra bandeja de aluminio para su posterior pesado en la balanza.

La materia de ensuciamiento del tubo no precisa de ser tratada, al contrario que la recogida tanto del cenicero como de la cámara de combustión.

6-5 Se puede observar sobre el tubo la materia adherida y depositada.

Se puede observar también que la morfología de las dos cenizas (la del tubo y la recogida en el cenicero) es significativamente distinta. Esto es porque las cenizas que se depositan en el tubo son las partículas pequeñas que tienen la suficiente poca masa como para salir con los gases de combustión. Mientras que las que se quedan abajo depositadas son más pesadas y las que luego pueden formar las piedras de slagging.

6.4 Tratamiento de muestras

Las muestras obtenidas de la cámara de combustión, se requiere un tratamiento antes de pesarse debido a que pueden contener aún inquemados. Por ello, una vez recogidas se meten en una mufla a 550ºC durante 300 minutos para asegurarse de que en la ceniza no quedan inquemados. Para obtener esta temperatura, se programa para que de forma gradual vaya ascendiendo, y así, al llegar a los 100 minutos ya esté a temperatura constante durante 200 minutos. Después de este proceso, se pesa la muestra para obtener el contenido de deposición y de slagging.

Una vez realizado este proceso, se procede a analizar y cuantificar los datos obtenidos en los ensayos. Estos son: masa de deposición en la cámara de combustión y cenicero, masa depositada en el tubo de ensayo, masa adherida en el tubo de ensayo y los datos adquiridos con LabView.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Ensayos realizados

Se han realizado varios ensayos alterando la cantidad de aire total que se introduce en la instalación y los porcentajes de aire primario y secundario para comprobar cómo se comportan los combustibles en diferentes condiciones. Para referirse a los distintos ensayos, se usa la nomenclatura X_Y_Z donde X se hace referencia al porcentaje del aire que entra por el primario, Y al que entra por el secundario y Z a la cantidad total de aire en l/min.

Se han realizado estos ensayos con pellet de tojo, dos pellets de tojo con distintos aditivos y pellet de tojo sin finos. Y para cada tipo de combustible se han realizad con tres caudales totales distintos (160, 200 y 240 l/min) y una relación 30/70 del primario con respecto al secundario.

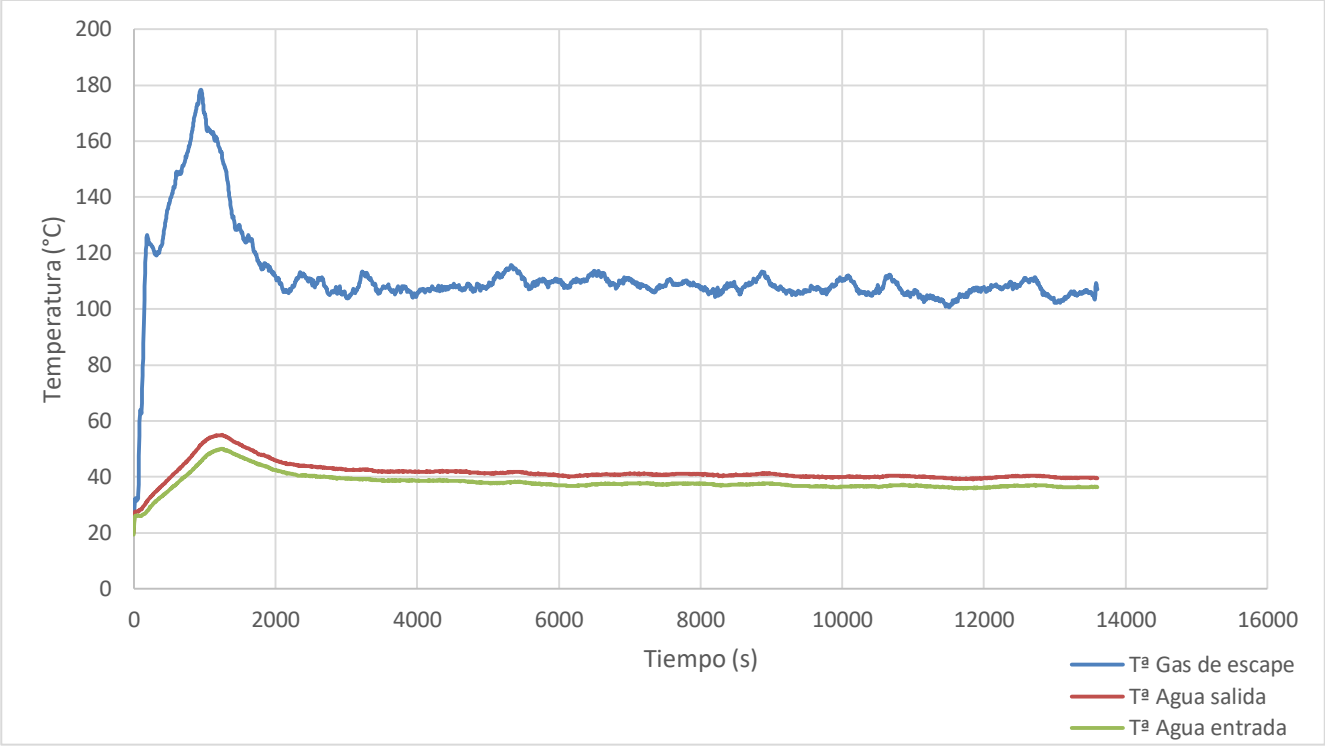
Además, para el pellet de tojo se han hecho ensayos alterando esta relación con 40/60, 30/70 y 25/75. Así, al ir cambiando factores manteniendo el resto fijos, se podrá estudiar la relación sobre las deposiciones de estos.

7.2 Estabilidad de la planta

Antes de analizar los ensayos, es necesario comprender como se comporta el quemador y el tiempo que precisa para estabilizarse.

Para ello se deben fijar una serie de parámetros (que no se van a cambiar en ese ensayo) como puede ser el flujo de combustible para alimentar la planta, o los caudales de primario y secundario y se modifican otros para ver la relación que existe entre ellos.

Se ha comprobado la estabilidad de la planta a partir de los 45 primeros minutos de transición. Para ello se ha observado el comportamiento de la temperatura del agua a la entrada y salida del sistema y de los humos que expulsa la caldera.



7-1 Gráfica que muestra la estabilidad de la planta relacionando la Tª de entrada y salida del agua de la caldera y la Tª de los gases de expulsión.

Se puede observar en las tres gráficas como al comienzo de los ensayos se produce una fuerte inestabilidad donde se alcanza un máximo de temperatura tanto en el circuito de agua como en los gases de escape.

Esto puede tener varias causas, principalmente es que el sistema está a temperatura ambiente y debe alcanzar una temperatura estable de funcionamiento. También los motores y demás componentes del sistema necesitan un tiempo para estabilizarse.

Otro factor muy importante se debe al flujo de combustible. Al principio se cuenta con la cámara de alimentación llena hasta la marca, por lo que la primera reacción con todo ese combustible trae consigo un aumento brusco en la temperatura. Conforme se va estabilizando la entrada del caudal y se tiene un flujo de caudal constante, la temperatura también se estabiliza.

Se puede observar como en las gráficas de entrada y salida de agua la dispersión de los puntos con respecto a la línea media es menor que en la de los humos.

Observando las tres gráficas se puede comprobar que la instalación se vuelve estable a partir de aproximadamente 45 minutos, por lo que la toma de datos a partir de ese momento es más adecuada.

Por ello, aunque durante los primeros 45 minutos se tomaran datos con el LabView, estos datos no serán tomados en cuenta a la hora del análisis.

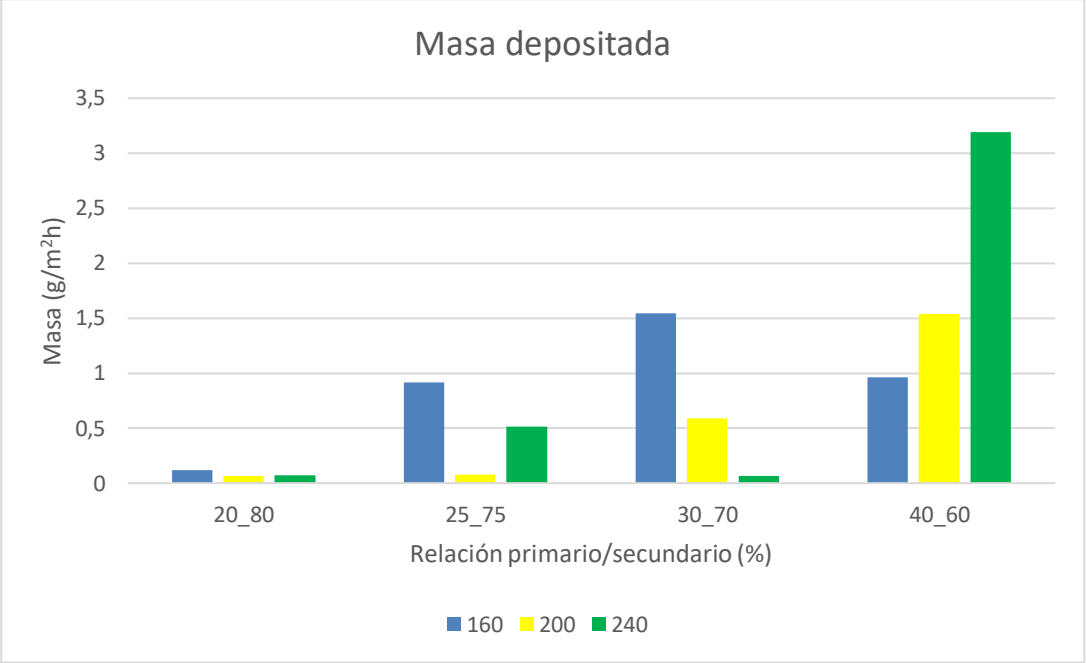
A la hora de analizar la cantidad total de ceniza, tanto adherida como depositada, no se podrá hacer distinción por tiempo por lo que se tomará toda la muestra, asumiendo como despreciable la alteración de la formación de ceniza en este periodo de inestabilidad.

7.3 Deposición

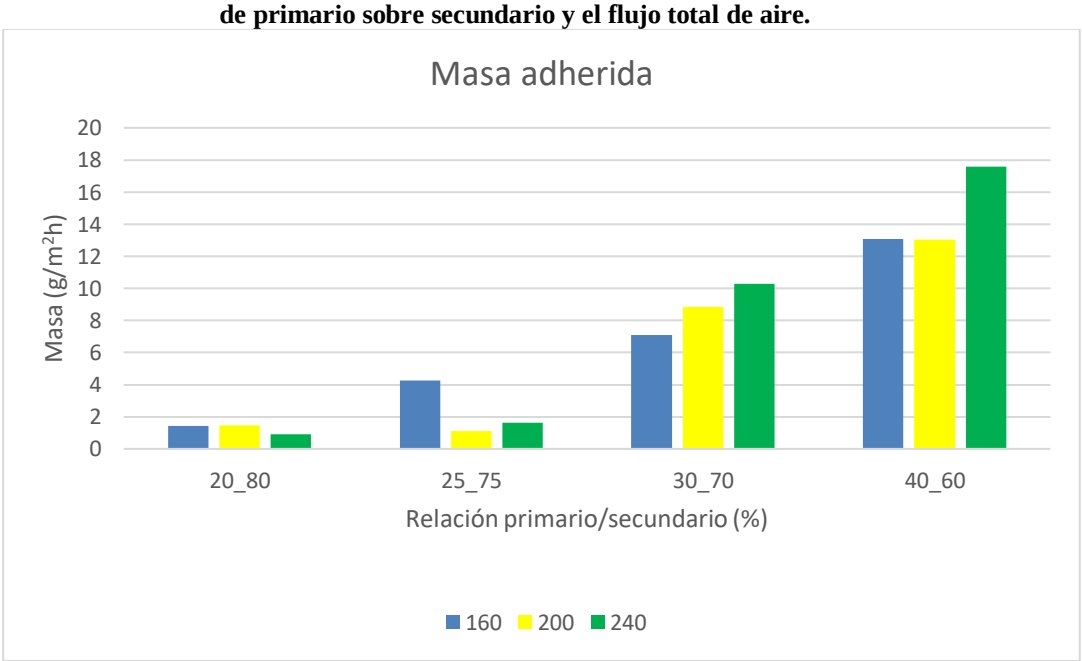
Se han organizado los resultados de los ensayos manteniendo fijo en unos el combustible y cambiando las condiciones del sistema y en otros fijando las condiciones de combustión para un mismo combustible.

Se han organizado en tablas separadas para poder comparar los resultados más fácilmente.

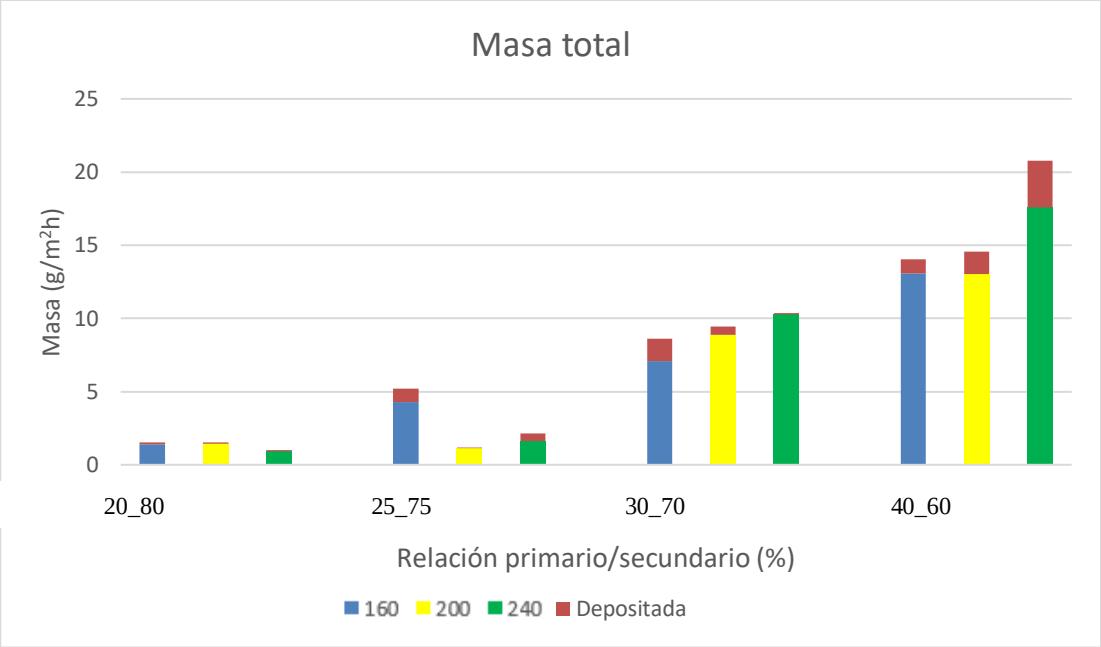
7.3.1 Pellet de tojo



7-2 Gráfica que muestra la masa depositada en g/m²h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire.



7-3 Gráfica que muestra la masa adherida en g/m²h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire.



7-4 Gráfica que muestra la masa total depositada en g/m^{2}h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire.

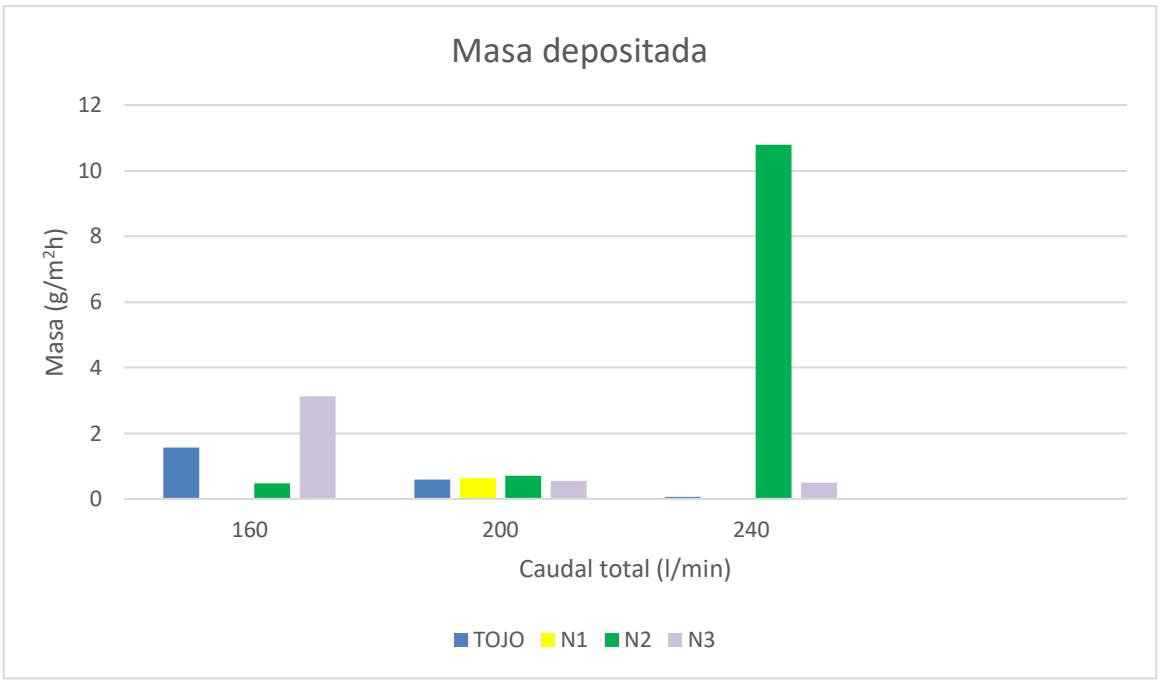
Tras analizar los resultados obtenidos para la deposición en este trabajo fin de grado se comprueba que los valores se sitúan entre 0.989 (20_80_240) y 20.769 (40_60_240).

A la vista de los ensayos, se puede afirmar que al aumentar la relación primario/secundario, aumenta la deposición tanto de masa depositada como adherida.

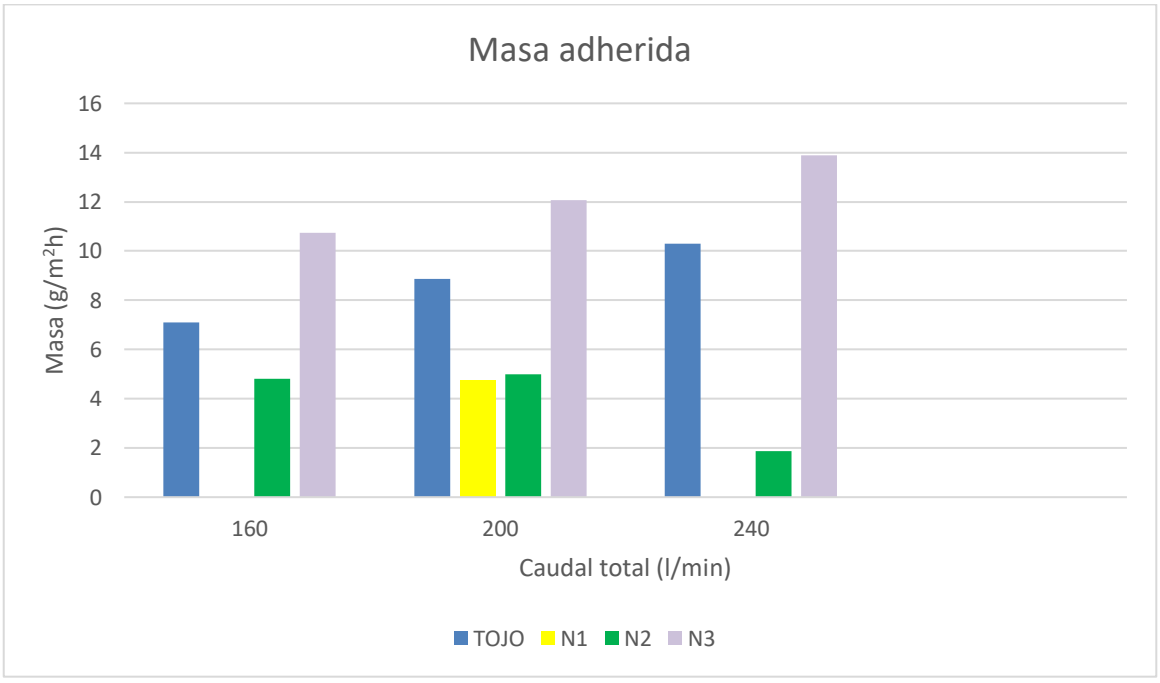
Se comprueba cómo la masa adherida tiene mayor influencia sobre la total que la depositada, siendo esta primera considerablemente mayor. Esto es debido a que lo ensayos son de corta duración por lo que la masa adherida ya está completamente formada sobre el tubo y la depositada es la que sigue en proceso de formación.

Para valores de caudal primario bajos, la cantidad total de masa adherida y depositada toma valores en torno a 0.989-2.151, esto no permite determinar una tendencia clara puesto que los valores se encuentran dentro de la propia incertidumbre de la medida. En el caso del ensayo 25_75_160 sería interesante su repetición, puesto que los valores obtenidos se alejan de la tendencia marcada por los demás.

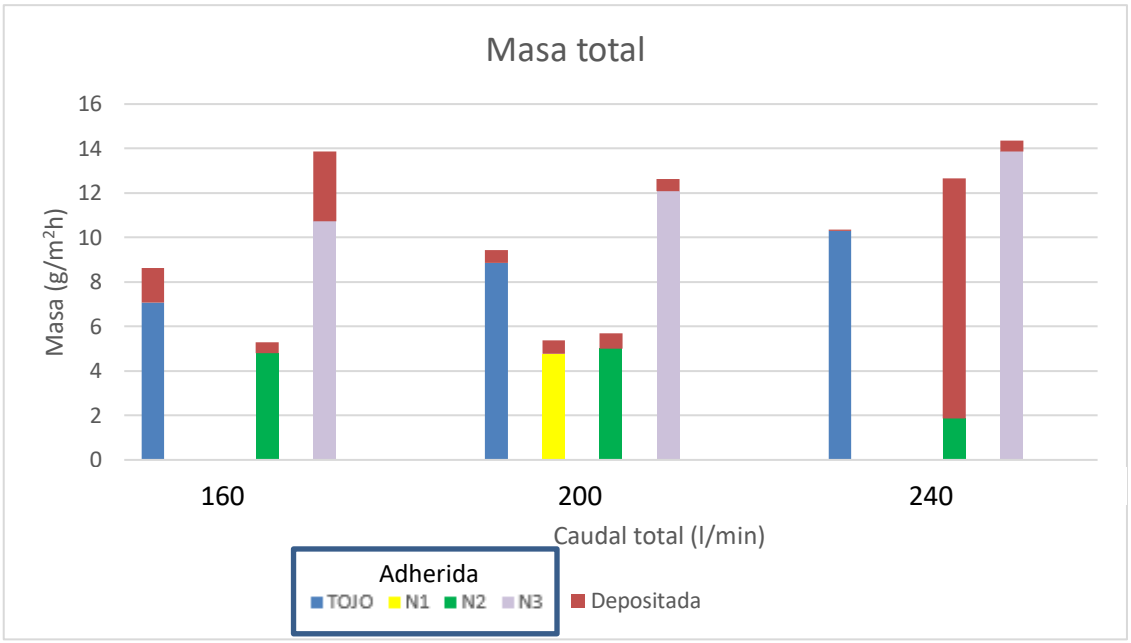
7.3.2 Ensayos 30_70



7-5 Gráfica que muestra la masa depositada en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min.



7-6 Gráfica que muestra la masa adherida en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min.



7-7 Gráfica que muestra la masa depositada en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min.

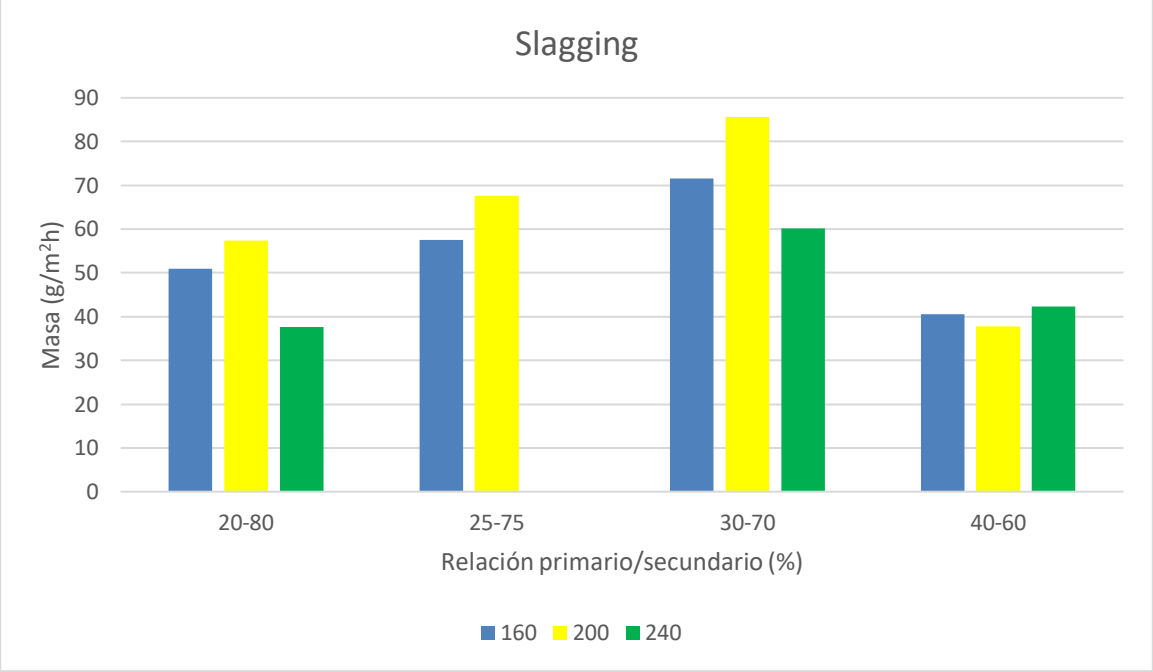
A la vista de los resultados obtenidos se sacan varias conclusiones:

- Los valores recogidos de los ensayos se encuentran entre los valores de:
  - Tojo: 8,63-10,36 g/m^{2}h
  - N1 (tojo sin finos): 0-5,39 g/m^{2}h
  - N2 (tojo con caolín): 5,28-12,65 g/m^{2}h
  - N3 (tojo con $CaCO_3$): 13,86-14.35 g/m^{2}h
- Se observa que, al aumentar el caudal total de aire, el pellet de tojo deja mayor índice de deposición.
- De la misma manera, con el pellet de tojo con caolín se observa que tiene una tendencia creciente a medida que se aumenta el caudal total de aire en el sistema.
- Los resultados del pellet sin finos para el ensayo de 160 y 240 l/min dejaron una cantidad de deposición tan baja que no se pudo recoger.
- Para el pellet con $CaCO_3$ se obtienen valores estables que no muestran ninguna tendencia. Estos valores se encuentran entre 13,86 y 14,35 g/m^{2}h como se mencionó anteriormente.
- Se obtienen unos valores anormales en el ensayo 30_70_240 de N2 en deposición, por lo que habría que repetirlo.

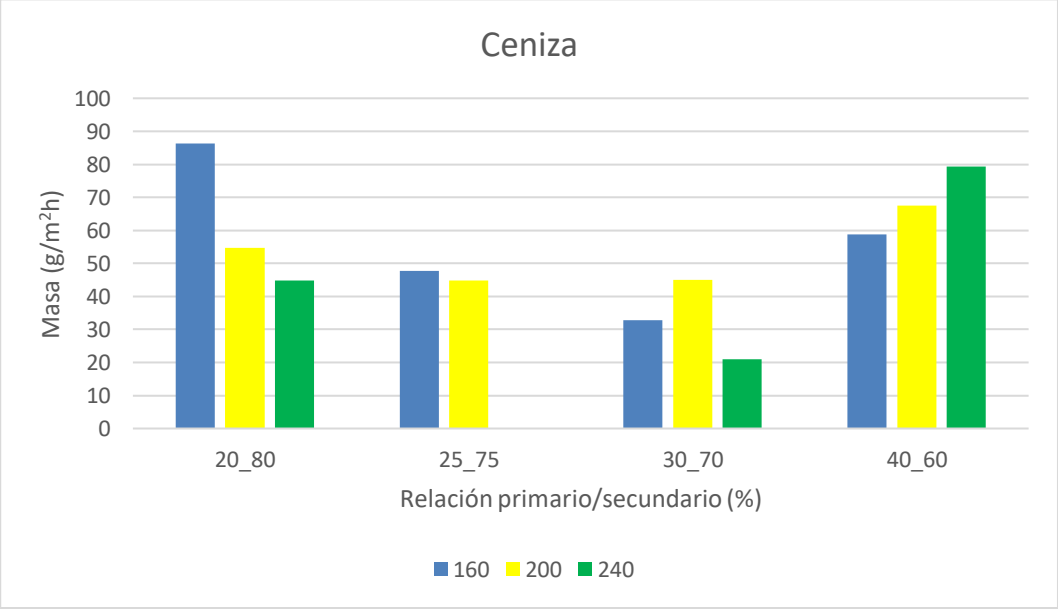
7.4 Sinterizado

Como ya se comentó en el punto 4.2, la sinterizacion es un proceso por el que la unión entre átomos se hace más fuerte debido a los cambios geométricos que se producen al someter las partículas a temperaturas muy elevadas durante un tiempo prolongado. En este proyecto de fin de grado afecta por la solidificación que se produce en las muestras que se obtienen de la cámara de alimentación y el cenicero, discerniendo entre slagging y ceniza. Si bien, para la comparación de ensuciamiento del combustible serán tratados en una sola gráfica.

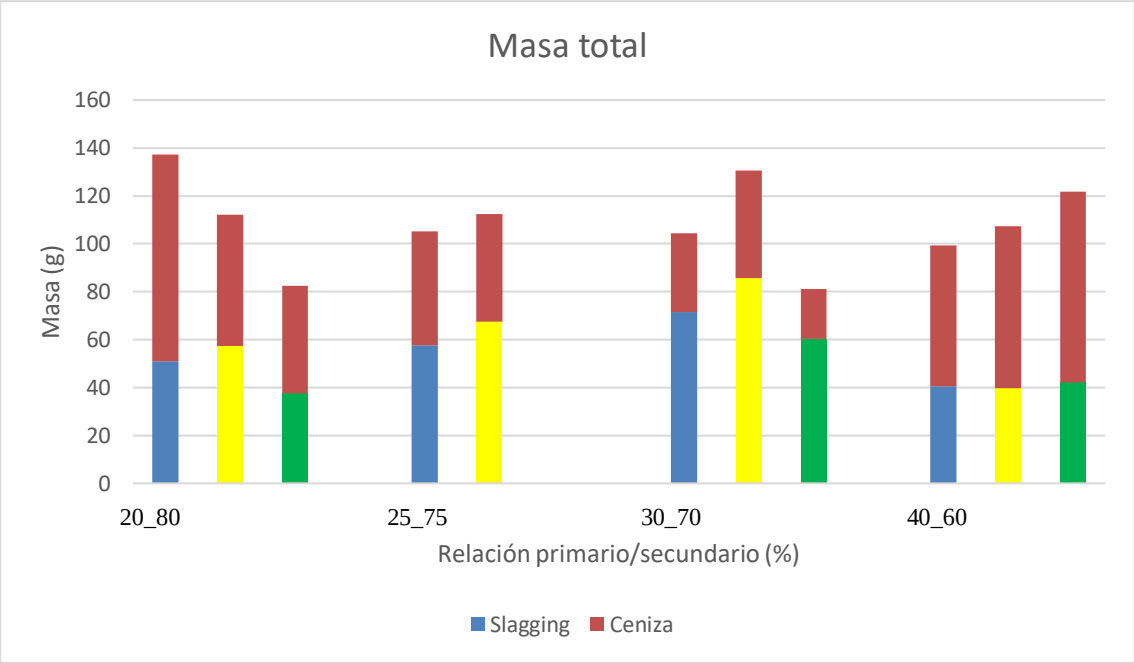
7.4.1 Pellet de tojo



7-8 Gráfica que muestra la masa de slagging en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min.



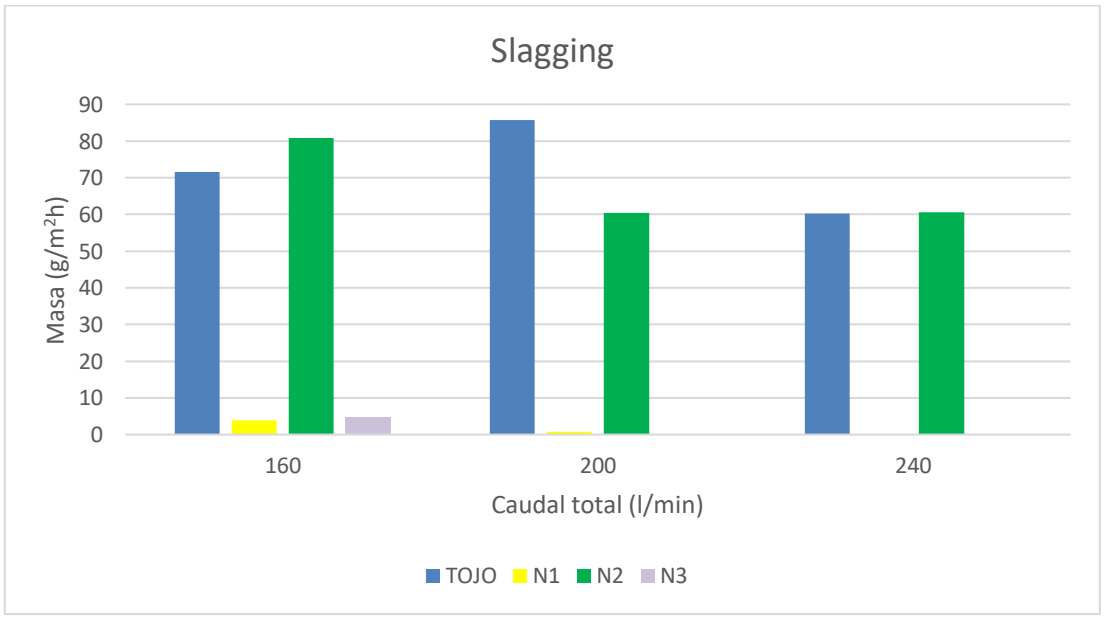
7-9 Gráfica que muestra la masa de ceniza en g/m^{2}h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire.



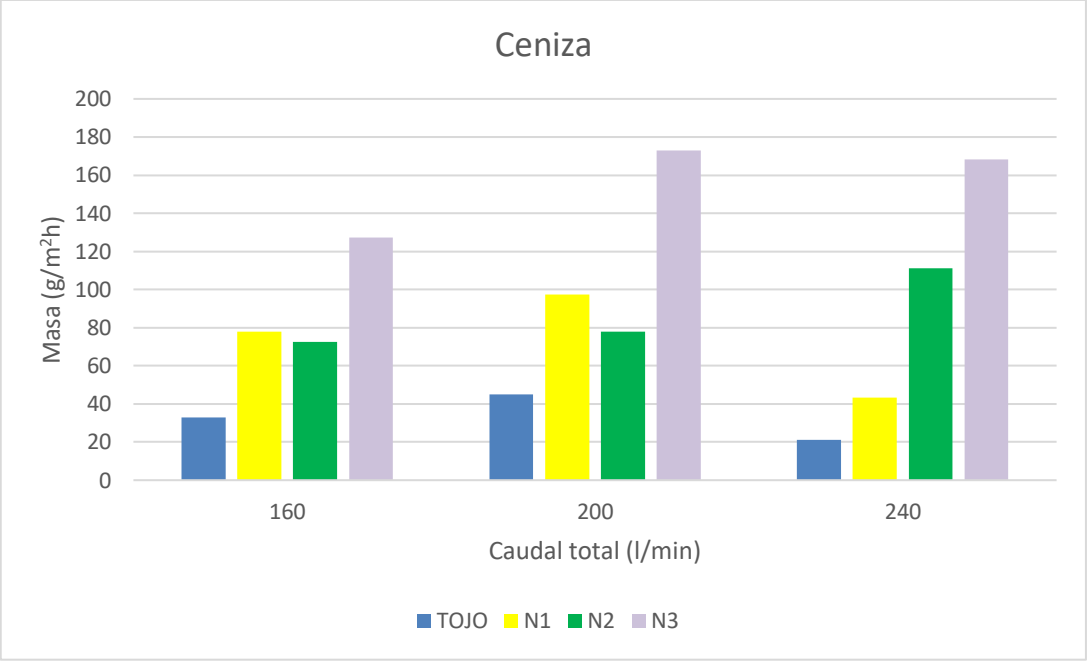
7-10 Gráfica que muestra la masa total de ceniza y slagging en g/m^{2}h en los ensayos con pellet de tojo variando los porcentajes de primario sobre secundario y el flujo total de aire.

- Observando los datos recogidos en la gráfica de masa total, se obtiene un rango de valor en la masa entre 81,243 y 137,255 g.
  De esta masa, los valores de slagging oscilan entre 0 y 85,687 g. y la ceniza entre 0 y 172,832 g.
- No hay ninguna diferencia significativa a la hora de analizar los valores del slagging. Tampoco hay una tendencia clara a la hora de analizar la masa total para los diferentes caudales y proporciones.

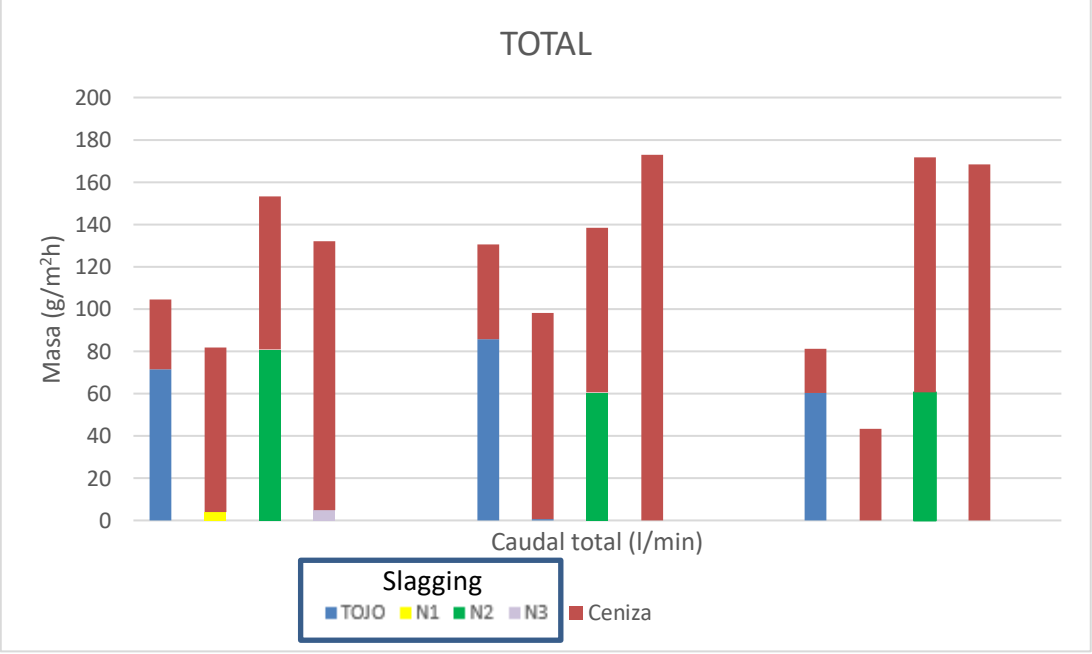
7.4.2 Ensayos 30_70



7-11 Gráfica que muestra la masa de slagging en g/m^{2}h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min.



7-12 Gráfica que muestra la masa de ceniza recogida en g/m²h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min.



7-13 Gráfica que muestra la masa total de ceniza y slagging en g/m²h en los ensayos variando los tipos de combustibles y el caudal total en l/min.

- Se aprecia como el combustible N1 forma apenas slagging y toda la muestra recogida es ceniza. Obtenemos el mismo resultado con el combustible N3, por lo que podemos decir que se ha conseguido el objetivo que se buscaba.
- Con el combustible N2 no se aprecia ninguna mejora con respecto al de tojo.
- Los mejores resultados se obtienen con el N1 debido a que al igual que el N3 no forma slagging, y la cantidad de ceniza es menos que en el tojo, por lo que se reduce la masa final recogida.

	SLAGGING				CENIZA			
	Masa inicial	Masa final	Diferencia	%	Masa inicial	Masa final	Diferencia	%
40_60_160	41,079	40,594	0,485	1,1806519	89,383	58,815	30,568	34,198897
40_60_200	40,051	39,723	0,328	0,8189558	93,387	67,545	25,842	27,671946
40_60_240	42,809	42,248	0,561	1,3104721	94,006	79,393	14,613	15,544752
30_70_160	71,699	71,587	0,112	0,1562086	101,426	32,824	68,602	67,637489
30_70_200	85,827	85,687	0,14	0,1631188	51,453	44,951	6,502	12,636775
30_70_240	60,59	60,2	0,393	0,6486219	145,3	21,05	124,258	85,518238
25_75_160	57,588	57,516	0,072	0,125026	53,879	47,743	6,136	11,388482
25_75_200	67,775	67,638	0,137	0,2021394	70,55	44,91	25,64	36,343019
25_75_240	0	0	0	0	0	0	0	0
20_80_160	51,133	50,995	0,138	0,2698844	222,723	86,26	136,463	61,270277
20_80_200	57,409	57,409	0	0	153,303	54,746	98,557	64,289022
20_80_240	37,65	37,65	0	0	117,62	44,88	72,74	61,843224
30_70_160	11,781	11,781	0	0	237,966	91,648	146,318	61,486935
30_70_240	19,701	19,241	0,46	2,3349069	221,48	48,773	172,707	77,978599
30_70_240	0	0	0	0	0	0	0	0
30_70_160 N1	3,874	3,874	0	0	296,658	77,895	218,763	73,742491
30_70_200 N1	0,775	0,775	0	0	298,155	97,377	200,778	67,340142
30_70_240 N1	0	0	0	0	94,843	43,276	51,567	54,370908
30_70_160 N2	10,918	10,859	0,059	0,540392	400,585	92,813	307,772	76,830635
30_70_160 N2	80,802	80,767	0,035	0,0433158	148,995	72,418	76,577	51,395684
30_70_200 N2	60,53	60,43	0,096	0,158599	192,54	77,97	114,572	59,505557
30_70_240 N2	60,831	60,582	0,249	0,4093308	239,74	111,255	128,485	53,593476
30_70_160 N3	4,803	4,782	0,021	0,4372267	157,795	127,334	30,461	19,30416
30_70_200 N3	0	0	0	0	281,853	172,832	109,021	38,680092
30_70_240 N3	0	0	0	0	261,381	168,291	93,09	35,614677

7-1 Tabla de diferencia de pesos tras paso por mufla

Se observa que la diferencia de pesos después del proceso en la mufla es mucho más significativa en la ceniza que en el slagging.

Esto se debe a que el slagging es el proceso que se produce cuando se somete durante un periodo largo a las partículas a altas temperaturas, por lo que no hay volátiles ya presentes en su estructura.

En el slagging se obtienen unos valores de reducción de masa de entre un 0 y un 2,335 % mientras que para la ceniza los valores alcanzan hasta el 85,52%. Esto se debe a que en la ceniza hay presentes inquemados y volátiles que no han terminado de reaccionar en la combustión y que se queman en la mufla al alcanzar temperaturas de hasta 500 ºC.

Cuanto más altos son los resultados obtenidos en la reducción de masa de la ceniza, peor se ha producido la combustión.

8 CONCLUSIONES

A partir los de los datos obtenidos en los ensayos y tras haber sido analizados con detenimiento, se pueden obtener como conclusiones para este trabajo de fin de grado:

- Como primera conclusión, se comprueba como suficiente los 45 minutos de espera para estabilización de la planta. Se comprueba mediante los resultados obtenidos en el subapartado 7.2. En la gráfica se muestra como para la temperatura de agua a la entrada y salida del sistema y la temperatura de los gases de salida, el valor asciende rápidamente hasta alcanzar un valor máximo. Tras este valor límite, la temperatura se va reduciendo produciéndose una oscilación en torno a la media, que se va amortiguando hasta que se obtiene una estabilización de los valores para todo el ensayo a partir del segundo 2500, lo que se aproxima a 45 minutos para estandarizar valores.

- Se comprueba que en un ensayo de esta duración (3 horas) tiene una mayor influencia la masa adherida que la depositada. Esto es debido a que en ese periodo de tiempo se forma completamente la capa adherida en la superficie del tubo, y hasta que esta no es formada, no comienza a depositarse partículas sobre esta. En ensayos de más duración el valor de la masa adherida será mayor.

- Se establece que el aumento de la relación primario/secundario influye directamente sobre la deposición (tanto en la masa depositada como adherida). Esta afirmación se soporta en los resultados de los ensayos tanto fijando el combustible en pellet de tojo y cambiando las condiciones de la combustión (los caudales totales entre 160, 200 y 240 l/min y la relación primario/secundario entre 20/80, 25/75, 30/70 y 60/40, expresadas en %) como fijando las condiciones de combustión en 30_70 (cambiando el flujo total entre 160, 200 y 240 l/min) y cambiando los combustibles (pellet de tojo, pellet de tojo sin finos, pellet de tojo con caolín y pellet de tojo con $CaCO_3$).

- Se observa la tendencia creciente de la formación de deposición al aumentar el caudal total de aire en el pellet de tojo. Se saca la misma conclusión para el pellet con caolín (N2).

- El pellet sin finos en los ensayos de deposición 30_70_160 y 30_70_240 deja una cantidad de deposición tan pequeña en los ensayos que se aproxima a 0. De la misma manera, en los valores de slagging se obtienen unos valores muy pequeños. Estos valores se contrastan con un alto contenido de ceniza. En términos generales y en vista a los resultados obtenidos para el combustible N1, emplear un pellet sin finos, mejora las condiciones de ensuciamiento en la caldera, ya que no se forma slagging en la caldera, y los valores de ceniza, aunque altos, están en la media.

9 LÍNEAS FUTURAS

Como en todo trabajo experimental, durante la realización de este trabajo fin de grado, se han detectado posibles mejoras que por falta de tiempo y medios no se han podido realizar. Quedan como futuros proyectos.

- Como se ha comprobado en otros proyectos [13] [14], la temperatura del agua del circuito de refrigeración guarda relación con el ensuciamiento en la caldera. Comprobar si el factor temperatura del agua tiene la misma relación en estos combustibles.

- En las conclusiones se han detectado ensayos que no guardan coherencia en relación con los otros. Se propone repetir esos ensayos para comprobar los resultados y ver si ha habido algún error en la toma de datos o condiciones del ensayo.

- También se ha detectado que en estos ensayos la cantidad de masa depositada es menor que la adherida debido a que esta última ya es definitiva y la depositada no. Se propone realizar ensayos para observar la tendencia que guarda la ceniza depositada en estos combustibles y esperando ver si hay un valor límite de este tipo de ceniza.

- Probar con otros aditivos. Así como cambiar la composición de los combustibles con los mismos aditivos ya empleados.

- Realizar ensayos con tubos de otros diámetros y materiales para estudiar la influencia del área de deposición y adherencia y la de la conductividad del metal empleado.

10 BIBLIOGRAFÍA

[1] http://desenvolupamentsostenible.org/es/4-recursos-naturales-y-fuentes-de-energia/figura-415-evolucion-del-consumo-energetico-mundial-segun-tipo-de-fuente. [En línea].

[2] «http://www.ime.cat/WebEditor/Pagines/file/10_Contexto%20energetico%20global%20y%20regional.pdf,» [En línea].

[3] A. d. E. d. E. Renovables, «https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-en-europa/,» [En línea].

[4] A. d. E. d. E. Renovables, «https://www.appa.es/wp-content/uploads/2019/10/Estudio_del_impacto_Macroeconomico_de_las_energias_renovables_en_Espa%C3%B1a_2018_vff.pdf».

[5] CIEMAT, «http://www.ciemat.es/cargarActividadInvestigacion.do?identificador=1514&idArea=1&idLinea=3&idSublinea=3».

[6] B. Melissari, «Biomass Ash Behaviour and its Impact on Combustion Systems,» 2012.

[7] M. S. M. Laughlin, «PLANTA DE PRODUCCIÓN DE PELLETS,» Sevilla, 2017.

[8] V. B. García, «Revista mexicana de ciencias forestales,» Noviembre 2016. [En línea]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000600005.

[9] J. W. Yuanyuan Shao, «Ash deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power/Heat Generation,» p. 19, 2012.

[10] M. S. B. S. W. F. J. F. J. W. S. T. P. K. D.-J. Peter Arendt Jensen, «Characterization and quantification of deposits build up and removal in straw suspension fired boilers,» nº Energinet.dk project no. 7217 - CHEC no. R1301, p. 216, 2013.

[11] H. Tran, D. W. Reeve y D. Barham, «Sintering of fireside deposits and its impact on plugging in kraft recovery boilers,» *TappiJournal*, vol. 70, nº 4, 1988.

[12] A. Zbogar, F. Frandsen, P. A. Jensen y p. Glarborg, «Shedding of ash deposits,» *Progress in Energy and Combustion Science*, pp. 31-56, 2009.

[13] B. Rashidiana, Y. M.Al-Abdelia, DavidPatiño, F. G.Guzzomia y G. H.Yeohac, «Effect of freeboard deflectors in the fixed bed combustion of biomass,» vol. 103, pp. 543-552, 25 June 2016.

[14] C. T. Casal y D. P. Vilas, «Estudio experimental de la deposición de partículas en un intercambiador acuotubular de un quemador de biomasa,» Vigo, 2016.

[15] «Web de La Moncloa,» [En línea]. Available: http://www.lamoncloa.gob.es. [Último acceso: 13 enero 2015].

[16] J. Rodríguez y V. Fernández, Cómo redactar el estado del arte de un trabajo, Editorial Genios, 2010.

[17] P. Martínez y A. García, Cómo escribir una buena memoria de TFG, Publicaciones del 2000, 2013.

[18] A. Pérez, Cómo escribir una bibliografía, Nuevas publicaciones.

[19] http://www.ime.cat/WebEditor/Pagines/file/10_Contexto%20energetico%20global%20y%20regional.pdf. [En línea].

[20] M. Pronobis, S. Kalisz y M. Polok, «The impact of coal characteristics on the fouling of stoker-fired boiler convection surfaces,» vol. Volume 112, pp. Pages 473-482, October 2013.

[21] A. Pizzi, E. Foppa Pedretti, D. Duca, G. Rossini, C. Mengarelli y A. Ilari, «Emissions of heating appliances fuelled with agropellet produced from vine pruning residues and environmental aspects,» vol. 121, pp. 513-520, January, 2018.

[22] C. L.S. Johanssona, B. Tullina, Lecknerb y P. Sj'ovalla, «Particle emissions from biomass combustion in,» *Biomass and Bioenergy* , vol. 25, p. 435 – 446, 2003.

[23] A. Regueiro, D. Patiño, E. Granada y J. Porteiro, «Experimental study on the fouling behaviour of an underfeed fixed-bed,» *Applied Thermal Engineering* , vol. 112, p. 523–533, 2017.

[24] A. Regueiro, D. Patiño, J. Porteiro, E. Granada y J. L. Míguez, «Effect of Air Staging Ratios on the Burning Rate and,» vol. 9, 2016.

[25] R. Pérez-Orozco, D. Patiño, J. Porteiro, N. Cid y A. Regueiro, «Influence of the Feeding Rate on the,» p. 2520–2529, 2019.

[26] A. Regueiro, L. Jezerská, D. Patiño, R. Pérez-Orozco, J. Necas y M. Žídek, «Experimental Study of the Viability of Low-Grade Biofuels in Small-Scale Appliances,» 2017.