



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Influencia de la composición del combustible en las emisiones y la generación de residuos en sistemas de combustión de biomasa de baja potencia.*

### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** AF Emilio Hitos Chacón

**DIRECTORES:** Araceli Regueiro Pereira

Raquel Pérez Orozco

**CURSO ACADÉMICO:** 2021-2022

Universida<sub>de</sub>Vigo





Centro Universitario de la Defensa  
en la Escuela Naval Militar

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Influencia de la composición del combustible en las emisiones y la generación de residuos en sistemas de combustión de biomasa de baja potencia.*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

UniversidadeVigo



## **RESUMEN**

Los combustibles sólidos de biomasa son una importante fuente de energía renovable por su potencial para desplazar a los tradicionales combustibles fósiles en instalaciones de combustión ya existentes, así como por proporcionar una salida para una gran cantidad de subproductos y residuos no valorizados de industrias agrícolas y silvícolas. En este contexto, la búsqueda continua de nuevas fuentes de energía exige un trabajo continuo de experimentación y mejora de diversos combustibles novedosos, que deben ser sometidos a numerosos análisis composicionales y estructurales, así como a pruebas en entornos controlados, para determinar su viabilidad en instalaciones reales. En este Trabajo Fin de Grado se busca determinar los efectos en las emisiones de partículas y gases de ensayos utilizando diferentes combustibles no comerciales, así como estudiar los efectos en su composición, densidad energética y otras características. El combustible de referencia será el pellet de madera convencional del cual serán expuestos sus datos anteriores y comparados con otros tres pellets en ensayos parametrizados en una instalación de combustión de biomasa de laboratorio. Por lo que para obtener una visión más completa del proceso se llevará a cabo una explicación de cada una de las partes de la planta experimental y de su funcionamiento.

## **PALABRAS CLAVE**

Pellet, Biomasa, Quemador, Partículas, Slagging, Fouling, Emisiones



# AGRADECIMIENTOS

A todos mis amigos y compañeros de la 422-152, en especial a la 205 B por estos meses de desesperación, alegrías e ilusiones por terminar esta etapa de nuestras vidas. Por todos los buenos ratos pasados, por haberme sacado una sonrisa cuando más lo necesitaba.

A Irene por estar siempre ahí, por apoyarme y darme ánimos todos los días, por ser un pilar fundamental estos últimos años, por ayudarme a despejarme siempre que lo he necesitado y darme siempre esperanzas cuando yo no creía en mí mismo, en definitiva, por todo.

A mis tutoras, Araceli y Raquel, desde el primer día me han ayudado siempre que me ha hecho falta, he podido contar con ellas en todo momento. Me llevo muy buen recuerdo de mi visita a la Universidad y en general de haber trabajado con ellas en este proyecto.

A mi familia, por creer siempre en mí desde el día que entre por Carlos I, por estar tan ilusionados como yo de acabar esta etapa y comenzar una nueva. Por todo el apoyo y cariño que me han transmitido durante mis 5 años en la Escuela Naval Militar.



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
Índice De Ecuaciones .....	6
1. Introducción y objetivos.....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Modelos de energía renovable y no renovable a nivel mundial.....	1
1.2.1 Uso de la biomasa a nivel global.....	3
1.3 Modelos de energía renovable y no renovable en Europa .....	3
1.3.1 Uso de la biomasa a nivel europeo .....	4
1.4 Modelos de energía renovable y no renovable en España .....	5
1.4.1 Uso de la biomasa en España .....	6
1.5 Objetivos .....	7
2 Estado del arte.....	9
2.1 Biomasa.....	9
2.1.1 Clasificación.....	9
2.1.2 Caracterización energética de la biomasa .....	10
2.1.3 Ventajas e inconvenientes del uso de la biomasa.....	12
2.2 Procesos de conversión de la biomasa en energía.....	13
2.2.1 Extracción directa de hidrocarburos.....	13
2.2.2 Procesos termoquímicos.....	13
2.2.3 Métodos biológicos .....	14
2.3 Tipos de calderas de biomasa.....	15
2.3.1 Según la circulación del agua.....	15
2.3.2 Según la forma de combustión .....	17
3 El combustible.....	19
3.1 Combustible .....	19
3.1.1 Pellet.....	19
3.1.2 Proceso de fabricación del pellet.....	19
3.1.3 Caracterización del combustible empleado .....	21
4 Instalación .....	25
4.1 Descripción de la instalación .....	25
4.1.1 Sistema de alimentación .....	25

4.1.2	Quemador .....	26
4.1.3	Panel y elementos de control .....	30
4.1.4	Dispositivos auxiliares y de medición .....	31
5	Metodología .....	35
5.1	Diseño de experimentos .....	35
5.2	Metodología de trabajo durante el ensayo .....	35
5.2.1	Montaje del impactador .....	36
5.2.2	Limpieza .....	36
5.2.3	Encendido del analizador y programa LabView .....	37
5.3	El ensayo .....	37
5.3.1	Llenado de la tolva .....	37
5.3.2	Activación del circuito de refrigeración .....	38
5.3.3	Selección del modo de funcionamiento y llenado de la cámara de combustión .....	38
5.3.4	Encendido del pellet .....	39
5.3.5	Disposición del impactador de partículas .....	39
5.3.6	Apagado del quemador y del resto de equipos .....	40
6	Análisis y resultados .....	43
6.1	Composición del combustible .....	43
6.1.1	Análisis inmediato .....	44
6.1.2	Análisis elemental .....	45
6.1.3	Composición de cenizas .....	45
6.2	Comportamiento ante la combustión .....	47
6.2.1	Estabilidad de la planta .....	47
6.2.2	Emisiones gaseosas .....	49
6.2.3	Partículas totales emitidas .....	51
6.2.4	Distribución de partículas según su tamaño .....	51
6.2.5	Masas de ensuciamiento .....	53
6.2.6	Slagging y cenizas .....	54
7	Conclusiones y líneas futuras .....	56
7.1	Conclusiones .....	56
7.2	Líneas futuras .....	57
8	Bibliografía .....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Consumo mundial de energía primaria en 2018 [2].....	2
Figura 1-2 Inversión mundial en la transición energética [4].....	2
Figura 1-3 Evolución y previsiones del consumo de biomasa a nivel mundial [6].....	3
Figura 1-4 Consumo de energía primaria en Europa en 2018 [2].....	4
Figura 1-5 Producción de energía primaria de biomasa sólida en la UE en 2010 [8].....	5
Figura 1-6 Consumo de energía primaria en España en 2018 [3].....	5
Figura 1-7 Biomasa, evolución de la potencia instalada y energía vendida [11].....	6
Figura 2-1 Ciclo de biomasa [6].....	9
Figura 2-2 Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa [13].....	11
Figura 2-3 Procesos de conversión de biomasa en energía o en biocombustibles [1].....	13
Figura 2-4 Esquema del reactor de pirólisis rápida en lecho circulante [15].....	14
Figura 2-5 Tipos de calderas según la circulación del agua. Fuente: elaboración propia.....	15
Figura 2-6 Caldera de vapor pirotubular [16].....	16
Figura 2-7 Caldera de vapor acuotubular [16].....	17
Figura 2-8 Clasificación de las calderas en función de la forma de combustión. Fuente: elaboración propia.....	17
Figura 2-9 Caldera de parrilla inclinada [17].....	18
Figura 2-10 Caldera de fluido circulante [17].....	18
Figura 3-1 Imagen de pellet.....	19
Figura 3-2 Etapas de fabricación de pellet. Fuente: elaboración propia.....	20
Figura 3-3 Proceso de elaboración de pellet [18].....	21
Figura 3-4 Análisis de cenizas de pellet Tojo N3 mediante XRF.....	22
Figura 3-5 Obtención del índice alcalino.....	23
Figura 3-6 Relación base-ácido.....	23
Figura 3-7 Obtención de la proporción de escoria.....	23
Figura 3-8 Obtención del índice de evaluación de la escorificación.....	24
Figura 4-1 Instalación experimental: Módulo de combustión (izquierda) y Tolva con pellet (derecha).....	25
Figura 4-2 Sistema de alimentación: Tolva.....	26
Figura 4-3 Sistema de alimentación: Tornillo sin fin.....	26
Figura 4-4 Admisión de aire primario.....	27
Figura 4-5 Admisión de aire secundario.....	28
Figura 4-6 Cámara de combustión abierta (izquierda) y cerrada (derecha).....	28
Figura 4-7 Termopares.....	29
Figura 4-8 Chimenea.....	30
Figura 4-9 Panel de control.....	30

Figura 4-10 Decapador.....	31
Figura 4-11 Impactador (izquierda) y escalas del impactador (derecha).....	32
Figura 4-12 Escalas del impactador tras un ensayo .....	32
Figura 4-13 Analizador de gases Servomex .....	33
Figura 4-14 Caja calefactora (izquierda) y caja calefactora con impactador (derecha).....	34
Figura 4-15 Posición de los elementos de la línea de medida de partículas. Fuente: elaboración propia .....	34
Figura 5-1 Hoja de datos antes y durante el ensayo [23] .....	36
Figura 5-2 Ventana principal de LabView.....	37
Figura 5-3 Tolva cargada con pellet .....	38
Figura 5-4 Entrada de pellet en la cámara de alimentación .....	39
Figura 5-5 Impactador dentro de la caja calefactora.....	40
Figura 5-6 Proceso de muestreo del impactador 13 escalas. Fuente: elaboración propia.....	40
Figura 6-1 Análisis inmediato. Porcentajes de los parámetros de medición en función del tipo de pellet .....	44
Figura 6-2 Análisis elemental. Porcentajes de los compuestos químicos en función del tipo de pellet .....	45
Figura 6-3 Composición de las cenizas de madera .....	46
Figura 6-4 Composición de las cenizas de Ulex .....	46
Figura 6-5 Composición de las cenizas de kiwi.....	46
Figura 6-6 Composición de las cenizas de retama.....	46
Figura 6-7 Gráfica sobre la estabilización de la planta en función de la T <sup>a</sup> de agua de entrada y salida en la caldera y la T <sup>a</sup> de los gases de escape .....	48
Figura 6-8 Evolución de la temperatura durante la combustión .....	48
Figura 6-9 Emisiones de NO en función de los distintos pellets y caudales de aire total.....	49
Figura 6-10 Emisiones de CO <sub>2</sub> en función de los distintos pellets y caudales de aire total.....	50
Figura 6-11 Emisiones de CO en función de los distintos pellets y caudales de aire total.....	50
Figura 6-12 Partículas totales emitidas representado por los mg/kW en función del caudal de aire total .....	51
Figura 6-13 Relación entre el porcentaje total de partículas emitidas y el diámetro de las mismas durante ensayo de 160 l/min de aire total .....	52
Figura 6-14 Relación entre el porcentaje acumulado de partículas y el diámetro de las mismas durante ensayo de 200 l/min de aire total .....	52
Figura 6-15 Relación entre el porcentaje acumulado de partículas y el diámetro de las mismas durante ensayo de 240 l/min de aire total .....	53
Figura 6-16 Masa total Fouling Adherido-Depositado en función del tipo de pellet .....	54
Figura 6-17 Masa total de slagging y ceniza en función del combustible empleado.....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Distintos tipos de pirólisis en función del valor de los parámetros [14] .....	14
Tabla 3-1 Grado de severidad según el color en los índices de deposición. Fuente: elaboración propia .....	23
Tabla 5-1 Tabla resumen de algunas de las variables más relevantes medidas durante el ensayo. Fuente: elaboración propia.....	35
Tabla 6-1 Criterio de clasificación para porcentajes de óxidos presentes en las cenizas .....	45
Tabla 6-2 Índices de deposición.....	47

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Contenido en humedad en base seca .....	11
Ecuación 2-2: Contenido en humedad en base humedad.....	11
Ecuación 3-1 Potencia de entrada. ....	23





## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 Introducción

Hoy en día se habla de un modelo energético caracterizado principalmente por un constante consumo de energía, que tiene su base en recursos finitos, principalmente combustibles fósiles. De ahí que se genere una gran incertidumbre sobre cómo tratar con la insostenibilidad económica, ambiental y social del modelo energético global. Es por ello necesario la invención y desarrollo de fuentes de energía renovables, tal y como se puede observar en los últimos años, existe un gran aumento de presupuesto para la inversión en infraestructuras de carácter renovable, para conseguir reducir entre otras cosas, la contaminación y a su vez lograr una independencia de aquellas fuentes de elementos finitos. [1]

### 1.2 Modelos de energía renovable y no renovable a nivel mundial

La energía de origen renovable es la cuarta fuente de energía más consumida a nivel global véase (Figura 1-1). En el año 2018 el consumo a nivel mundial de energía primaria de fuentes renovables fue del 7,1%. Se incrementó en un 0,4% el uso de estas fuentes renovables como consumo de energía primaria situándose en un 10,8% del total. En cambio, en la utilización de otros recursos como el petróleo disminuyó en 0,5 puntos porcentuales hasta colocarse en un 33,6% aunque pese a a la bajada se mantiene en el primer puesto. Otras de las dos fuentes que se sitúan tras el petróleo son el carbón y el gas natural, esta última con una pequeña subida hasta un valor porcentual del 23,9%.

Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2019

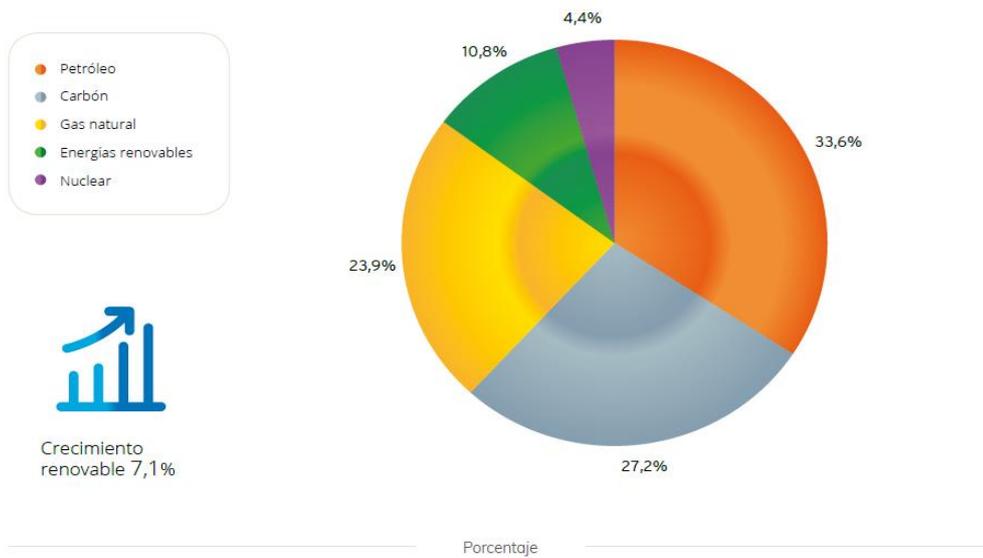


Figura 1-1 Consumo mundial de energía primaria en 2018 [2]

En su totalidad, el uso de combustibles fósiles representa el 84,7% del total de energía primaria consumida a nivel mundial. Todavía muy lejos de las renovables y la nuclear que apenas posee un 4,4% del total. [2]

Pese a este alto porcentaje de energía no renovable, hay que reseñar que como se ha podido observar en los 5 últimos años existe un aumento en la inversión anual en infraestructura renovable véase (Figura 1-2). Si bien es preciso puntualizar que esta misma en 2020 alcanzó un aumento de un 2%, lo que se transfiere a 303.000 millones de dólares según la BNEF. A pesar de la gran pausa económica producida por la pandemia COVID-19, los grandes inversores mundiales en deuda y capital no han dejado de lado a las renovables, llegando a invertir hasta 501.000 millones de dólares en el sector de la energía limpia.[3]

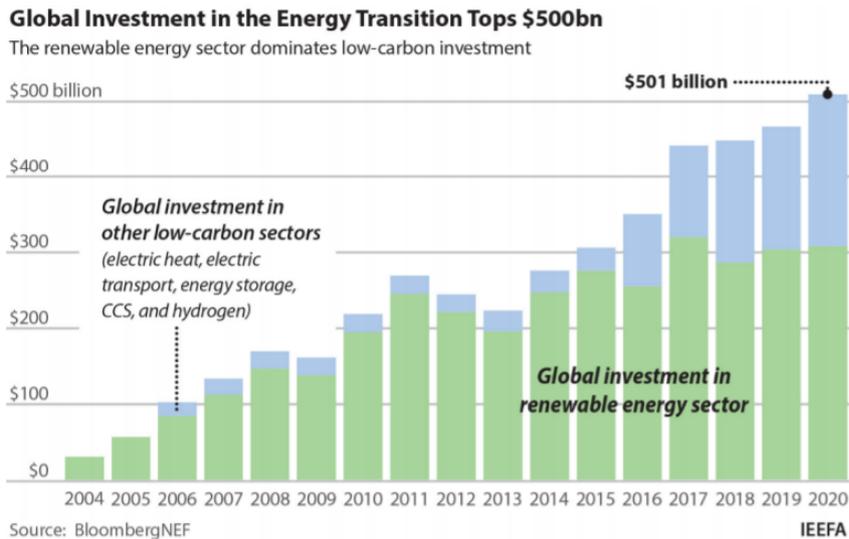


Figura 1-2 Inversión mundial en la transición energética [4]

### 1.2.1 Uso de la biomasa a nivel global

Una de las principales fuentes de energía renovable tiene su origen en el uso de la biomasa, además de ser el elemento principal que se va tratar en este trabajo. Por ello se hará hincapié en su importancia y evolución a nivel global, europeo y nacional.

La importancia que recibe esta fuente varía considerablemente según en qué país seleccionado, ya que en los países industrializados apenas representa un 3% de la energía total, sin embargo, en otros pertenecientes al continente africano, Asia o Latinoamérica se sitúa como la tercera parte del consumo energético (Figura 1-3).

Aproximadamente entre un 80 y un 90% es el porcentaje de uso de biomasa en países en vías de desarrollo, los cuales convierten a esta fuente de energía renovable en su principal medio para la obtención de energía. Tanto en el uso doméstico como en sectores industriales tradicionales y agrícolas como la fabricación de pan, sector textil, secado de tabaco, té, y fabricación de elementos de la construcción como el ladrillo. Mientras que el 10% restante a nivel mundial se transfiere a un 3% en países industrializados donde el uso de esta fuente se focaliza en la leña, para uso doméstico y la producción de electricidad y calor en la industria. [5]

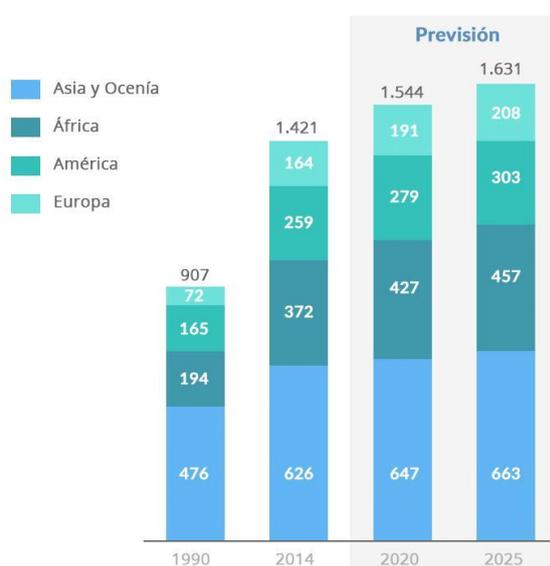
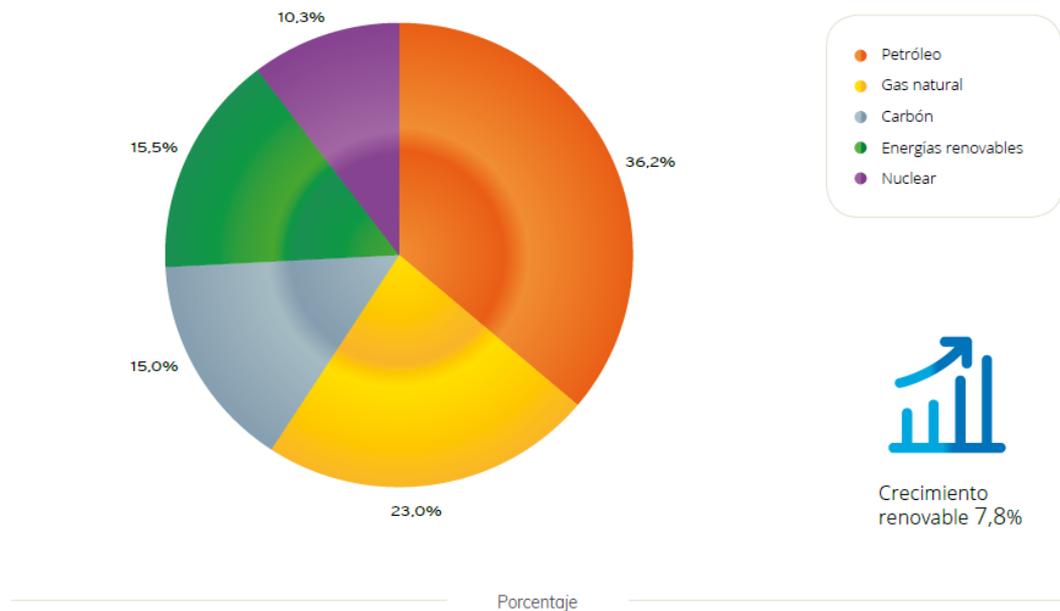


Figura 1-3 Evolución y proyecciones del consumo de biomasa a nivel mundial [6]

## 1.3 Modelos de energía renovable y no renovable en Europa

A la vista está (Figura 1-4) que al igual que ocurre a nivel mundial, en Europa el uso de la energía renovable se sitúa en un cuarto puesto con apenas un 15,5% de nivel porcentual, detrás de las no renovables compuesta por los combustibles fósiles. A pesar de ello, en el año 2018 se registró una subida del uso de las renovables de un 7,8% respecto al anterior año. Por lo tanto, las cifras porcentuales de las fuentes de energía más utilizadas son, el petróleo con un 36,2% seguido por el gas natural 23% y el carbón 15%. Por lo que es preciso concluir que existe una dependencia energética exterior muy alta entorno a un 55%. [2]

Fuente: BP Statistical Review of World Energy 2019

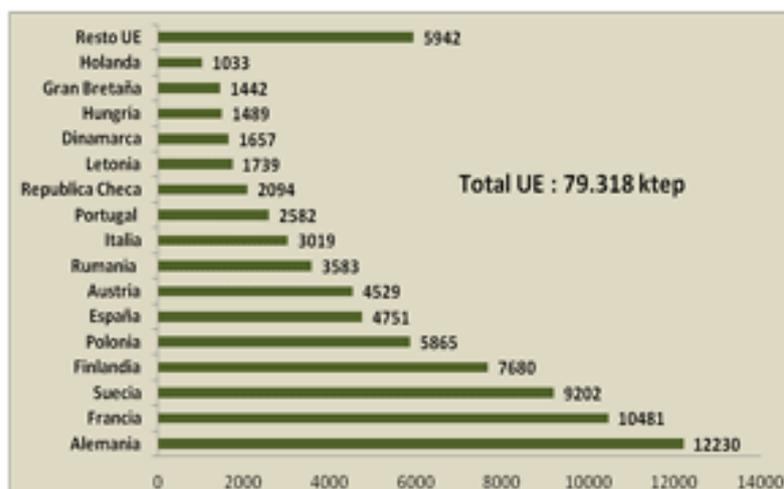


**Figura 1-4 Consumo de energía primaria en Europa en 2018 [2]**

En cuanto a presupuesto para la utilización de energía renovable la Unión Europea invierte alrededor de 118 millones de euros en 32 proyectos innovadores ubicados en 14 Estados miembros. Las distintas subvenciones apoyarán a estos proyectos para la introducción de tecnologías hipocarbónicas en el mercado industrial de gran consumo de energía, el hidrógeno, el almacenamiento de energía y las renovables. [7]

### *1.3.1 Uso de la biomasa a nivel europeo*

Actualmente en el continente europeo la biomasa representa el 60% de todo el consumo de energía renovable. Es la mayor fuente de energía renovable representando el 10,3% del consumo de energía total (Figura 1-5). Esta fuente de energía es indispensable en la transición ecológica para abandonar los combustibles fósiles en los sectores de la electricidad y la calefacción. El uso de la biomasa en Europa ha experimentado un aumento sin precedentes en las últimas décadas gracias al más eficiente aprovechamiento de los residuos y subproductos de las industrias forestales. La reducción de las emisiones de combustibles fósiles es un hecho real que está a la orden del día en las agendas de los principales países europeos. Hay que señalar que las emisiones producidas por la biomasa son menores además de no poseer el mismo poder dañino. Todo esto teniendo su principal forma de ser en el ciclo del carbono que poseen las fuentes derivadas de la biomasa. [8]



Producción de Energía primaria a partir de Biomasa sólida en la UE. 2010.

Figura 1-5 Producción de energía primaria de biomasa sólida en la UE en 2010 [8]

## 1.4 Modelos de energía renovable y no renovable en España

En España al igual que ocurre en el resto de países del mundo y Europa como se ha visto, se sustenta mayoritariamente por las fuentes de energía de origen fósil, véase (Figura 1-6) fundamentalmente petróleo y gas natural. Además, es preciso puntualizar la gran dependencia del petróleo del cual se importa más del 99%, destinando aproximadamente el 80% del mismo al sector del transporte. [9]

Si se centra la mirada en las energías renovables se verá que poseen una distribución desigual en España. Aunque si es reseñable el aumento de estas energías a lo largo de los últimos años, entorno a un 37%, haciendo verdadero hincapié en el sector eléctrico en el cual su integración por parte de España ha sido muy significativa.

En España la energía renovable aumento un 8,2% en 2018 hasta verse reflejada sobre el total de la energía primaria con el 13,9%, lo que la sitúa en el tercer puesto, como siempre detrás del petróleo con un 44,9% y el gas natural con un 21,1%. Con un valor porcentual aún menor se situaron otras fuentes como la nuclear con un 11,3% y el carbón con un 8,6%. [3]

Fuente: MITECO

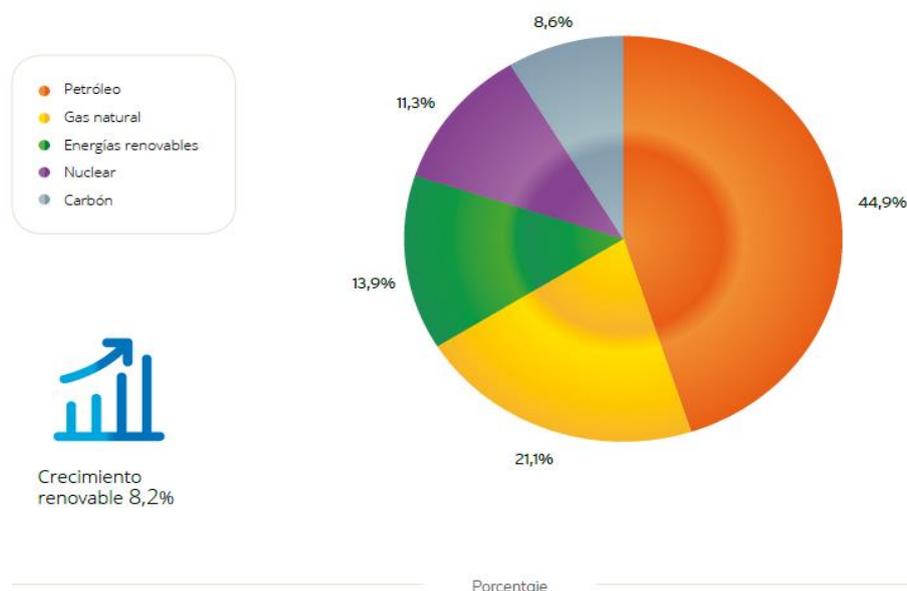


Figura 1-6 Consumo de energía primaria en España en 2018 [3]

España invirtió en torno a 1.900 millones en renovables en el tercer trimestre de 2018, 11 veces más que en 2017 y desde 2011 la cantidad más alta. Pero esto no es suficiente, el objetivo global para 2050, la neutralidad de carbono, por lo que los países deben fijar unos objetivos a largo plazo y unos presupuestos que les permita cumplir con lo acordado. En el caso de España, el ejecutivo ha calculado que harán falta unos 500.000 millones de euros, alrededor de un tercio del PIB para lograrlo. España ya ha comenzado la transición ecológica para cerrar las centrales térmicas de carbón, así como las nucleares. A pesar de ello, la dependencia del crudo sigue siendo muy alta. Sin embargo, se auguran grandes cambios en el país con la implantación cada vez mayor de la renovables. Es preciso mencionar que por la situación geográfica se cuenta con unas condiciones meteorológicas idóneas para algunas de ellas, como se ha podido observar recientemente en el año 2020 donde se cuenta con más de 2.500 horas de sol en algunas regiones del sur, unidas al ya importante establecimiento de la eólica, que brinda la oportunidad de registrar una cifra récord del 43,6% de la generación renovable, unos 11,6 puntos por encima de la cifra de 2019. [10]

### 1.4.1 Uso de la biomasa en España

España se encuentra en el tercer puesto a nivel europeo en recursos de biomasa forestal, por detrás de Suecia y Finlandia y el séptimo en términos per cápita. Traducido en otras palabras se sitúa entre los tres primeros en el ranking europeo de recursos de biomasa, pero a la cola en su uso térmico.

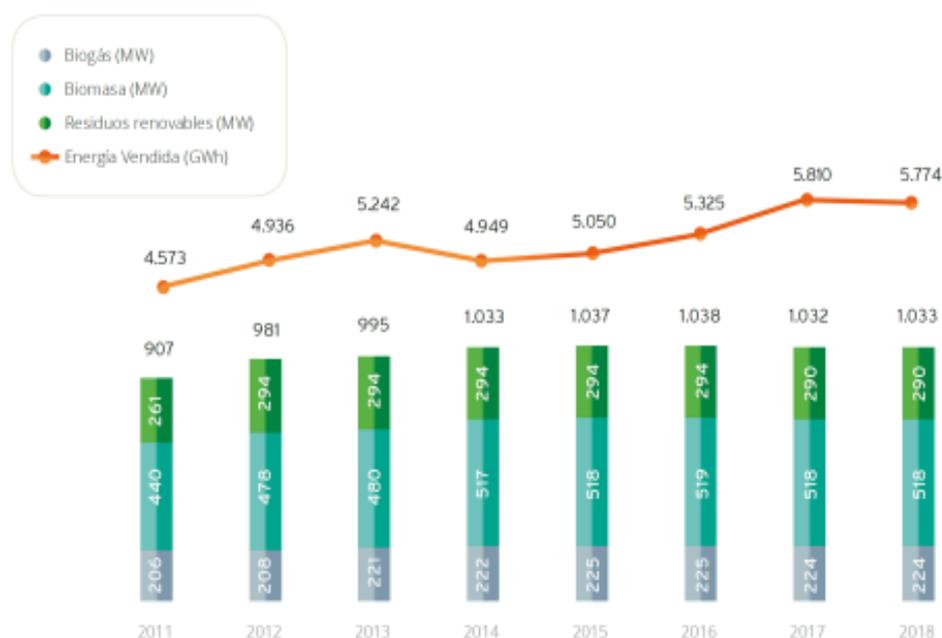


Figura 1-7 Biomasa, evolución de la potencia instalada y energía vendida [11]

En España se recogen unas condiciones climatológicas y forestales esenciales para la producción de biomasa, pero no en todos los lugares por igual, hay que destacar que las principales regiones para su obtención son Andalucía, Galicia y Castilla y León. Destacar el caso de Andalucía, región puntera en la obtención de energía eléctrica mediante biomasa, gracias a la gran presencia de industrias agroalimentarias lo que le ha permitido un incremento del uso de esta fuente de energía hasta representar cerca del 40% del uso de biomasa en España. Dicha región cuenta con aproximadamente 18 plantas de generación eléctrica mediante biomasa, que obtienen una capacidad total instalada de 208,70 MW. [12]

## **1.5 Objetivos**

El objetivo principal de este proyecto se basa en determinar los efectos en las emisiones de partículas y gases de una serie de combustibles sólidos experimentales procedentes de material vegetal, además de analizar los efectos en su composición, densidad energética y otras características relativas al material utilizado. Estos serán comparados con su homólogo original en ensayos parametrizados en una instalación de combustión de biomasa de laboratorio.



## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Biomasa

En esta sección se hará una descripción sobre la biomasa, aportando definiciones y puesto que es el material principal de este proyecto, el estudio se centrará en determinar cuáles son sus características principales, clasificación, ventajas e inconvenientes de su uso y métodos de procesamiento.

La biomasa consiste en materia orgánica la cual es utilizada como fuente de energía. Haciendo referencia a la Directiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, 'se define la biomasa como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos que poseen origen vegetal y animal'. Procedentes tanto de la silvicultura, la pesca, acuicultura o incluso de los residuos industriales y municipales siempre que posean un carácter biológico (Figura 2-1). Por lo tanto, la biomasa abarca un enorme conjunto de materias orgánicas que se caracteriza por su gran heterogeneidad, tanto en naturaleza como origen. [1]

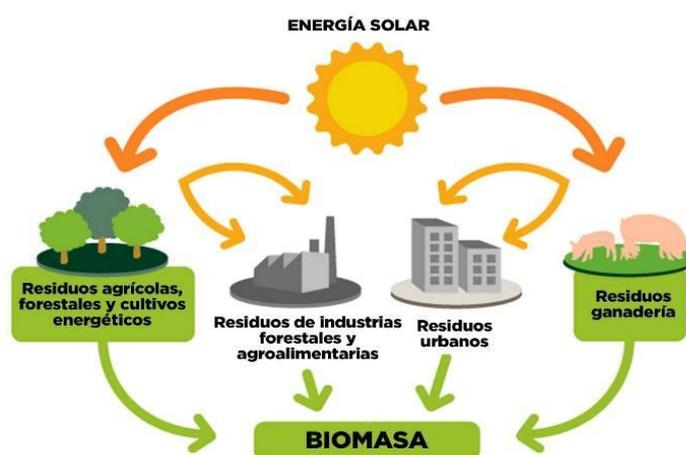


Figura 2-1 Ciclo de biomasa [6]

#### 2.1.1 Clasificación

A la hora de clasificar la biomasa se diferencian dos grandes grupos.

### 2.1.1.1 Según su origen

En este grupo se encuentran distintos tipos, desde biomasa natural, biomasa residual, biomasa de cultivos energéticos y de excedentes agrícolas.

- Biomasa natural: proveniente de la propia naturaleza sin que el ser humano intervenga en su producción. Son producidas por los propios ecosistemas naturales. Por ejemplo: hojas secas, ramas, leña, etc.
- Biomasa residual: proviene de la materia orgánica originada por la actividad humana o de vertidos denominados biodegradables. Puede encontrarse de manera húmeda o seca. Por ejemplo: serrín, huesos de aceituna o cáscaras de frutos secos, pajas de cereales, excedentes agrícolas, etc.
- Biomasa de cultivos energéticos: cultivos de especies cuyo destino principal y específico es la producción de biomasa para uso energético.
- Biomasa de excedentes agrícolas: aquellos excedentes agrícolas que no son utilizados para la alimentación, por lo que su uso exclusivo es para la generación de biomasa con fines energéticos. Pueden ser utilizados tanto como combustibles en plantas de generación eléctrica como transformados en biocombustibles.

### 2.1.1.2 Según su estado

En esta clasificación se distinguen tres formas distintas en las que se puede presentar la biomasa.

- Biomasa sólida: Encabeza las aplicaciones de bioenergía en todos los países. Este apartado incluye la madera y los residuos forestales, los residuos de las industrias de transformación de la madera y de la pulpa y el papel, los residuos agrícolas (paja) y los desechos de madera. Así como las podas, subproductos de la naturaleza agrícola, huesos de aceituna, serrín, etc. Además, incluye el pellet, elemento principal utilizado en el proyecto y del que se desarrollará sus principales características más adelante.
- Biomasa líquida: Aquellos que presentan una alta densidad energética y pueden quemarse con avanzadas técnicas de combustión sin apenas dejar residuo alguno ni sustancias nocivas. No obstante, son relativamente fáciles de transportar y almacenar. Se destacan biocombustibles como el bioetanol y el biodiesel.
- Biomasa gaseosa: Principalmente situada en los vertederos de residuos sólidos urbanos, los cuales son el resultado de la degradación anaeróbica biológica de materia orgánica, compuesta en este caso por una mezcla de metano y CO<sub>2</sub>.

## 2.1.2 Caracterización energética de la biomasa

A la hora de abordar este apartado en relación a la capacidad energética de la biomasa hay que tener en cuenta que su medición depende del poder calorífico del recurso en cuestión, aunque en casos como el de la biomasa residual húmeda o los biocarburantes, será en función del producto energético obtenido en su tratamiento.

El contenido calórico por unidad de masa es la energía que se libera en forma de calor cuando el combustible se quema completamente. Se pueden diferenciar dos tipos de calor, el poder calorífico inferior (PCI), es el calor de la combustión que no aprovecha la energía de condensación del agua, mientras el poder calorífico superior (PCS) aprovecha esta energía y por lo tanto, con la misma cantidad de combustible, se genera más calor, es decir, hace referencia a la cantidad de calor desprendido en una combustión.

En la siguiente imagen (Figura 2-2) se muestran algunos de los poderes caloríficos de diferentes recursos aprovechables en biomasa, según recoge el IDAE. [13]

Producto		PCS (kcal/kg) Humedad 0%	PCI a la humedad x (kcal/kg)			
			x	PCI	x	PCI
Leñas y ramas	Coníferas	4950	20%	3590	40%	2550
	Fronchosas	4600	20%	3331	40%	2340
Serrines y virutas	Coníferas	4880	15%	3790	35%	2780
	Fronchosas autóctonas	4630	15%	3580	35%	2600
	Fronchosas tropicales	4870	15%	3780	35%	2780
Corteza	Coníferas	5030	20%	3650	40%	2650
	Fronchosas	4670	20%	3370	40%	2380
Vid	Sarmientos	4560	20%	3280	40%	2310
	Ramilla de uva	4440	25%	2950	50%	1770
	Orujo de uva	4820	25%	3240	50%	1980
Aceite	Hueso	4960	15%	3860	35%	2810
	Orejillo	4870	15%	3780	35%	2780
Cáscaras frutos secos	Almendra	4760	10%	3940	15%	3690
	Avellana	4500	10%	3710	15%	3470
	Piñón	4930	10%	4060	15%	3830
	Cacahuete	4250	10%	3480	15%	3280
Paja de cereales	-	4420	10%	3630	20%	3180
	-	4420	30%	2700	-	-
Cascarilla de arroz		4130	10%	3337	15%	3150
Residuo de campo		4060	10%	3310	15%	3090

*Para el cálculo del PCI se considera un contenido de hidrógeno en base seca del 6%.*

*Fuente: IER / Biomasa. Manuales de Energías Renovables 5. IDAE. 1992.*

**Figura 2-2 Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa [13]**

Existen una serie de parámetros que influyen de manera directa en la evaluación energética de la biomasa.

### 2.1.2.1 Composición química

Los distintos tipos de biomasa están formados tanto por una parte orgánica, como por otra inorgánica y agua. Cuando se lleva a cabo un proceso de combustión, la parte orgánica es la que se oxida, mientras la inorgánica influye en el proceso de combustión formando posteriormente la ceniza o residuo sólido.

### 2.1.2.2 Contenido en humedad

Este término también recibe el nombre de humedad relativa, y se define como la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. En el caso de la biomasa, puede ser medida en base seca (h) o en base húmeda (H), de tal manera que se puede considerar la masa húmeda de la leña (Ph) y la masa seca (Po) habiendo sido obtenida tras el proceso de secado en una estufa, para eliminar el agua presente mediante evaporación. Por lo tanto, se obtendrían las siguientes relaciones:

$$h = \frac{Ph - Po}{Po}$$

**Ecuación 2-1: Contenido en humedad en base seca**

$$H = \frac{Ph - Po}{Ph}$$

**Ecuación 2-2: Contenido en humedad en base húmeda**

Es de vital importancia reducir todo lo posible el valor de la humedad, ya que cuando se quema la biomasa, es necesario evaporar el agua para evitar que afecte al proceso de combustión. Por lo que respecta a la mayoría de los procesos de conversión energética, si el valor de la humedad es superior al 30%, se haría necesaria la implementación de operaciones de secado y acondicionamiento previos. [1]

### **2.1.2.3 Porcentaje en cenizas**

Este parámetro viene a indicar la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de materia prima. Es necesario conseguir que el porcentaje en relación con la materia seca sea el menor posible.

### **2.1.2.4 Densidad aparente**

Indica el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta. Algunos combustibles presentan una elevada densidad aparente, esto ayuda a la relación de energía por unidad de volumen, debido a que se requiere menores tamaños de equipos y a su vez conseguimos incrementar el tiempo que transcurre entre cargas del equipo. Por otro lado, aquellas materias que presentan baja densidad necesitan un mayor volumen de almacenamiento y transporte. [1]

## *2.1.3 Ventajas e inconvenientes del uso de la biomasa*

Este tipo de fuente de energía presenta una serie de ventajas y desventajas como cualquier otra, las cuales se enumeran a continuación: [14]

### **Ventajas:**

- Posee un ciclo de dióxido de carbono neutro, por lo tanto, se sitúa como una energía limpia.
- Como ya se ha mencionado anteriormente la biomasa en ocasiones procede de materiales residuales que se quiere eliminar, por lo que se puede emplear tecnología de digestión anaerobia para el tratamiento de biomasa residual húmeda, la cual no solo elimina la carga contaminante, sino que reduce fuentes de olores molestos y elimina con totalidad los gérmenes y microorganismos patógenos. Posteriormente los fangos que resultan del proceso pueden ser utilizados como fertilizantes.
- Disminuye la dependencia externa de abastecimiento de combustibles.
- Ayuda a disminuir la erosión del suelo en tierras abandonadas, así como la degradación de la misma.
- En el ámbito económico, posee un coste menor que otras fuentes de energía. Incluso puede llegar a presentar coste nulo, ya que se utilizan residuos que de no ser utilizados serían desechados como basura.
- En cuanto a emisiones, no emite contaminantes nitrogenados ni sulfurados.
- Posee una gran capacidad de almacenamiento de manera que se puede establecer un suministro constante en el proceso de generación de energía.
- En el ámbito socioeconómico el procesamiento de algunos tipos de biomasa puede dar lugar a nuevos puestos de trabajo en el medio rural.

### **Inconvenientes:**

- En términos de rendimiento energético es menor que el de los combustibles tradicionales ya que las calderas aún no poseen el desarrollo definitivo, por lo que podrían optimizarse aún más.
- Otro problema de esta fuente de energía es la cantidad de humedad que puede acumular las materias primas, afectando directamente a su combustión y exigiendo un secado previo.
- La biomasa tradicional que utiliza madera como combustible fomenta la deforestación de bosques y efectos adversos sobre los mismos.

- Los medios de distribución de biomasa no están tan desarrollados como en el caso de los combustibles fósiles.

## 2.2 Procesos de conversión de la biomasa en energía

Se pueden diferenciar distintos procesos para el tratamiento de la biomasa, desde los más simples como la tala de árboles y su posterior quema, hasta otros más laboriosos como la conversión de azúcares de un cultivo en combustibles líquidos. A continuación, se muestra una imagen (Figura 2-3) con la clasificación de los distintos métodos de conversión de biomasa: [1]

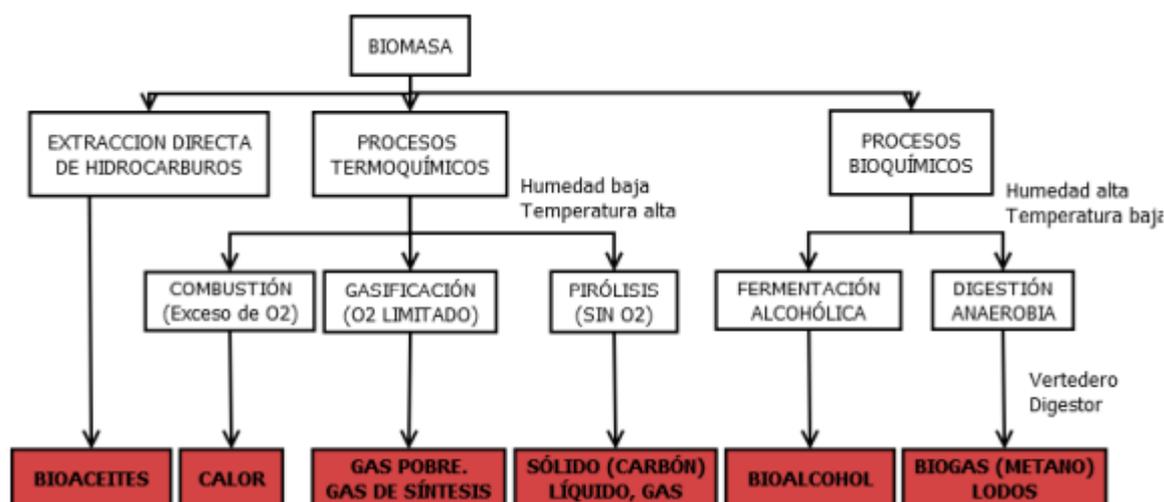


Figura 2-3 Procesos de conversión de biomasa en energía o en biocombustibles [1]

### 2.2.1 Extracción directa de hidrocarburos

Tanto los aceites vegetales como las grasas animales poseen la capacidad de transformación en una mezcla peculiar de hidrocarburos semejante al diésel a través de un proceso normalmente complejo denominado esterificación, además de eliminación de agua, transesterificación y por último se destila con metanol, de tal manera que se obtiene a su vez glicerina y jabón.

### 2.2.2 Procesos termoquímicos

Basados en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa.

- **Combustión:** este proceso se caracteriza por la oxidación de la materia prima por el oxígeno del aire. Tras la reacción se libera H<sub>2</sub>O y gases carbónicos (CO<sub>2</sub> y CO) y una cantidad de energía utilizable para la producción de calor ya sea en el ámbito doméstico en calefacciones o en la industria.
- **Pirólisis:** proceso de conversión termoquímica que convierte la biomasa en combustibles útiles mediante el calentamiento de la materia a una temperatura en torno a los 500°C y en ausencia de oxígeno. Si bien de este proceso se pueden obtener tres productos en estados distintos: bioaceites (líquido), biogás (gas) y biocarbón (residuo carbonoso). Los distintos mecanismos de pirólisis pueden encuadrarse en función de los parámetros en diferentes tipos como muestra la siguiente tabla (Tabla 2-1):

PIRÓLISIS	TIEMPO RESIDENCIA	VELOCIDAD CALENTAMIENTO	PRESIÓN BAR	TEMPERATURA °C MAX	PRODUCTO MAYORITARIO

Carbonización	Horas-días	Muy baja	1	400	Sólido
Convencional	5-30 min	Baja	1	600	Gas liq. y sólido
Fast	0.5-5 s	Muy alta	1	650	Líquido
Flash-líquido	< 1 s	Alta	1	< 650	Líquido
Flash-gas	< 1 s	Alta	1	> 650	Gas
Ultra	< 0.5 s	Muy alta	1	1000	Gas P. Químico
Vacío	2-30 s	Media	< 0.1	400	Líquido

Tabla 2-1 Distintos tipos de pirólisis en función del valor de los parámetros [14]

Una variante de la pirólisis es la pirólisis flash, la cual se lleva a cabo a una temperatura de 1000°C y por la cual se puede prácticamente afirmar que se trata de una gasificación casi total de la biomasa. Las instalaciones donde se lleva a cabo estos procesos se denominan gasógenos (Figura 2-4), lugares donde realizan tanto pirólisis como gasificación.

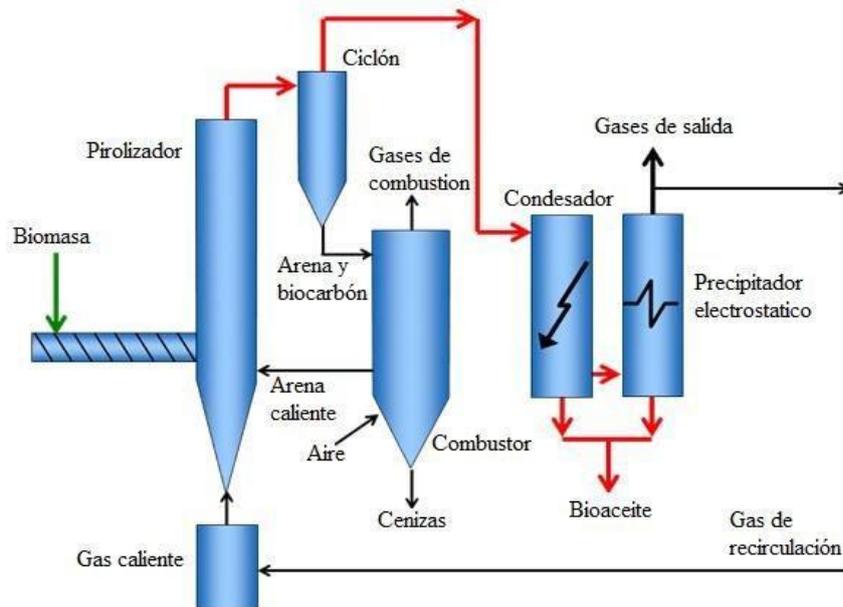


Figura 2-4 Esquema del reactor de pirólisis rápida en lecho circulante [15]

- **Gasificación:** proceso mediante el cual se lleva a cabo una conversión de la biomasa en un gas combustible, usando técnicas de oxidación parcial a temperaturas elevadas. Normalmente para la realización de esta operación se utiliza en torno de 1/5 a 1/3 de la cantidad requerida de oxígeno para la combustión completa. El producto obtenido, es un gas cuya capacidad calorífica va a depender del agente gasificante utilizado.

### 2.2.3 Métodos biológicos

- **Fermentaciones alcohólicas:** En este proceso se busca el almacenamiento de la energía en forma de hidratos de carbono por parte de las plantas, a partir de esto y en dependencia de qué tipo de biomasa se haya utilizado de partida para el proceso, se puede obtener alcohol por fermentación siguiendo una serie de etapas.

- **Fermentación metánica:** Se desarrolla una digestión anaerobia de la biomasa a través de bacterias. Este tipo de transformación de biomasa es ideal para aquella que contiene un alto porcentaje de humedad, véase un 75% o superior, normalmente proveniente de los residuos ganaderos y los lodos de depuradora de aguas residuales urbanas. [1]

## 2.3 Tipos de calderas de biomasa

A la hora de clasificar los tipos de calderas para la combustión de biomasa se verá que se dispone de diversas clasificaciones, algunas de ellas únicas para la biomasa y otras que pueden ser utilizadas en distintos ámbitos como se podrá ver a continuación:

### 2.3.1 Según la circulación del agua

Las calderas son equipos que están compuestos de diferentes elementos destinados a la producción de vapor de agua mediante la aplicación de energía calorífica en su fase líquida. En cuanto a su funcionamiento se pueden diferenciar dos tipos véase (Figura 2-5):

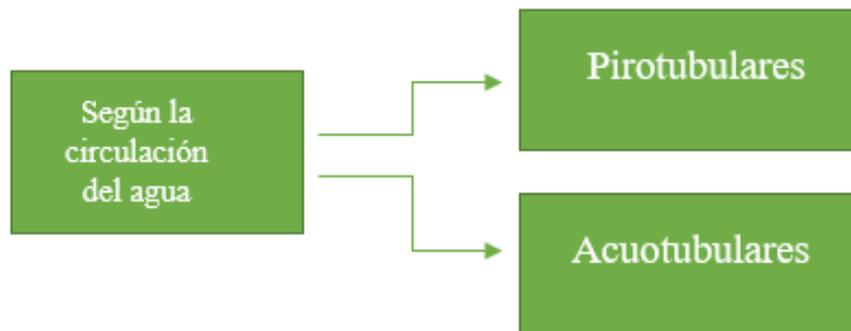


Figura 2-5 Tipos de calderas según la circulación del agua. Fuente: elaboración propia

#### 2.3.1.1 Pilotubulares

Son aquellas por las que el agua circula en todo momento por el exterior de los tubos que posee, mientras el humo de combustión lo hace por el interior de estos (Figura 2-6). Actualmente alcanzan presiones de hasta 30 bares, y temperaturas de 300°C (vapor sobrecalentado), obteniendo una producción de vapor en torno a las 55 t/h, con entre uno o dos hogares dependiendo a su vez de la potencia, según se indica en la normativa europea EN12953. [16]

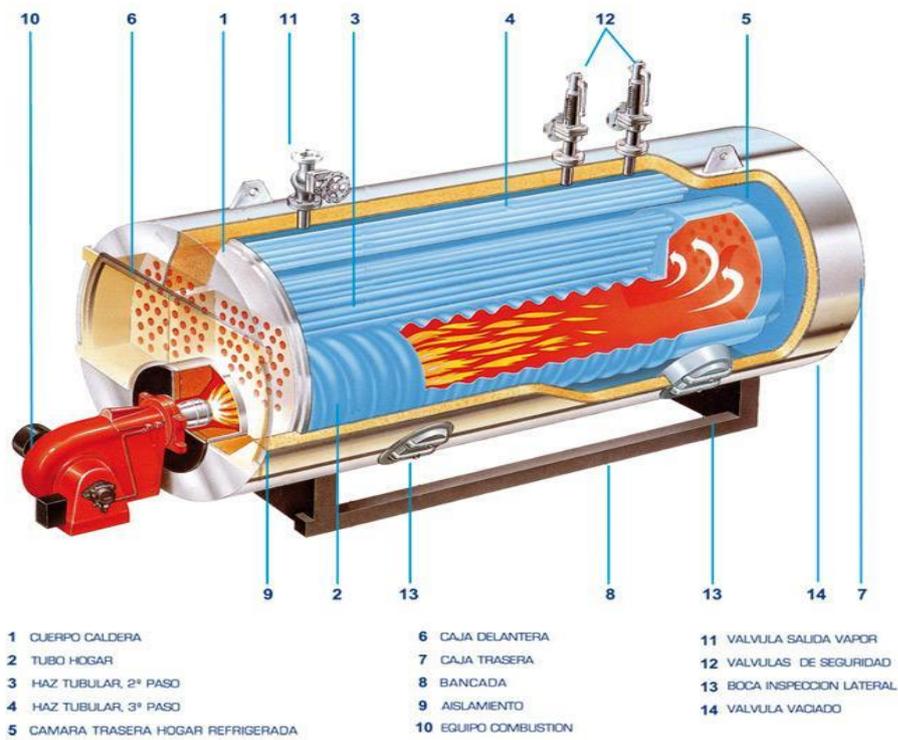


Figura 2-6 Caldera de vapor pirotubular [16]

### 2.3.1.2 Acuotubulares

Este tipo de calderas se caracterizan por un funcionamiento en el cual los humos producidos por la combustión circulan por el exterior de los tubos mientras el agua lo hace por el interior de los mismos. En cuanto a potencia y presión superan con creces a las pirotubulares, obteniendo presiones de hasta 350 bar, temperaturas de 600°C y producciones de vapor de hasta 2.000 t/h. Para la fabricación de estas calderas se tendrá en cuenta la normativa europea en vigor EN12952. Este tipo de calderas permiten adaptarse mejor a consumos repentinos o esporádicos gracias al reducido contenido de agua (Figura 2-7). [16]



Figura 2-7 Caldera de vapor acuatubular [16]

### 2.3.2 Según la forma de combustión

En función del tipo de combustible que se utilice, además de la tecnología para el quemado y la recuperación energética de los combustibles se podrán clasificar las distintas calderas. Se puede diferenciar entre: lecho fijo o parrilla y lecho fluidizado (Figura 2-8).

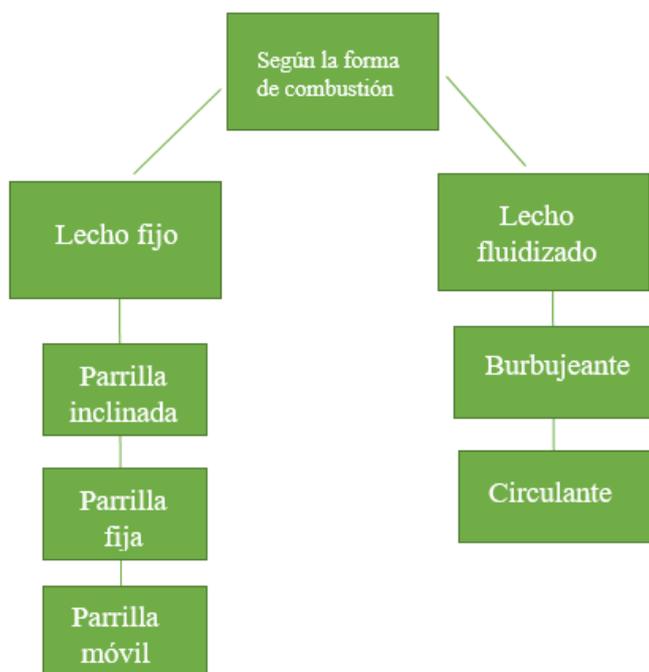


Figura 2-8 Clasificación de las calderas en función de la forma de combustión. Fuente: elaboración propia

### 2.3.2.1 Caldera de lecho fijo

Se trata de la caldera más sencilla, económica y popular, ya que aproximadamente el 90% de las calderas son de este tipo debido a su gran fiabilidad y bajos costes (Figura 2-9).

Se compone de varias parrillas por las que avanza la biomasa en función de la demanda requerida. En un principio se comienza a inyectar aire por debajo de las parrillas para refrigeración y poder comenzar a suministrar comburente, mientras que por arriba se realiza una nueva inyección de aire para comenzar con la combustión de los volátiles. Finalmente existe una zona semejante a un cenicero donde se deposita la ceniza residual que no se ha podido quemar, pudiéndose utilizar como abono.

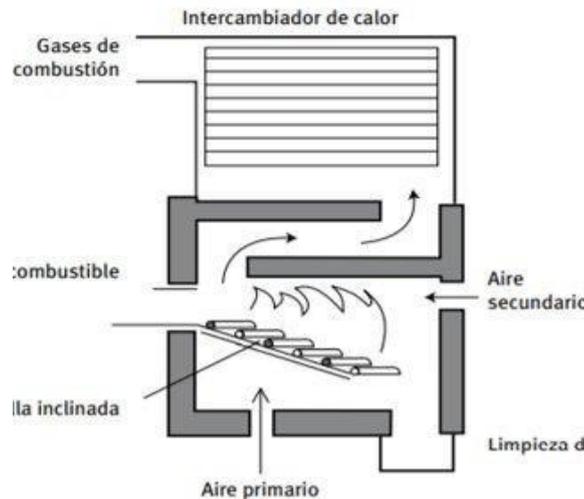


Figura 2-9 Caldera de parrilla inclinada [17]

### 2.3.2.2 Caldera de lecho fluidizado

En este modelo de calderas la combustión se produce a través de inyección de aire de manera que se consigue el movimiento de arena caliente que varía su densidad para controlar la temperatura de la caldera (Figura 2-10).

La composición de aire y arena funciona como un líquido situándose por debajo de la masa de mayor densidad. En el momento que la biomasa se ha quemado, los residuos caen por debajo al tener una densidad mayor. Esta tecnología es más versátil, al permitir quemar una amplia gama de combustibles con gran cantidad de humedad (más de 50%), además de presentar menos emisiones y es en general más eficiente. [17]

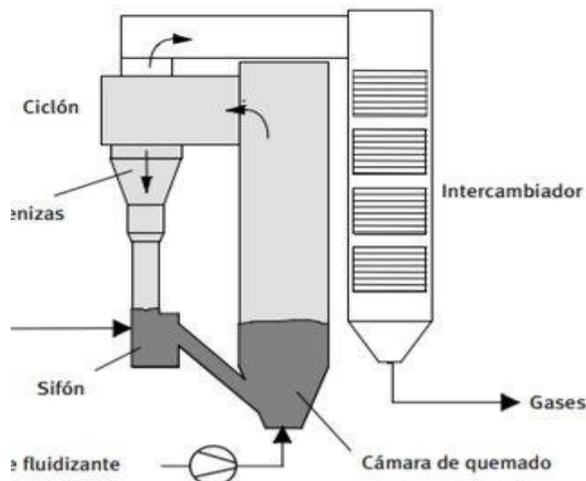


Figura 2-10 Caldera de fluido circulante [17]

## 3 EL COMBUSTIBLE

### 3.1 Combustible

En este apartado se dará paso a la descripción del tipo de combustible que se va a utilizar en el proyecto, así como sus características, composición, proceso de fabricación y demás aspectos importantes para su uso.

#### 3.1.1 Pellet

El pellet conforma un producto totalmente natural, sin ningún aditivo, catalogado dentro de la biomasa sólida, el cual es formado por cilindros de reducido tamaño elaborados a partir de serrín natural seco (Figura 3-1). Posee un gran poder calorífico debido a la presión a la que está sometido dicho serrín, de esta manera le hace obtener una composición compacta, dura y densa.



Figura 3-1 Imagen de pellet

En el presente proyecto explicado a continuación se llevará a cabo un análisis del comportamiento de pellets como combustible en una instalación experimental.

La conversión de recursos biomásicos en pellets es actualmente la forma más económica de obtener un combustible con una densidad energética elevada y una calidad constante. Además, su uso puede ser empleado tanto para la generación de calor como para la de electricidad.

#### 3.1.2 Proceso de fabricación del pellet

El mecanismo llevado a cabo para la fabricación de pellet posee diferentes etapas en las cuales la madera es sometida a pre-tratamientos y post-tratamientos con el fin de obtener una mayor calidad véase (Figura 3-3). A continuación, se muestra una imagen (Figura 3-2) con las fases y su posterior explicación:



Figura 3-2 Etapas de fabricación de pellet. Fuente: elaboración propia

- **Recepción de las materias primas:** Los pellets son obtenidos a partir de materias primas de origen orgánico o en su defecto de residuos y/o subproductos agroforestales principalmente de la industria de la madera. En estas hay que destacar la gran producción de serrín limpio y pequeños bloques, así como astillas de madera en su proceso productivo. A la hora de fabricar pellet, estos serían la fuente ideal para su producción. A pesar de ello, debido a la enorme demanda en el mercado actual, se está fabricando directamente por parte de algunas fábricas con árboles maderables.
- **Molido:** La materia de la que se parte tiene que pasar un proceso de molido para obtener el tamaño correspondiente, aproximadamente unos 3 milímetros. Existe una gran variedad de maquinaria. Si se da el caso de tener que tratar con una biomasa grande y densa, como es el caso de la madera, en primer lugar, pasará por una trituradora y posteriormente por un molino que reducirá su tamaño al deseado. En cambio, el material menos denso y pequeño como la paja, directamente puede traspasar el molino.
- **Control de humedad:** Este proceso es indispensable para asegurar la calidad final del pellet producido. El porcentaje de humedad debe ser mínimo, aunque siempre depende del tipo de materia prima. En el caso de la madera debe rondar en torno al 15%. Entre los métodos para eliminar la humedad se puede destacar el secado o insuflado de aire caliente a los materiales. Sin embargo, esto no significa que haya que eliminar toda al completo, de hecho, en ocasiones se puede dar que sea necesario la inyección de vapor o agua en los lotes de materias primas por insuficiencia de la misma.
- **Extrusión/Pelletización:** Es la etapa donde tiene lugar la creación del pellet. El material anteriormente tratado se introduce en un extrusionador, donde es comprimido y pasado por una boquilla agujereada o troquel. Este proceso se realiza aplicando unas altas temperaturas y presiones, las cuales favorecen a que las partículas de la biomasa se fusionen en una masa sólida con forma de cilindro. A medida que van saliendo por los troqueles, una cuchilla los corta aportándole el tamaño deseado. Dependiendo del tipo de biomasa, ésta funcionará mejor o peor, es por ello que en ocasiones se realizan combinaciones de materias primas ajustándose las condiciones de funcionamiento de las máquinas. De esta manera se busca la obtención de los pellets lo más uniforme posible, aunque si fuese necesario también cabe la posibilidad de añadir aglomerantes evitando así la disgregación.
- **Acondicionamiento:** Una vez se encuentre el pellet recién salido del extrusionador, debe ser sometido a un enfriamiento y secado, ya que poseen altas temperaturas, alrededor de 150°C y una textura muy blanda. Este proceso se lleva a cabo aplicando una corriente de aire a medida que llegan a una bandeja receptora.

- **Empacado:** Tras ser sometidos al proceso de enfriamiento y poseer un bajo contenido en humedad (no más de 8%), el pellet es envasado en bolsas de distinta capacidad o almacenado para su posterior venta. Siempre y cuando las condiciones de almacenamiento sean las adecuadas y se mantenga control sobre la humedad, estos pueden permanecer almacenados de manera indefinida sin que sufran deterioro. [18]

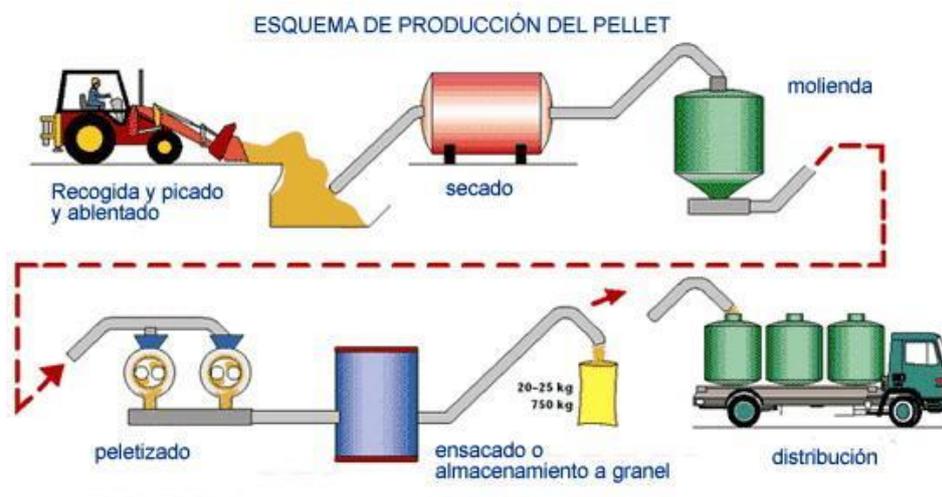


Figura 3-3 Proceso de elaboración de pellet [18]

### 3.1.3 Caracterización del combustible empleado

En función del combustible empleado para cada ensayo se van a tener en cuenta unos parámetros que van a caracterizar al pellet utilizado.

#### 3.1.3.1 Análisis inmediato

Hace referencia al porcentaje de una serie de parámetros véase humedad, compuestos volátiles, carbono fijo y cenizas. Estos pueden afectar de diferentes maneras al ensayo:

- La humedad influye directamente en las posibles pérdidas de energía durante la combustión por evaporación.
  - Lo volátiles son un elemento clave para el encendido ya que, a mayor concentración de los mismos, se verá facilitado el inicio de la llama. En relación con esto, un bajo porcentaje de volátiles puede inferir en que se tenga que aumentar la cantidad de aire secundario para favorecer el desarrollo de la combustión.
  - El carbono fijo guarda una estrecha relación con el poder calorífico del combustible.
  - Las cenizas son un problema para la combustión por lo que es necesario reducir al máximo el porcentaje de las mismas.
- **Método de determinación:** los parámetros del análisis inmediato se determinan mediante un protocolo de tratamiento de la muestra en una termobalanza, sometiéndola al ciclo térmico siguiente:
1. Calentamiento hasta 105 °C en atmósfera inerte. → Humedad
  2. Calentamiento en atmósfera inerte hasta los 550 °C. → Volátiles
  3. Se mantiene esta temperatura durante 60 minutos en una atmósfera oxidante. → Carbono fijo.
  4. El residuo sólido que queda al finalizar el tratamiento. → Cenizas

### 3.1.3.2 Análisis Elemental

En este análisis se recogerá la composición química elemental del pellet a emplear en el ensayo. Incluye diferentes compuestos entre ellos el contenido en carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre. Este análisis se tendrá en cuenta a la hora de diseñar la caldera, ya que influye directamente en cálculo de la temperatura de la llama.

La Unidad de Análisis Elemental es llevada a cabo en el CACTI (Centro de Apoyo Científico y Tecnológico a la Investigación) siguiendo para su determinación la norma UNE-EN ISO16948:2015 [19] y contando con:

Microanalizador CHNS: Permite el análisis del contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre (C, H, N, S) presentes en una amplia gama de muestras. El método analítico se basa en la oxidación completa e instantánea de la muestra mediante una combustión "flash" que convierte todos los compuestos orgánicos e inorgánicos en productos de combustión. Los gases resultantes de la combustión son reducidos y posteriormente transportados, utilizando el gas portador (He), a una columna cromatográfica. En éste se produce la separación de los diferentes gases, que finalmente pasan por un detector de conductividad térmica (T.C.D.) que da una señal proporcional a la concentración de cada uno de los componentes individuales de la mezcla. El analizador tiene un rango de medida de 100 ppm al 100% de cada uno de los elementos, con un límite de detección de 10 ppm. En 12 minutos, se pueden analizar los contenidos de C, N, H y S de una muestra. [20]

### 3.1.3.3 Análisis de Cenizas

Las cenizas disminuyen el poder calorífico, reducen la temperatura de combustión y dificultan la transmisión de calor. Funden a temperaturas relativamente bajas formando escorias perjudiciales para los materiales refractarios, el hecho de que fundan es más perjudicial en hogares con parrillas, pues la degradan al tiempo que la taponan originando una combustión irregular por disminución del tiro.

En este caso se llevará a cabo un análisis de todos los elementos presentes en las cenizas de la biomasa, según la norma UNE-EN ISO 16967:2015 [19], obteniéndose una tabla de este tipo véase (Figura 3-4):

Análisis de cenizas de pellet Tojo N3 mediante XRF					
Elemento	M1	M2	M3	PROMEDIO	
	mg elemento/kg pellet seco	% de elemento sobre pellet			
Al	671,9			671,9000	0,0672
K	4120			4120,0000	0,4120
Ca	2772			2772,0000	0,2772
Mg	1100			1100,0000	0,1100
Si	1795			1795,0000	0,1795
S	843,1			843,1000	0,0843
Fe	684,7			684,7000	0,0685
Mn	342,4			342,4000	0,0342
Cl	559,6			559,6000	0,0560
P	431,6			431,6000	0,0432
Na	1790			1790,0000	0,1790
Sr	215			215,0000	0,0022
Ti	55,8			55,8000	0,0056
Zn	40,8			40,8000	0,0041
Rb	53,25			53,2500	0,0053
Ni	4,34			4,3400	0,0004
Cr	5,77			5,7700	0,0006
Cu	15,6			15,6000	0,0016
Zr	0			0,0000	0,0000
Ba	0			0,0000	0,0000
Total				15307,3600	1,5307

Óxido	Mol O	Mol otro	% de óxido sobre pellet seco	% óxidos sobre cenizas
Na <sub>2</sub> O	1	2	0,2413	10,257
MgO	1	1	0,1624	7,754
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	2	0,1270	5,397
SiO <sub>2</sub>	2	1	0,3840	16,324
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5	2	0,0989	4,204
SO <sub>3</sub>	3	1	0,2105	8,949
Cl		1	0,0560	2,379
K <sub>2</sub> O	1	2	0,4963	21,098
CaO	1	1	0,3879	16,488
TiO <sub>2</sub>	2	1	0,0093	0,396
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	2	0,0008	0,036
MnO	1	1	0,0442	1,879
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	2	0,0979	4,161
NiO	1	1	0,0006	0,023
CuO	1	1	0,0020	0,083
ZnO	1	1	0,0051	0,216
Rb <sub>2</sub> O	1	2	0,0058	0,248
SrO	1	1	0,0025	0,108
ZrO <sub>2</sub>	2	1	0,0000	0,000
BaO	1	1	0,0000	0,000
Total			2,3524	100,0000

Figura 3-4 Análisis de cenizas de pellet Tojo N3 mediante XRF

### 3.1.3.4 Determinación del poder calorífico y la potencia de entrada

Se cuenta con dos tipos de poderes caloríficos (2.1.2). En este caso el asunto se centrará en la determinación del PCI, la cual es llevada a cabo siguiendo la norma UNE-EN ISO 18125:2018, mediante el uso de una bomba calorimétrica. [21]

En este caso el PCI será necesario para el cálculo de la potencia de entrada en la caldera, siguiendo la siguiente relación:

$$\text{Potencia de entrada} = \text{PCI} \times \text{Flujo másico (masa de combustible consumida)}$$

**Ecuación 3-1 Potencia de entrada.**

### 3.1.3.5 Índices de deposición

Otro de los parámetros importantes para los análisis serán los índices deposición, estos nos permiten predecir la tendencia de un combustible a formar escorias (slagings), al depositarse en las zonas de intercambio de calor e incluso existe aquellos que ayudan a predecir la severidad frente a la corrosión.

A continuación, se mostrarán cuatro imágenes (Figura 3-5) (Figura 3-6) (Figura 3-7) (Figura 3-8) donde se recoge las fórmulas específicas para obtener estos índices en cada uno de los combustibles empleados. [22]

Se han empleado tres colores para definir el grado de severidad en cada índice, de la siguiente manera véase (Tabla 3-1):

Verde <span style="color: green;">●</span>	Bajo o nulo
Amarillo <span style="color: yellow;">●</span>	Medio o probable
Rojo <span style="color: red;">●</span>	Alto o certero
Rojo <span style="color: red;">●●</span>	Muy alto

**Tabla 3-1 Grado de severidad según el color en los índices de deposición. Fuente: elaboración propia**

Alkali Index		
$\frac{1}{\text{PCI} \left[ \frac{\text{GJ}}{\text{kg}} \right]} \cdot \% \text{cinza}_{\text{fuel seco}} \cdot (\% \text{K}_2\text{O}_{\text{cinza}} + \% \text{Na}_2\text{O}_{\text{cinza}})$		
0 < x < 0,17	No fouling	<span style="color: green;">●</span>
0,17 < x < 0,34	Probable fouling	<span style="color: yellow;">●</span>
x > 0,34	Certain fouling	<span style="color: red;">●</span>

**Figura 3-5 Obtención del índice alcalino**

Base to Acid Ratio	
$R_{b/a} = \frac{\% \text{Fe}_2\text{O}_3 + \% \text{CaO} + \% \text{MgO} + \% \text{K}_2\text{O} + \% \text{Na}_2\text{O} + \% \text{P}}{\% \text{Si} + \% \text{Ti} + \% \text{Al}}$	
No consensus about how this ratio reflects slagging probability	
Reflected here is the Teixeira et al. Criterium	

**Figura 3-6 Relación base-ácido**

Slag Ratio		
$S_R = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3 + \% \text{CaO} + \% \text{MgO}}$		
SR > 72	Low slagging	<span style="color: green;">●</span>
72 < SR < 65	Medium slagging	<span style="color: yellow;">●</span>
SR < 65	High slagging	<span style="color: red;">●</span>

**Figura 3-7 Obtención de la proporción de escoria**

Fouling index			
$Fu = \left(\frac{B}{A}\right) \cdot (Na_2O + K_2O)$			
Fu<0.6	Low fouling		●
0.6<Fu<40	High		●
Fu>40	Extremely high		● ●

Figura 3-8 Obtención del índice de evaluación de la escorificación

## 4 INSTALACIÓN

### 4.1 Descripción de la instalación

Para la realización de los ensayos se va a disponer de una caldera experimental en la que se quemará el pellet anteriormente descrito y posteriormente se analizará los datos obtenidos. Esta instalación dispone de tres partes diferenciadas dentro de la misma: sistema de alimentación, quemador y panel de control, además de unos dispositivos auxiliares y de medición.

Cada una de estas partes desarrollan una función esencial para el correcto funcionamiento de la instalación, es decir una correcta combustión. Para que estas funciones se lleven a cabo evitando cualquier tipo de fallo las tres zonas señaladas se encontrarán separadas entre ellas por planchas forradas en cinta de aluminio, de esta manera consiguen cierto aislamiento entre las tres. [23]

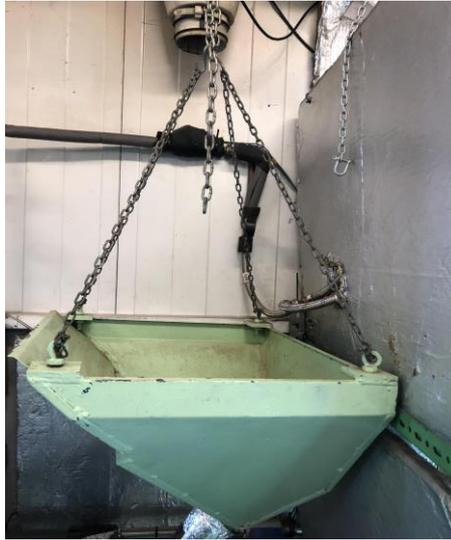


Figura 4-1 Instalación experimental: Módulo de combustión (izquierda) y Tolva con pellet (derecha)

#### 4.1.1 Sistema de alimentación

Consiste en una tolva (Figura 4-2) la cual funciona como almacenamiento y soporte del combustible empleado para el ensayo. Esta posee una estructura metálica y forma de cuña que se sustenta mediante unas cadenas conectadas a una célula de carga. Así mismo esta célula se encuentra conectada con el panel de control el cual posee un monitor que muestra en todo momento el peso del combustible que hay en la tolva.

Este sistema de alimentación posee también un tornillo sin fin (Figura 4-3) cuya función principal es la adición de pellet extraído de la tolva a la cámara de combustión. Este es accionado por un motor trifásico y manejado desde el cuadro de mandos donde se puede escoger y controlar en todo momento la cantidad de combustible que se quiere suministrar al quemador. Posee configuraciones diferentes, desde la adición de pellet por ciclos, como la adición en continuo. En la unión de tolva-tornillo se encuentra presente un mecanismo de extracción de gases de retorno para evitar la contaminación del ambiente que rodea dicha instalación.



**Figura 4-2 Sistema de alimentación: Tolva**



**Figura 4-3 Sistema de alimentación: Tornillo sin fin**

#### *4.1.2 Quemador*

Se trata de un quemador de lecho fijo, por lo que la biomasa añadida se dispone sobre una rejilla y no existe arrastre. Ocupa la posición principal de la instalación, con el sistema de alimentación a su izquierda y el panel de control a la derecha. Es el lugar donde tendrá lugar la combustión, objeto principal del ensayo. Además, este se sitúa sobre la bancada y está rodeado de revestidos de aluminio que permiten el funcionamiento evitando la exposición a las altas temperaturas.

#### 4.1.2.1 Cámara de admisión del combustible

Se define como la parte que une el sistema de alimentación con el quemador. Se encuentra incluido en el cuerpo macizo del quemador y posee una rejilla sobre la que descansa el pellet dosificado por el dispositivo de tornillo sin fin.

##### 4.1.2.1.1 Admisión de aire primario

En la parte inferior del quemador, y apoyado directamente sobre la bancada, se encuentra el módulo de entrada de aire primario (Figura 4-4). Este aire entra por la parte trasera del módulo y va a la parte superior, donde se sitúa la cámara de combustión. Cuenta con un ventilador que absorbe y pone en movimiento el aire procedente del ambiente del local dirigiéndolo hacia la cámara de combustión. Este aire atraviesa la rejilla sobre la que descansa el pellet. La función principal de este aire no es otra que favorecer la oxidación de la materia orgánica presente en el combustible.



Figura 4-4 Admisión de aire primario

##### 4.1.2.1.2 Admisión de aire secundario

Este módulo se encuentra encima de la cámara de combustión (Figura 4-5) y cuenta con su correspondiente ventilador de aire secundario. Tanto esta unidad como la mencionada anteriormente están controladas por el panel de control. Esta entrada de aire permite completar la oxidación de las sustancias intermedias que se han ido formando gracias al efecto del aire primario, es decir, contribuye a reducir los inquemados de tal manera que se mejora la eficiencia de la combustión.



**Figura 4-5 Admisión de aire secundario**

#### **4.1.2.1.3 Cámara de combustión**

Es la zona donde se lleva a cabo la combustión del pellet (Figura 4-6). En su parte inferior se sitúa la parrilla, plancha inclinada de acero inoxidable agujereada donde se deposita el combustible. En esta parte de la instalación se sitúan tres termopares (Figura 4-7), para controlar las altas temperaturas causadas por la combustión, el primer termopar se encuentra a 24 cm por encima de la cámara de admisión y los dos siguientes están dispuestos a 12 cm del anterior. Además, posee una puerta extraíble que se retira para limpiarla al finalizar su uso y poder retirar las cenizas formadas durante el ensayo.



**Figura 4-6 Cámara de combustión abierta (izquierda) y cerrada (derecha)**



**Figura 4-7 Termopares**

#### **4.1.2.1.4 Cenicero**

En la parte inferior de la instalación se sitúa un recipiente en el cual se depositan las cenizas que van cayendo por los agujeros de la parrilla durante el proceso de combustión. Esta pieza se puede desacoplar para vaciarla y limpiarla tras la realización de un ensayo.

#### **4.1.2.1.5 Intercambiador de calor**

Este elemento se encuentra situado sobre la entrada de aire secundario posee una forma tubular y mediante el mismo fluye el agua que se busca calentar, similar a una caldera convencional. Sobre su superficie es donde se va llevar a cabo el estudio de las deposiciones y partículas adheridas.

#### **4.1.2.1.6 Chimenea**

Su función principal es expulsar los gases producidos en la combustión (Figura 4-8). Esta cuenta con un extractor que permite aspirar aire del exterior y mezclarlo con el gas de combustión, esta manera consigue enfriar los gases para evitar que salgan a altas temperaturas. Así como también dispone de un termopar que registra las temperaturas alcanzadas presentándolo en una pantalla en el panel de control. En la tubería de la chimenea se disponen dos salidas, una de ellas conecta directamente con el impactador, para la recogida de muestras y su posterior análisis, mientras que la otra se utiliza para la conexión con el analizador de gases.



**Figura 4-8 Chimenea**

#### *4.1.3 Panel y elementos de control*

Esta parte de la instalación será la encargada de controlar todos aquellos parámetros que sean susceptibles de variación a lo largo de un experimento, además de proporcionarnos otros que sean importantes en términos de la combustión (Figura 4-9). Posee distintas funciones como las mencionadas a continuación:

- Selección de velocidad del ventilador extractor de humos.
- Temperatura de agua de refrigeración.
- Temperatura de gases a la salida de la chimenea.
- Indica la masa de pellet que hay en la tolva.
- Caudal de aire primario y secundario.
- Dosificación de los pellets, controla la alimentación, puede estar en modo alimentación, vaciado o parado.



**Figura 4-9 Panel de control**

Además del panel de control, se dispone de otros elementos de control que muestran a usuario más información sobre ensayo:

1. Caudalímetros: Dispositivos que muestran el caudal de las corrientes de trabajo, tanto para el agua utilizada en la refrigeración como para las entradas de aire primario y secundario.
2. Manómetro: Permite medir la presión del circuito de agua de refrigeración, el cual debe encontrarse a 3 bares de presión. En el caso de obtener un aumento de la misma, se regulará vaciándolo.

#### 4.1.4 Dispositivos auxiliares y de medición

Existen una serie de elementos auxiliares y de medición de diferentes parámetros durante el ensayo que serán descritos en el presente apartado.

##### 4.1.4.1 Encendedor de aire o decapador

Este instrumento (Figura 4-10) permite realizar el encendido del pellet cuando éste se encuentra en la cámara de combustión, expulsando aire a una temperatura de 660°C. Su empleo debe ir acompañado de medidas de seguridad como la utilización de guantes y mantener una distancia prudencial de la cámara de combustión.



Figura 4-10 Decapador

##### 4.1.4.2 Impactador de partículas

Este dispositivo se acopla a la salida de gases de la chimenea, permitiendo la clasificación de las partículas existentes en el gas en trece fracciones distintas (Figura 4-11). Una vez los gases de combustión hayan atravesado este aparato, las partículas irán quedando retenidas en los diferentes estratos en función de su grosor.



**Figura 4-11 Impactador (izquierda) y escalas del impactador (derecha)**

Cada escala del impactador posee un tamaño de abertura diferente y se le añade un filtro circular de papel de 25 mm de diámetro que actúa como superficie de recolección, por lo que se irá impregnado con las partículas. Cada impactador está compuesto por dos platos colineales, un plato de recolección y un plato surtidor con orificios. A medida que avanza el gas a gran velocidad por los impactadores, atraviesa en primer lugar el plato surtidor por los orificios, y antes de encontrarse con el plato de recolección las partículas del gas experimentan un giro brusco para evitar chocar con dicho plato. Únicamente partículas con ciertos tamaños característicos en función del impactador logran avanzar en ambos platos, el resto se va acumulando en el plato recolección (Figura 4-12).



**Figura 4-12 Escalas del impactador tras un ensayo**

#### 4.1.4.3 Analizador de gases Servomex

Este dispositivo permite analizar las emisiones gaseosas producidas por la instalación en funcionamiento (Figura 4-13). Monitoriza el desarrollo de la combustión en cuanto a la composición de los humos. Este aparato cuenta con una pantalla donde se muestran las siguientes medidas:

- Porcentaje de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO.
- NO y NO<sub>x</sub> en ppm.

El analizador se conecta a su vez a un ordenador para transferir los datos adquiridos, de manera que, posteriormente, es posible llevar a cabo el análisis de los mismos mediante un programa que será descrito más adelante.

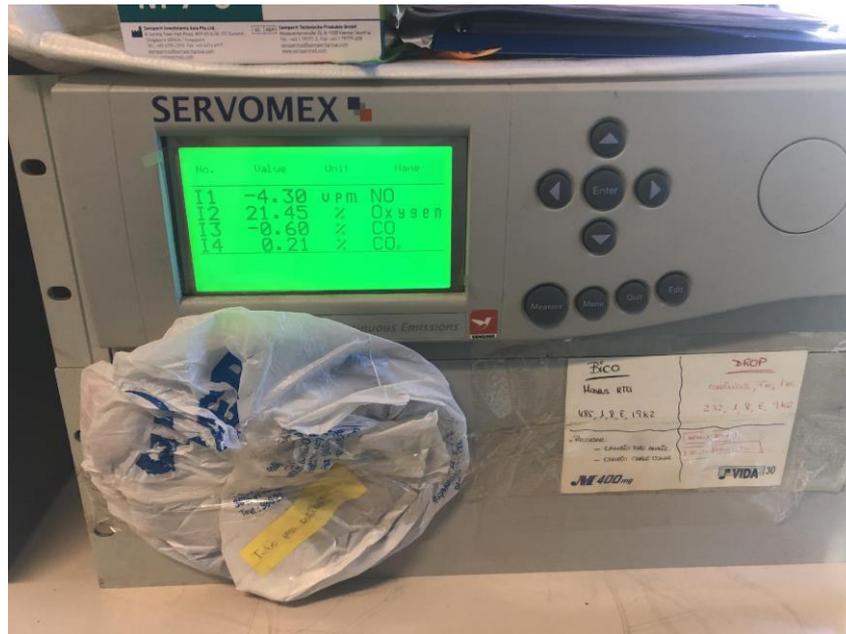


Figura 4-13 Analizador de gases Servomex

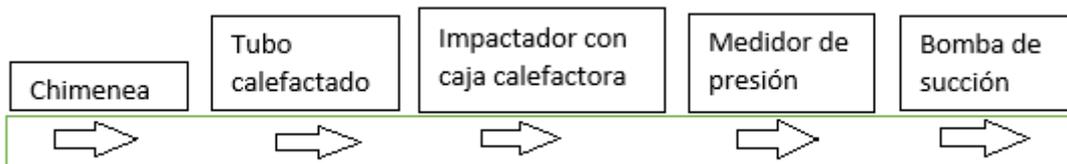
#### 4.1.4.4 Caja calefactora

Elemento auxiliar que permite mantener una temperatura estable de hasta 120°C dentro de ella, donde será colocado el impactador de partículas (Figura 4-14). Con este aparato se evita que se produzca condensación del vapor de agua presente en los humos en el proceso de filtración del gas en el impactador. Esta caja está provista de mantas térmicas que rodean al impactador, además de capas de fibra de vidrio que consiguen aislar el sistema y mantener la temperatura. El proceso de calentamiento del sistema debe ser progresivo, con el fin de evitar daños en los componentes: se realizan incrementos de temperatura controlados, en escalones de 20-30°C, hasta llegar a los 120°C. Estas temperaturas son fijadas mediante un regulador de temperatura manual, que permite aumentar o disminuir la misma.



**Figura 4-14** Caja calefactora (izquierda) y caja calefactora con impactador (derecha)

Para que se produzca el flujo de aire desde la chimenea, se conecta la bomba de succión de aire a la salida del impactador introducido previamente en la caja calefactora. En el compresor se controla el flujo de aire a través de una llave, que deberá ser fijada en 0,1 bar.



**Figura 4-15** Posición de los elementos de la línea de medida de partículas. Fuente: elaboración propia

## 5 METODOLOGÍA

### 5.1 Diseño de experimentos

Habiendo sido explicado el funcionamiento y partes de la instalación, la metodología a emplear consiste en la medición y obtención de datos pertenecientes a distintos ensayos. Estos ensayos tendrán variables en común como las de control, que serán las que definan el ensayo, pero a su vez se encontrarán comportamientos diferentes en el desarrollo de la combustión en cuanto a temperaturas y emisiones en función del combustible empleado en cada ensayo. Para ello se muestra a continuación una tabla resumen sobre estos parámetros a tener en cuenta (Tabla 5-1):

- Variables de control: caudal total de aire y reparto de aire primario/secundario.
- Variables que se van a medir o a analizar en los resultados: temperaturas, gases, distribución de partículas, masa de ensuciamiento sobre superficies de intercambio (fouling) y formación de escorias en cenizas (slagings).

Parámetro	Valores establecidos				
Pellet	Ulex	Retama	Kiwi	Madera	Rep. Checa
<b>Caudal aire total (l/min)</b>	160-200-240	160-200-240	160-200-240	160-200-240	160-200-240
<b>Estratificación de aire (%primario/%secundario)</b>	30/70	30/70	30/70	30/70	30/70
<b>Ciclo de alimentación</b>	2-40 2-45 2-50	2-40 2-45 2-50	2-40 2-45 2-50	2-40 2-45 2-50	2-40 2-45 2-50

**Tabla 5-1** Tabla resumen de algunas de las variables más relevantes medidas durante el ensayo. Fuente: elaboración propia

### 5.2 Metodología de trabajo durante el ensayo

En este apartado se va a llevar a cabo la descripción de los pasos a seguir para realizar un experimento de combustión en la planta anteriormente descrita. Se mostrarán tanto las acciones previas a la combustión como las posteriores a la misma.

### 5.2.1 Montaje del impactador

En primer lugar, se realizará el montaje del impactador de partículas (4.1.4.2), para ello se dispone de una serie de filtros de papel de aluminio que han pasado previamente un pretratamiento térmico de eliminación de humedad. Estos filtros serán pesados en una balanza de precisión y posteriormente colocados en cada una de las 13 escalas de las que dispone el impactador. Para ello se utilizarán unas pinzas y habrá que llevar puesto en todo momento unos guantes de látex, buscando minimizar el contacto con las superficies de recolección. Una vez pesados, las masas de los filtros serán anotadas en una hoja de datos (Figura 5-1), en la que quedará reflejado su peso antes y después del ensayo. Así como también deberá recogerse la información identificativa del tipo de ensayo realizado, el combustible empleado y la fecha de realización correspondiente.

DATA SHEET					
Test		Test		Test	
Date		Date		Date	
Duration(h)		Duration(h)		Duration(h)	
Pellet		Pellet		Pellet	
Impactador 3 / 13		Impactador 3 / 13		Impactador 3 / 13	
Hour		Hour		Hour	
Duration(min)		Duration(min)		Duration(min)	
Temperature(°C)		Temperature(°C)		Temperature(°C)	
Humidity		Humidity		Humidity	
Pressure (kPa)		Pressure (kPa)		Pressure (kPa)	
Flow (l/min)		Flow (l/min)		Flow (l/min)	
nr	Before	After	Before	After	Before
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
Mass					
	Deposited(g)	Adhered(g)	Deposited(g)	Adhered(g)	Deposited(g)
BeL					
Att					
Observations					

Figura 5-1 Hoja de datos antes y durante el ensayo [23]

### 5.2.2 Limpieza

Antes de comenzar con el experimento, es necesario proceder a la limpieza de la caldera para garantizar su correcto funcionamiento.

En primer lugar, se comprobará la existencia de posibles restos de ceniza en la cámara de combustión, procedentes de ensayos anteriores. Esta será retirada de manera manual con ayuda de algún tipo de espátula o cuchara, mientras que, para acceder a las zonas más complejas, se utilizará una aspiradora.

Continuando con la limpieza, se procederá a extraer el cenicero, colocado en la parte inferior de la bancada, se retirará toda la ceniza contenida en él y se volverá a colocar en su sitio.

El siguiente paso consiste en vaciar el circuito de refrigeración de agua. Éste se purgará utilizando una manguera conectada a la boquilla de salida, abriendo por completo la válvula de vaciado.

Por último, se procederá a extraer el intercambiador de calor. Este elemento con forma tubular se desacoplará de la instalación, teniendo cuidado de no perder parte de la materia que se encuentra retenida sobre él. Una vez extraído, se procede a retirar de su superficie la capa de partículas adheridas, las cuales serán almacenadas para su posterior análisis.

### 5.2.3 Encendido del analizador y programa LabView

Se llevará a cabo el encendido del analizador de gases Servomex (4.1.4.3) antes de iniciar el ensayo. Se configurará de manera que se asegure un caudal de succión de 20 L/min. Este paso deberá hacerse entre 45 min y 1 hora antes del inicio de la adquisición de datos, ya que es el tiempo que necesita el sistema para acondicionarse y alcanzar el régimen de operación estable.

A su vez, se deberá iniciar un ordenador en el cual se encuentra instalado el programa de adquisición de los datos del ensayo. Este programa está conectado con el analizador, su nombre es LabView y será el encargado de recopilar datos de los caudales, las temperaturas y las concentraciones de los gases emitidos, entre otros (Figura 5-2).

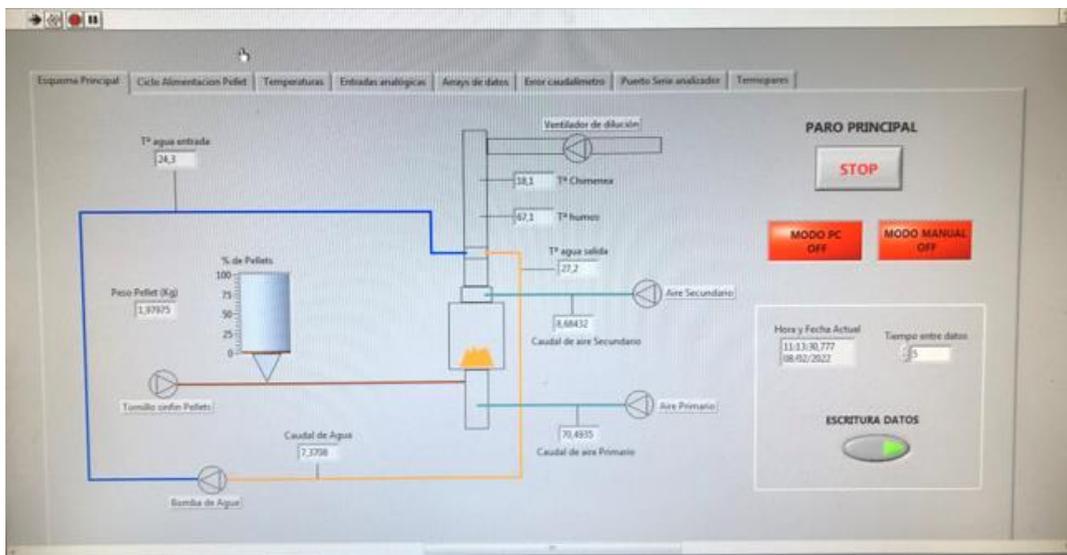


Figura 5-2 Ventana principal de LabView

## 5.3 El ensayo

En este apartado se describe el desarrollo del ensayo, mencionando y explicando cada una de las partes que lo componen, así como los pasos a seguir para el mantenimiento de la combustión a lo largo del proceso.

### 5.3.1 Llenado de la tolva

En este caso se comenzará añadiendo pellet a la tolva de carga (4.1.1) quedando como se muestra en la figura (Figura 5-3), la cual tiene que ser comprobada periódicamente durante todo el ensayo que posee suficiente combustible para producir la combustión.



**Figura 5-3 Tolva cargada con pellet**

### *5.3.2 Activación del circuito de refrigeración*

Se procederá al llenado del circuito de refrigeración, para ello se conectará una manguera a presión sobre la válvula y se comenzará a inyectar agua hasta alcanzar una presión de 3 bares que indicará el manómetro. Se abre la válvula que permite la circulación del agua, se da corriente mediante el diferencial y se enciende la instalación en el panel de control.

### *5.3.3 Selección del modo de funcionamiento y llenado de la cámara de combustión*

El siguiente paso a tomar será la selección de funcionamiento, es decir, seleccionar desde el panel de control como se quiere que actúe el tornillo sin fin. En función del caudal de aire total y del porcentaje de aire primario y secundario que definen el tipo de experimento a realizar, el sistema de alimentación dosificará pellet durante 2 segundos cada 40, 45 o 50 segundos. Si se desea alimentar de manera continua, se desconectará el temporizador. Una vez se obtenga el nivel adecuado de pellet en la cámara (Figura 5-4), se detendrá la alimentación y se volverá a activar el modo temporizador.



**Figura 5-4 Entrada de pellet en la cámara de alimentación**

#### *5.3.4 Encendido del pellet*

Una vez la cámara de combustión se encuentre con el nivel de pellet necesario y el analizador esté operativo, se dará comienzo a la ignición. Este proceso se llevará a cabo utilizando el decapador (4.1.4.1), fijándolo a máxima potencia y colocándolo encima del lecho en la cámara. Así mismo, se activará la entrada de aire primario con un caudal bajo para evitar de esta manera que con la corriente de aire puedan salir al exterior restos de pellet o polvo. Este proceso de encendido durará aproximadamente 1 minuto. Una vez se inicie la combustión y se observe una llama suficientemente amplia, se retirará el decapador. Por último, se colocará la puerta de sellado, que quedará perfectamente atornillada a la cámara.

#### *5.3.5 Disposición del impactador de partículas*

Estando la planta en funcionamiento, se procederá a la colocación del impactador (4.1.4.2) dentro de la caja calefactora (4.1.4.4) véase (Figura 5-5). Se conectará el tubo calefactor a la chimenea y al propio impactador, de manera que se puedan transferir los gases de la combustión al mismo. Se encenderá la caja para su calentamiento hasta los 120°C.

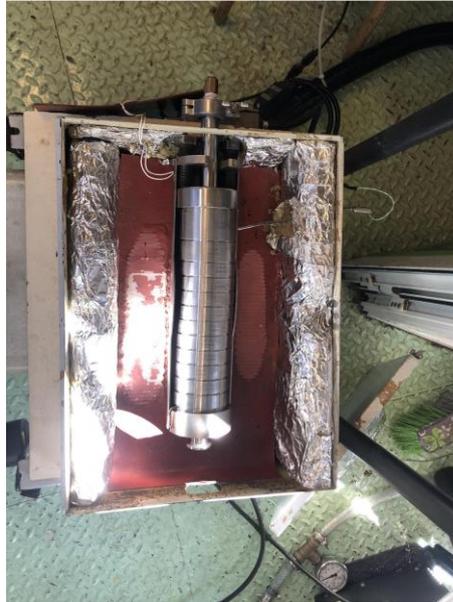


Figura 5-5 Impactador dentro de la caja calefactora

### 5.3.6 Apagado del quemador y del resto de equipos

Tras finalizar el ensayo se dará lugar al apagado del quemador, para ello se debe detener la alimentación en el panel de control y reducir a 0 L/min los caudales de aire. La llama poco a poco irá desapareciendo cuando se consuma el pellet restante que queda en la cámara de combustión. Así mismo, habrá que detener el programa de adquisición de datos, apagar el analizador de gases y una vez extinguida la llama, se procederá al vaciado del circuito de refrigeración.

El último paso será el de la retirada del impactador de partículas de la caja calefactora. Tras haber transcurrido unos minutos y siendo la temperatura idónea para la extracción, se retirará de la caja siempre usando guantes térmicos como medida de seguridad. Posteriormente se llevará al laboratorio donde le serán extraídos los distintos filtros para el análisis de las partículas procedentes de los gases de combustión.

### 5.3.7 Toma de muestras

Los muestreos del impactador en cascada se prolongan durante unos 20 minutos. Siendo este colocado una vez se ha establecido el control del flujo de aire. El muestreo se inicia en el minuto 75 de ensayo y se retira en el 95 (Figura 5-6). Una vez retirado el impactador se llevará al laboratorio para el desacople de las escalas y su posterior análisis de partículas.

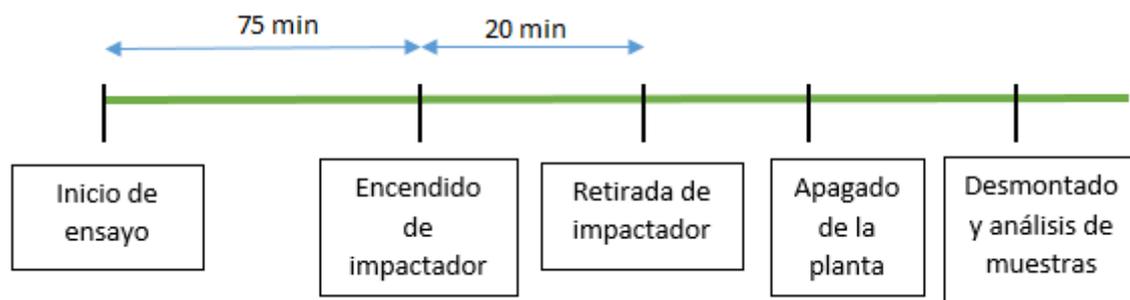


Figura 5-6 Proceso de muestreo del impactador 13 escalas. Fuente: elaboración propia

Por otro lado, en el caso del fouling en el intercambiador se procederá extrayendo el tubo del módulo tras vaciar el circuito hidráulico. Se golpeará el tubo repetidas veces para separar las muestras de depositado situadas en el interior del mismo. En cuanto al adherido se rascará con ayuda de un

instrumento metálico, ambas serán recogidas y situadas en sus respectivas bandejas para ser pesadas posteriormente.

### *5.3.8 Tratamiento de las muestras del 13 escalas y ensuciamiento*

Una vez desmontado las 13 escalas del impactador, antes de ser pesados los filtros de nuevo y anotar la diferencia de peso con respecto al inicio, se llevará a cabo un postratamiento de los mismos. Serán introducidos en una mufla con el fin de eliminar posibles restos de humedad. El horno adquirirá una temperatura de 105°C de manera progresiva conformando una rampa de calentamiento. El tiempo de duración de este proceso se sitúa en 90 minutos. Tras la finalización de este, se retirarán los filtros de la mufla y se situarán en un desecador durante 24h, para su posterior pesaje en la balanza de precisión.

En el caso de las muestras obtenidas de la cámara de combustión, se llevará a cabo un tratamiento similar al descrito anteriormente. Este consistirá en aplicar calor dentro de una mufla hasta los 550°C durante 300 minutos para asegurar que en la ceniza no quedan restos inquemados, aunque independientemente las muestras serán pesadas.



## 6 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se han llevado a cabo diferentes ensayos en los que se han adquirido una gran diversidad de datos en relación a diferentes parámetros de los mismos. Se ha variado la cantidad de aire total que se introduce en la instalación, alternándose entre los valores de 160/200/240 l/min, manteniendo por otro lado los porcentajes de aire primario y secundario en este caso 30/70.

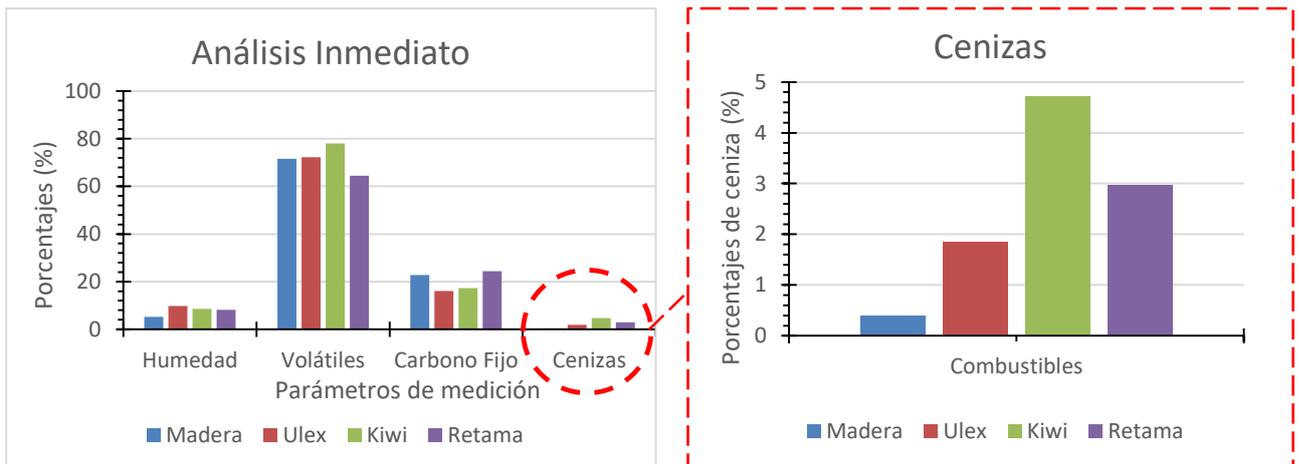
Los ensayos se utilizaron diferentes tipos de pellet, entre ellos se tendrá el de retama, Ulex, kiwi y madera. A continuación, se realizará un análisis en relación a las partículas emitidas, cenizas producidas, emisiones, masas de deposición y adherido, etc., asociados a la combustión de cada una de las variedades mencionadas. Haciendo uso de estos datos se comprobará la estabilidad de la planta, así como se llevarán a cabo distintas comparaciones entre los distintos tipos de pellets de manera que se pueda comprobar cuál de ellos presenta un mejor comportamiento para su uso en instalaciones reales.

### 6.1 Composición del combustible

En primera instancia será conveniente analizar la composición de los combustibles (3.1.3) empleados en los distintos ensayos y compararlos para sacar conclusiones en cuanto a cómo pueden afectar estos en la combustión.

Para ello se han representado los resultados obtenidos de su caracterización en (Figura 6-1) (Figura 6-2) (Figura 6-3) (Figura 6-4) (Figura 6-5) (Figura 6-6) en las que se muestran tanto el análisis inmediato, el elemental y la composición de cenizas de cada uno de los pellets.

### 6.1.1 Análisis inmediato



**Figura 6-1 Análisis inmediato. Porcentajes de los parámetros de medición en función del tipo de pellet**

En vista de los datos graficados, se puede obtener los siguientes resultados sobre (Figura 6-1):

- En el caso de la humedad, se busca siempre obtener un bajo porcentaje de la misma para evitar posibles pérdidas de energía durante la combustión. Como se puede observar de los cuatro pellets empleados, la madera convencional, es el que obtiene mejor resultado ya que posee el menor nivel de la misma, lo que viene siendo un 5,23 %, en cambio el resto se sitúan entre un 8-10 % de humedad. En este caso la madera proporcionará mayor seguridad a la hora de evitar esas pérdidas de energía por evaporación que el resto de combustibles con niveles superiores de humedad.
- En relación a los compuestos volátiles la mayoría de los pellets empleados poseen porcentajes similares. Hay que resaltar un ligero aumento en el caso del pellet kiwi alcanzando el 78 %, frente al referente, la madera, con un 71,5 %. Un alto porcentaje de este parámetro garantiza un buen encendido de la planta sin tener que incrementar el caudal de aire secundario para favorecer el desarrollo de la combustión.
- Otro de los parámetros a tener en cuenta es el carbono fijo, en este caso los mayores porcentajes se encuentran en la madera y la retama. Este puede favorecer directamente a la combustión ya que posee relación directamente con el poder calorífico del combustible en cuestión.
- En cuanto a la proliferación de cenizas, es un aspecto a tener en cuenta para el combustible a seleccionar ya que, ante la búsqueda de una combustión completa ideal, a su vez se requiere que el porcentaje de cenizas sea el menor posible. Para este análisis ha sido necesario graficar de nuevo los datos pertenecientes a la ceniza debido a su gran disparidad con respecto al resto de parámetros en la gráfica de análisis inmediato (Figura 6-1). Como se puede ver el combustible de referencia, posee un porcentaje del 0,38 % bastante bajo en comparación con el resto, si se quisiera sustituir por alguna de las variedades no comerciales se podría optar por el Ulex, el cual genera un porcentaje del 1,84 %, sin embargo, tanto la retama como el kiwi poseen elevados contenidos de ceniza ascendiendo a más del 4,5 %, lo que podría ser un problema para el funcionamiento de la planta.

### 6.1.2 Análisis elemental

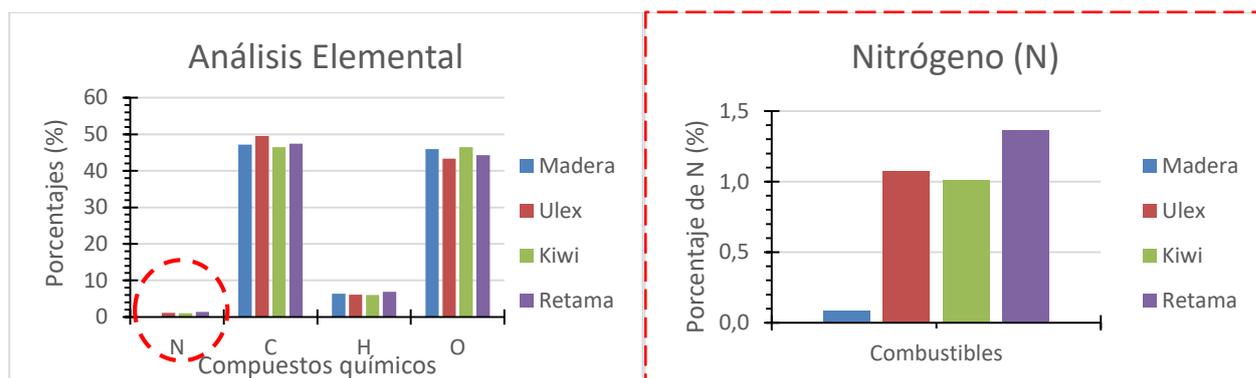


Figura 6-2 Análisis elemental. Porcentajes de los compuestos químicos en función del tipo de pellet

En esta gráfica (Figura 6-2) se muestran los porcentajes de los compuestos químicos presentes en los distintos pellets. En este caso se ha tenido que graficar dos veces, una de ellas únicamente para mostrar las cantidades de Nitrógeno (N) ya que al poseer unos porcentajes muy inferiores al resto apenas se apreciaba. En cuanto a los resultados del análisis elemental, se observa lo siguiente:

No se aprecia una gran diferencia entre el combustible de referencia en este caso la madera y el resto de pellets. Todos ellos comparten un análisis elemental parecido, solo cabría destacar una variación en cuanto al análisis del Nitrógeno, el cual es apenas inexistente en la madera en comparación con los demás que alcanzan valores 14 veces superior al de la madera. A su vez destacar que el Azufre (S) al encontrarse por debajo de los límites de detección del equipo, no se ha incluido en la gráfica.

### 6.1.3 Composición de cenizas

En este apartado se va a analizar la composición de las cenizas para los distintos tipos de combustible. En este caso, y como se ha comentado en el apartado (3.1.3.3), los resultados se expresan en base óxido, como porcentaje sobre el total de cenizas. Para ello se ha seguido un criterio de clasificación de estos óxidos en función del porcentaje de los mismos:

Mayoritarios	% > 5
Minoritarios	0,5 < % < 5
Trazas	% < 0,5

Tabla 6-1 Criterio de clasificación para porcentajes de óxidos presentes en las cenizas

Los resultados obtenidos para cada grupo de elementos, según el criterio expuesto, se recogen en las siguientes gráficas (Figura 6-3) (Figura 6-4) (Figura 6-5) (Figura 6-6):

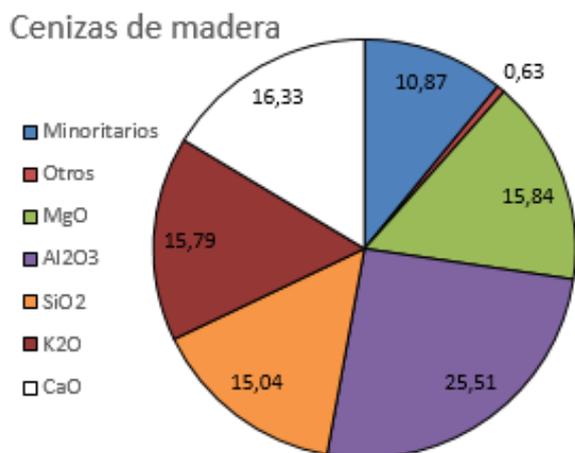


Figura 6-3 Composición de las cenizas de madera

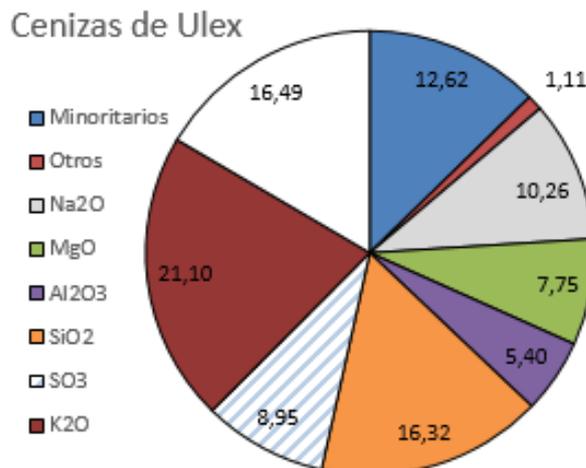


Figura 6-4 Composición de las cenizas de Ulex

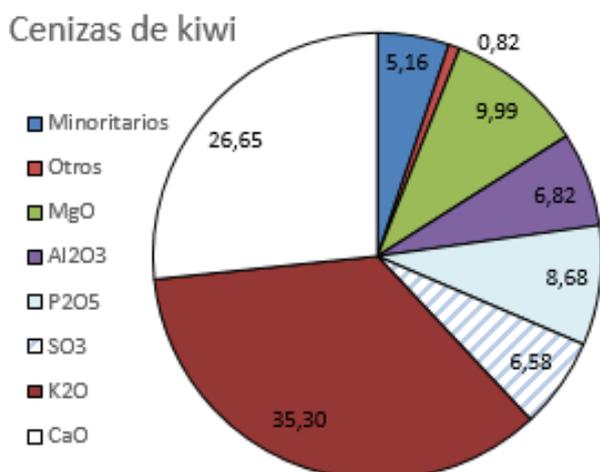


Figura 6-5 Composición de las cenizas de kiwi

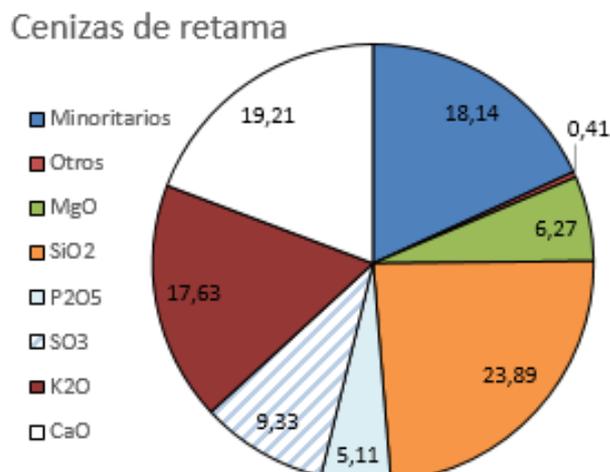


Figura 6-6 Composición de las cenizas de retama

Como se puede ver en ambas gráficas (Figura 6-3) (Figura 6-4) (Figura 6-5) (Figura 6-6) las cenizas poseen una gran variedad de compuestos óxidos los cuales presentan porcentajes muy dispares en función del pellet empleado. Tanto para el caso de los compuestos mayoritarios, los cuales presentan entre el 80-95 % del total de óxidos presentes en los pellets usados como los minoritarios los cuales se engloban entre un 5-18 %. Además, destacar que existen también una amplia gama de óxidos catalogados en dentro de trazas, ya que su porcentaje total apenas supera el 1 % como en el caso del Ulex.

En función del compuesto óxido se tendrán unas tendencias u otras en cuanto a la formación de slaggings y fouling. Se verá como el combustible se comportará mejor cuanto más Calcio, Magnesio y Manganeso contenga. Por el contrario, compuestos como el Silicio, favorecerá la corrosión. Y en cuanto a porcentajes altos de Cloro, Sodio y Potasio favorecerán en que se produzca fouling.

Estos resultados se pueden relacionar con la predicción de los índices de deposición presentes en el apartado (3.1.3.5).

- **Índices de deposición:** véase la tabla (Tabla 6-2) en la cual se recogen los índices de deposición más relevantes durante los ensayos realizados en función de cada combustible, incluyendo el grado de severidad (Tabla 3-1) en cada uno de ellos.

Índices de Deposición	Madera	Ulex	Kiwi	Retama
<b>B/A (+P)</b>	● 1,27	● 2,89	● 12,11	● 2,05
<b>kg alkali/GJ</b>	● 0,03	● 0,31	● 0,91	0
<b>Sr</b>	● 30,66	● 36,5	0	● 44,06
<b>Fu</b>	● 0,1	● 1,99	● 10,41	● 1,25

**Tabla 6-2 Índices de deposición**

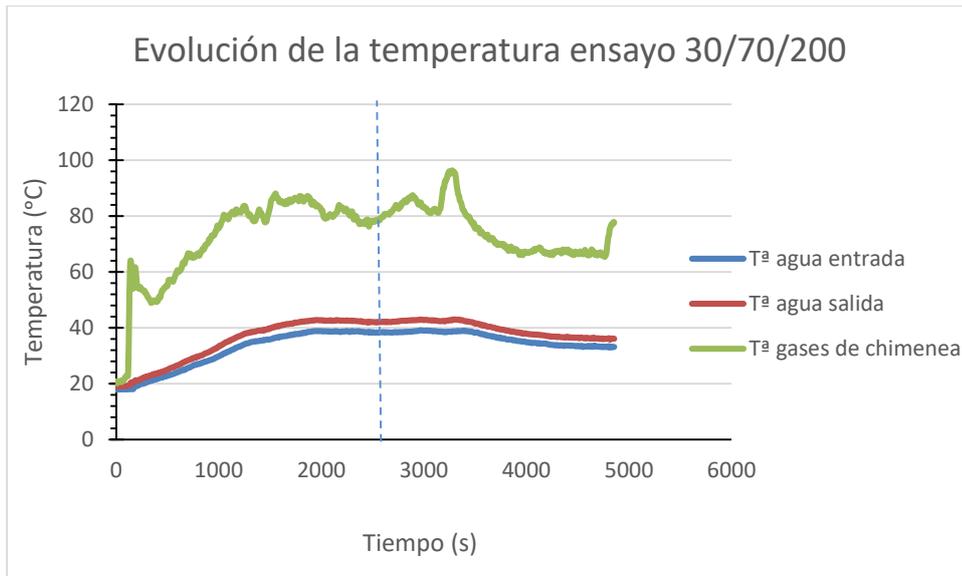
Como se puede apreciar en la tabla y en función de los parámetros seguidos para clasificación de los índices (Figura 3-5) (Figura 3-6) (Figura 3-7) (Figura 3-8) la mayoría de los pellets empleados comparten grado de severidad en los distintos índices. Incluso en algunos estos obtienen un valor nulo como el caso del índice alcalino (kg alkali/GJ) en la retama o el de formación de escoria (Sr) en el kiwi. Lo ideal para el combustible sería obtener unos índices bajos de formación de escoria (Sr) y ensuciamiento (Fu), pero como se puede ver esto solo se va a cumplir en el caso de fouling (Fu), por parte del Slagging (Sr) todos los combustibles van a mantener un alto índice.

## 6.2 Comportamiento ante la combustión

### 6.2.1 Estabilidad de la planta

Utilizando el programa LabView se puede generar en cada ensayo un documento lvm que recopila todos los parámetros reflejados en el panel de control, así como a su vez va conectado al medidor de gases SERVOMEX además de recibir también las temperaturas que registran los termopares colocados en la instalación.

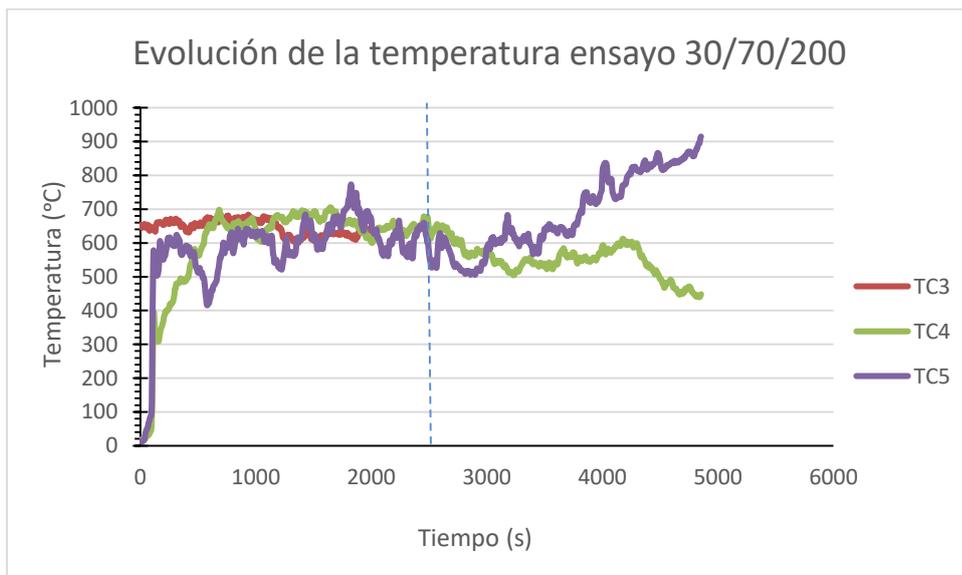
Antes de comenzar a analizar los ensayos con los diferentes combustibles, es necesario comprobar la estabilidad del quemador, observando el tiempo que tardan las señales de temperatura en alcanzar un valor que se mantenga aproximadamente constante durante el resto del experimento. Para ello se ha precisado utilizar datos correspondientes al ensayo con pellet de madera convencional, este caso las temperaturas de entrada y salida de agua, así como a temperatura de los gases de combustión y la reflejada por los termopares.



**Figura 6-7** Gráfica sobre la estabilización de la planta en función de la Tª de agua de entrada y salida en la caldera y la Tª de los gases de escape

En relación a la gráfica mostrada (Figura 6-7) se puede inferir de ella que el comienzo está caracterizado por una gran inestabilidad donde se llega a alcanzar un pico de temperatura. Esto se puede deber al cambio brusco de temperatura de pasar de temperatura ambiente a la necesaria para que la caldera comience su funcionamiento. Además de verse también afectado por el flujo de combustible, al comienzo la cámara se encuentra llena del mismo y tras producirse la explosión de inicio la temperatura aumenta significativamente. Conforme la entrada de caudal se va estabilizando, lo hace a su vez la temperatura.

Es necesario insistir en que la toma de datos con el programa LabView no se tenga encuentra hasta transcurridos aproximadamente los primeros 45 minutos, en los cuales la instalación ya comienza a ser estable. Estos 45 minutos han sido marcados con una línea discontinua en ambas gráficas (Figura 6-7) (Figura 6-8).



**Figura 6-8** Evolución de la temperatura durante la combustión

Esta gráfica (Figura 6-8) se muestra la evolución de temperatura medida con los termopares que se ha producido durante la combustión en el ensayo con pellet de madera. En relación con la gráfica comentada anteriormente se puede ver como esta también presenta un pico de temperatura al comienzo.

Este pico se puede identificar con el encendido del pellet en la cámara de combustión. Y como a medida que transcurre el tiempo tiene una bajada y posteriormente consigue estabilizarse hasta el final del último ensayo. En el caso del termopar TC5 se observa cómo a diferencia de los otros dos, la temperatura se mantiene en el tiempo hasta el final incluso muestra un ligero ascenso, en cambio tanto TC3 como TC4 marcan un descenso al final del ensayo. Esto se puede deber a la colocación de los termopares en la instalación, estando en este caso el TC5 más próximo al quemador.

A su vez, se puede interpretar la varianza relativa de cada señal, obtenida desde el minuto 45 de ensayo, como esta se sitúa por debajo del 10 %, de tal manera se puede considerar que la señal se mantiene estable.

### 6.2.2 Emisiones gaseosas

Se va a llevar a cabo un estudio de las emisiones producidas den los distintos ensayos en función de los principales gases de combustión, el NO, CO<sub>2</sub> y CO. Todo teniendo de referencia un porcentaje de O<sub>2</sub> del 6 %.

#### 6.2.2.1 Emisiones de NO

Estas emisiones se desarrollan a lo largo de los ensayos con distinto combustible de la siguiente manera:

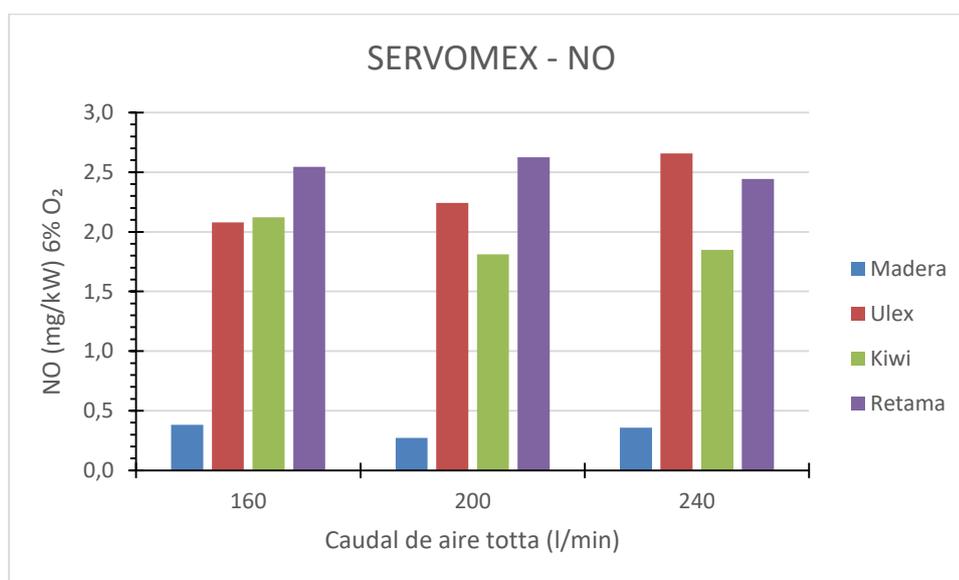
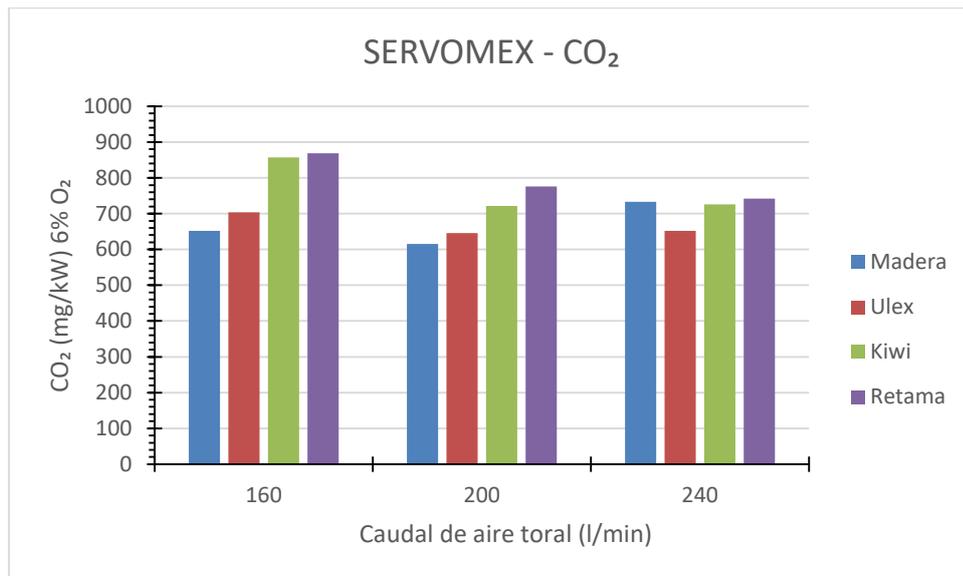


Figura 6-9 Emisiones de NO en función de los distintos pellets y caudales de aire total

En cuanto a las emisiones de NO, se puede observar (Figura 6-9) como independientemente del caudal de aire empleado, se obtienen resultados de emisiones muy superiores a la madera, el pellet de referencia. Los valores de NO ascienden hasta 2,66 mg/kW del Ulex en el ensayo de 240 l/min frente al 0,27 mg/kW de la madera siendo este el valor mínimo en el ensayo de 200 l/min. Como era de esperar, los niveles de NO en los combustibles no convencionales son mayores que en la madera debido a su alta tasa de Nitrógeno como se puede observar en la gráfica (Figura 6-2). Por consiguiente, a la hora de utilizar un pellet no convencional de los dispuestos en este proyecto, se decantaría por el kiwi, siendo este el menos emisivo por detrás de la madera. El kiwi presenta un valor mínimo de 1,81 mg/kW en el ensayo de 200 l/min, así como un valor máximo de 2,12 mg/kW cuando se usa un caudal total de 160 l/min.

#### 6.2.2.2 Emisiones de CO<sub>2</sub>

Uno de los gases más característicos de la combustión que se presenta de la siguiente manera (Figura 6-10) a lo largo de los ensayos:

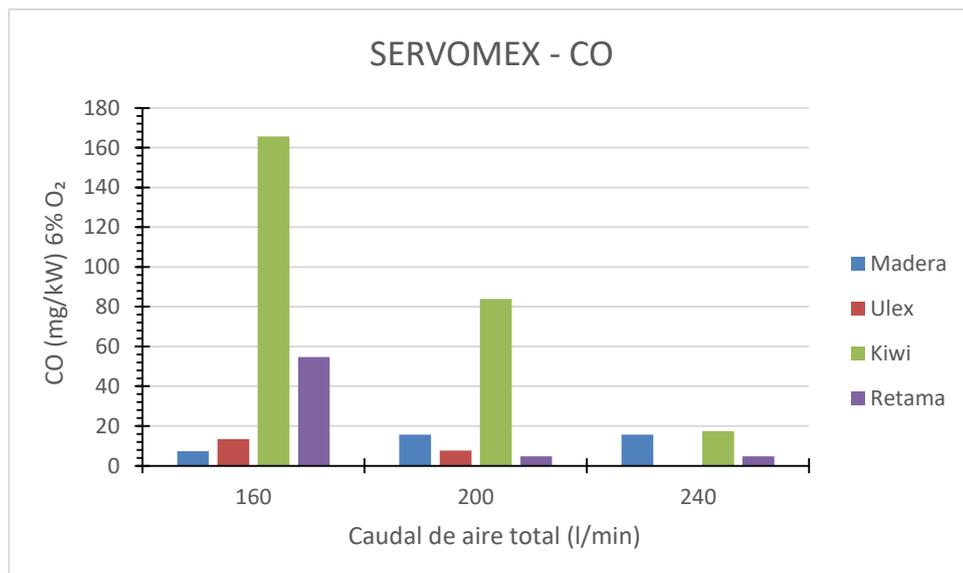


**Figura 6-10 Emisiones de CO<sub>2</sub> en función de los distintos pellets y caudales de aire total**

A la hora de analizar el comportamiento emisivo en cuanto a CO<sub>2</sub> se puede ver (Figura 6-10) como la concentración de este se dispara en combustibles como la retama o el kiwi alcanzando valores entre 868,5 y 857,16 mg/kW, alejándose en gran medida de los valores de la madera, la cual registra un máximo de 732 mg/kW. El Ulex sería el combustible mejor situado para sustituir a la madera ya que sus datos de emisiones de CO<sub>2</sub> son los más próximos a la referencia, en este caso mostraría un valor mínimo de 645 mg/kW y máximo de 703 mg/kW. En relación al caudal de aire total empleado no se ve grandes variaciones, pero si se puede ver como en el caso del caudal de 200 l/min se obtienen los valores de emisiones más bajos exceptuando el pellet retama.

### 6.2.2.3 Emisiones de CO

A continuación, se mostrará la relación entre el porcentaje de CO en los ensayos llevados a cabo con distintos pellets y caudales de aire total.



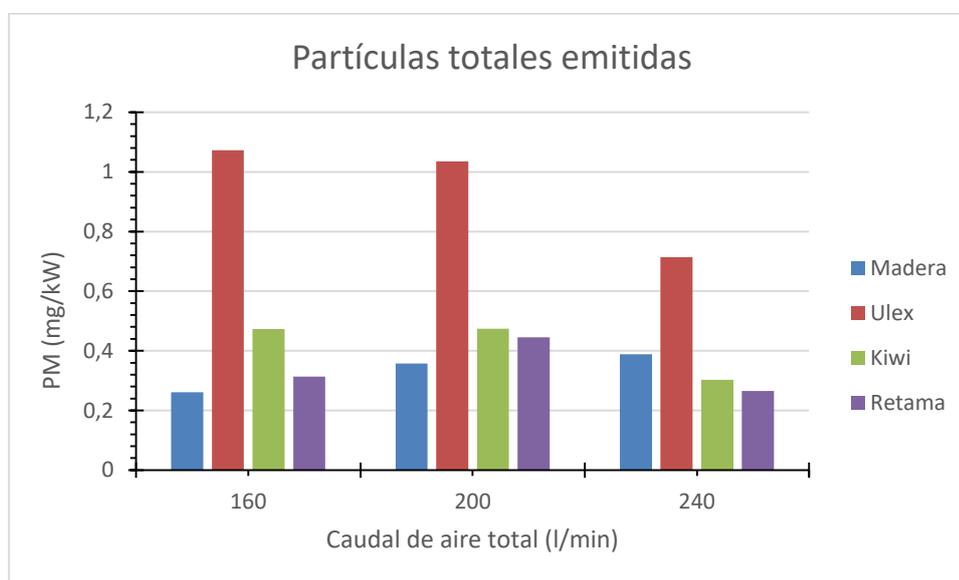
**Figura 6-11 Emisiones de CO en función de los distintos pellets y caudales de aire total**

En vista de los resultados obtenidos (Figura 6-11) se puede ver como el kiwi será el pellet con un rango de valores superior de este gas obteniéndose 165,65 mg/kW en el ensayo de 160 l/min. A la hora

de escoger uno de los combustibles empleados el más idóneo en lugar de la madera, sería el Ulex, ya que su nivel de emisiones se sitúa entre 7-13 mg/kW muy similar al de la misma, el cual se encuentra entre 7-15 mg/kW. Ante el uso de diferentes caudales de aire total, es observable como a medida que se aumenta el aire, disminuyen las emisiones de CO. Esto se debe a que cuanto más cantidad de aire se disponga mejor se llevará a cabo el proceso de combustión. Como se ha explicado con anterioridad el funcionamiento de la combustión de pellet se aleja de una combustión incompleta. Sin embargo, no se puede dejar pasar de largo las altas emisiones producidas por el kiwi o en algún caso en concreto la retama, ya que una exposición directa de este gas en unos altos niveles puede ser especialmente perjudicial para el ser humano.

### 6.2.3 Partículas totales emitidas

En este apartado se va a exponer la cantidad de partículas emitidas por las distintas biomásas durante los ensayos y medidas con el impactador de 13 escalas. Para ello se va a hacer uso de una gráfica de barras donde se represente la masa de partículas emitidas por cada mg/kW de potencia disponible en el combustible y en función del caudal de aire total empleado en l/min.



**Figura 6-12 Partículas totales emitidas representado por los mg/kW en función del caudal de aire total**

Haciendo referencia a la presente gráfica (Figura 6-12), se puede inferir de ella cuál de los combustibles empleados posee una mayor tendencia a la generación de emisiones de partículas, en este caso medido desde el 13 escalas. Por consiguiente, se puede ver que la madera a pesar de mantener unos niveles bajos de emisiones, tanto el kiwi como la retama consiguen emitir menos partículas en el ensayo de 240 l/min. Tanto la retama como el kiwi condensan un rango de valores aproximados, por lo que se podría plantear alguno de estos dos combustibles como sustitución de la madera. No obstante, se descartaría el Ulex, ya que sus valores ascienden hasta los 1,07 mg/kW, siendo este muy superior al resto. Añadir también que, de los tres caudales de aire, el más idóneo sería el de 240 l/min, ya que a priori es el que presenta unos niveles de emisiones más bajos en comparación con los otros dos. Esto es debido principalmente a la disposición de una cantidad mayor de aire secundario para completar las reacciones.

### 6.2.4 Distribución de partículas según su tamaño

En relación al uso del impactador se podrán desarrollar una serie de graficas en las cuales se puede observar la distribución de partículas (%) en función del diámetro de paso de cada uno de los estratos del impactador de 13 escalas, obtenidas para cada nivel de caudal de aire y cada combustible.

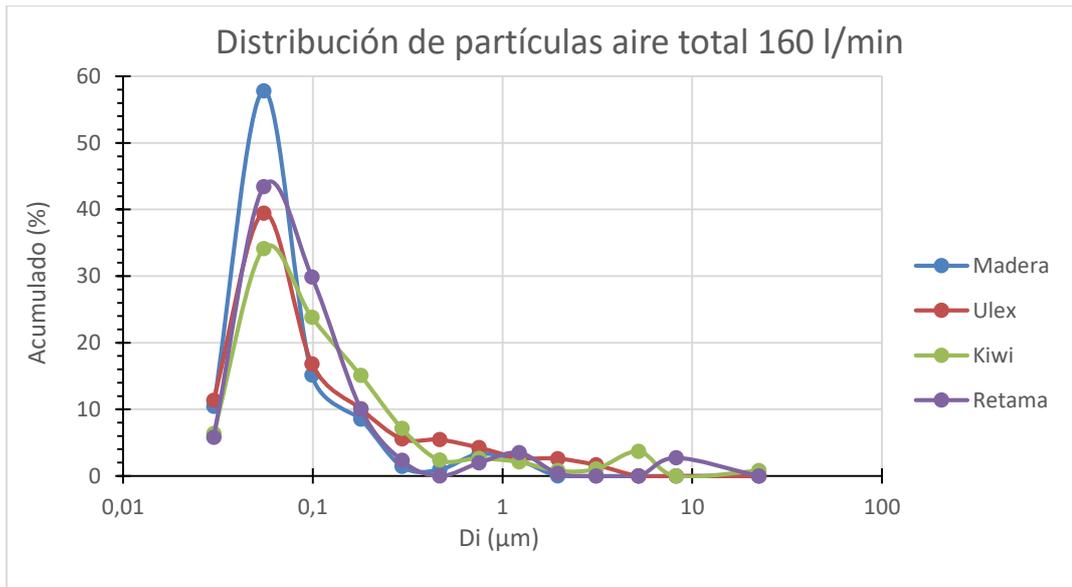


Figura 6-13 Relación entre el porcentaje total de partículas emitidas y el diámetro de las mismas durante ensayo de 160 l/min de aire total

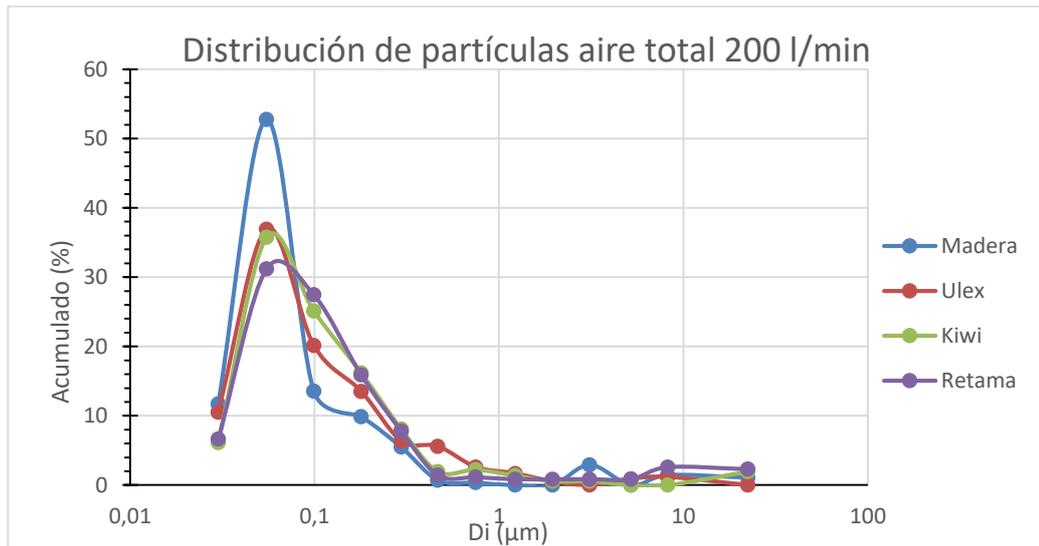
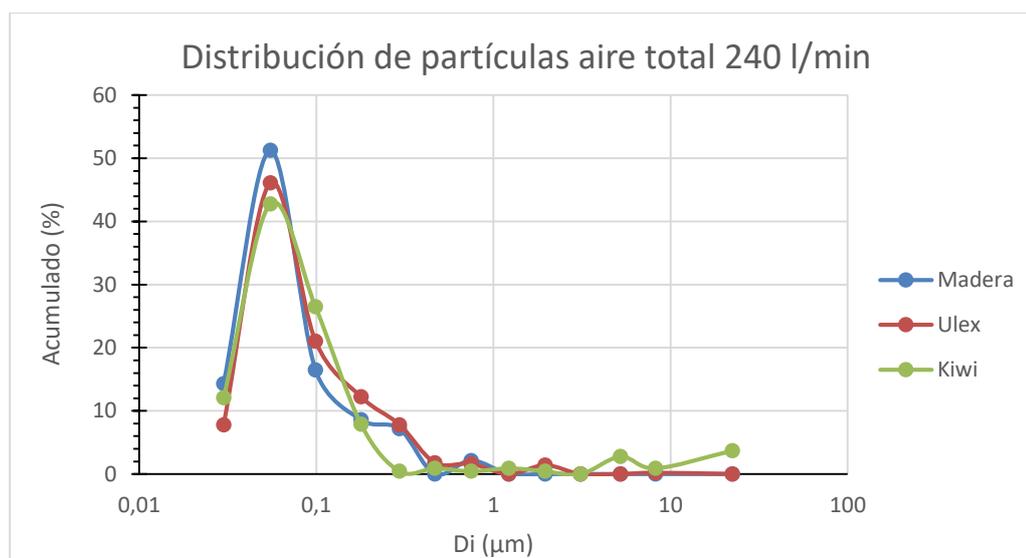


Figura 6-14 Relación entre el porcentaje acumulado de partículas y el diámetro de las mismas durante ensayo de 200 l/min de aire total



**Figura 6-15 Relación entre el porcentaje acumulado de partículas y el diámetro de las mismas durante ensayo de 240 l/min de aire total**

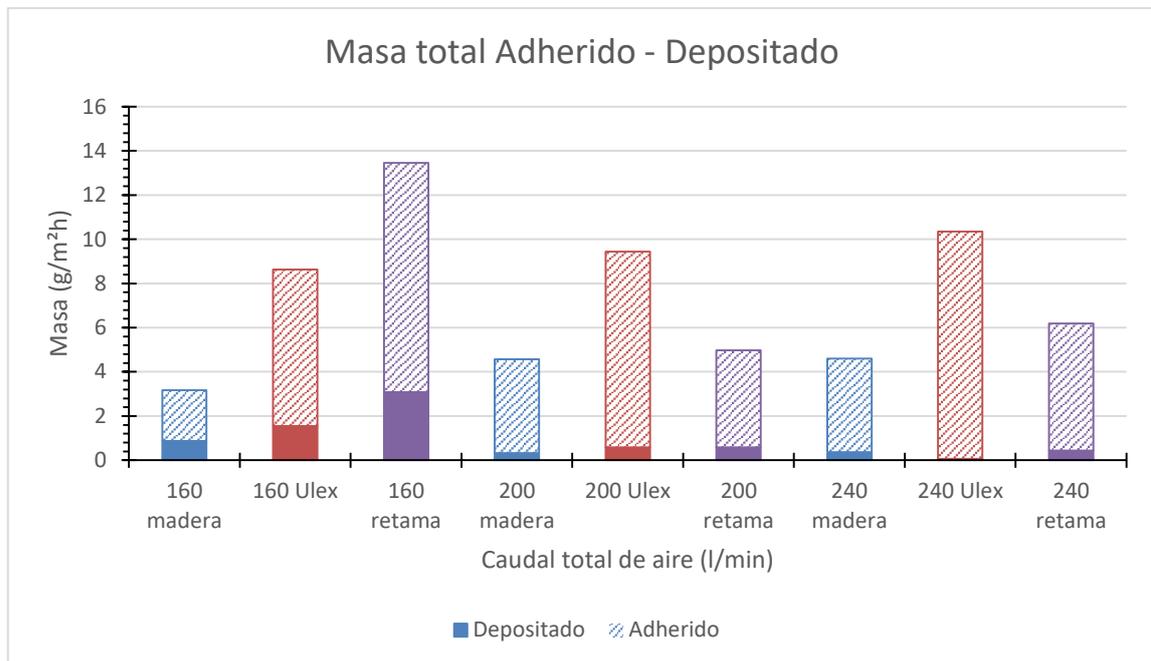
Sobre las gráficas expuestas (Figura 6-13) (Figura 6-14) (Figura 6-15) se puede apreciar la variación de la distribución de partículas en función del caudal total de aire.

En este caso los pellets no comerciales presentan una porción muy significativa entre 26-28 % de partículas de tamaño 100 nm en referencia al ensayo de 200 l/min de caudal total.

Como se puede observar en ambas gráficas se presenta una distribución de partículas muy similar, se puede inferir como la mayor parte de las partículas acumuladas se sitúan entre los diámetros 0,03 y 0,09 µm, es decir entre el filtro 1 y 4. En este caso se pueden catalogar estas como finas ya que se encuentran por debajo de 2,5 µm. Por otro lado, las gruesas serían aquellas que poseen un diámetro próximo a 10 µm, estas estarían enmarcadas dentro de las partículas perjudiciales y poseen un porcentaje menor, en torno a un 10 %. Es preciso añadir que a raíz de estos ensayos se tiene que tener muy presente la cantidad de partículas que se emiten con un diámetro igual o superior a 1 µm ya que están dentro del rango de ser perjudiciales para la salud humana. En referencia al análisis de datos en la gráfica obtenida con 160 l/min de aire total (Figura 6-13), se puede ver como existe un ligero aumento de las partículas con diámetro superior a 1 µm, aproximadamente un 8 % en comparación con el resto de ensayos (Figura 6-14) (Figura 6-15).

### 6.2.5 Masas de ensuciamiento

Dos de los datos más característicos en los ensayos son las masas de ensuciamiento recogidas del intercambiador de calor. A continuación, se mostrará una serie de gráficas que registran los resultados obtenidos manteniendo fijo el aire primario y secundario en este caso 30/70, y variando tanto el tipo de pellet como la cantidad de aire total.



**Figura 6-16 Masa total Fouling Adherido-Depositado en función del tipo de pellet**

Tras la exposición de los resultados en la gráfica de barras apiladas (Figura 6-16), se pueden sacar las siguientes conclusiones al respecto:

- En función del aire total aplicado en cada ensayo el índice de deposición irá variando. De esta manera se observa como en el caso de aplicar 160 l/min se obtienen mayores cantidades de deposición y a medida que este aumenta hasta alcanzar los 240 l/min esas tasas de deposición disminuirán.
- La mayor cantidad de depositado se produce en el ensayo 30/70 de retama con 160 l/min de aire total, produciéndose una cantidad de 3,08 g/m²h.
- El Ulex por lo general mantiene unos niveles bajos de deposición con las distintas configuraciones de aire, siendo apenas inexistente con 240 l/min de aire total.
- Por parte del adherido, en el caso del Ulex se observa una tendencia al aumento de masa adherida a medida que aumenta la cantidad de aire, llegando a alcanzar la posición más alta de la gráfica con 10,22 g/m²h en el ensayo de 240 l/min.
- La retama por su parte posee su nivel más alto en el ensayo de 160 l/min, y luego no consigue estabilizarse del todo ya que disminuye y vuelve a aumentar en los ensayos posteriores.
- El pellet de referencia, la madera, como se puede inferir de la gráfica posee bajos niveles de adherido llegando como máximo a 4,25 g/m²h en comparación con el resto de pellets.

### 6.2.6 Slagging y cenizas

Como se ha comentado con anterioridad, ya sea al inicio o final del ensayo hay que llevar a cabo un proceso de limpieza donde se retiran las cenizas y slagging (escorias) formadas. A la hora de analizar estos elementos formados por sinterización, proceso por el que se produce la unión entre átomos al someter el pellet a altas temperaturas durante tiempos prolongados, se dispondrán dos gráficas en las que se muestran las masas tanto de ceniza como slagging en función del aire total empleado antes de pasar por la mufla.

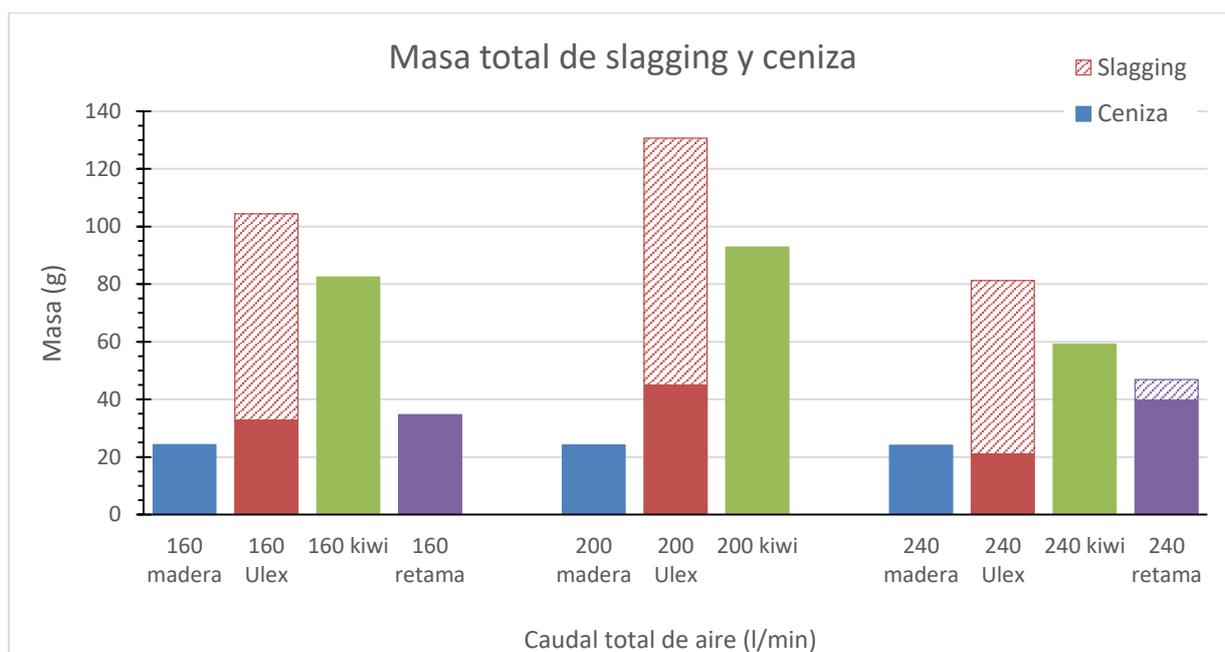


Figura 6-17 Masa total de slagging y ceniza en función del combustible empleado

A raíz de esta gráfica (Figura 6-17) se puede observar lo siguiente:

- Se puede apreciar como en lo que a producción de slaggings se refiere, únicamente el pellet Ulex posee una cifra significativa con relación al resto de combustibles. Este consigue generar una cantidad máxima de 85,82 g con un caudal total de aire de 200 l/min.
- El resto de combustibles apenas generan slaggings, por lo que se puede concluir que se ha obtenido el resultado esperado.
- En el caso de la ceniza, si se aprecia la generación de la misma en todos los ensayos, si bien es cierto que la mayor cantidad se produce en el ensayo de kiwi con 200 l/min de caudal de aire, alcanzando un nivel de 92,89 g. También es preciso señalar la obtención de los niveles más bajos de ceniza sobre los combustibles no convencionales, tanto el Ulex como la retama presentan niveles de entre 21-44 g, cerca de los obtenidos por la madera 24 g.
- Por lo que en definitiva se puede decir que a la hora de seleccionar una opción viable en cuanto a pellets no comerciales se podría emplear en primer lugar la retama ya que en cuestión de slaggings son inexistentes y en referencia a la ceniza se encuentra dentro de un rango de valores muy próximo a la madera.

## 7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 7.1 Conclusiones

En función de los datos obtenidos en los diferentes ensayos y tras haber sido analizados, se pueden desarrollar una serie conclusiones que se verán expuestas a continuación:

- En primer lugar, se puede decir que se ha conseguido una estabilidad tanto en términos térmicos como de emisivos de la planta, independientemente del combustible empleado. Se ha observado una evolución continua de la temperatura tanto en el agua de entrada y salida del sistema de refrigeración como en la mediada por los termopares. Esto lleva a la conclusión de que la planta experimental no posee a priori ninguna deficiencia, así como que los combustibles empleados poseen una caracterización (3.1.3) que permite llevar a cabo los ensayos con un correcto funcionamiento de la instalación.
- Acentuándonos en el tema de las emisiones, se puede concluir que la mayor parte del carbono producido es empleado en la formación de CO<sub>2</sub> y no en CO, lo que proporciona una situación que se aproxima a la de combustión completa. A su vez tras el análisis de los porcentajes de gases emitidos por cada combustible, es preciso señalar que únicamente el pellet Ulex podría usarse en sustitución de la madera convencional. Esto es así debido a los altos niveles de emisión que presentan el resto de pellets, siendo el Ulex el menos emisivo, aunque siempre detrás de la madera.
- En cuanto a un aspecto negativo se podría resaltar la gran acumulación de ceniza en la rejilla del quemador tras la realización de un ensayo. Esta ceniza lleva asociada escorias (slagings) que provocan el ensuciamiento de la planta, pudiendo dar lugar a fallos en la misma. La ceniza y slagging se acumulan en la parte del quemador, teniendo que llevar a cabo laboriosos procesos de limpieza (5.2.2) después de cada ensayo. Sobre todo, resaltar las grandes concentraciones de slagings presentes en el ensayo con pellet Ulex. Si se deseara obtener una alternativa viable de la madera, tanto el Ulex como la retama podrían serlo, aunque cabe destacar que generan aproximadamente el doble de cenizas que esta, un 44 % frente a un 24 % de la madera.
- Analizando el ensuciamiento se concluye la existencia de una mayor influencia de la masa de adherido que la de depositado para los pellets no comerciales. Esto puede ser debido a la duración del ensayo, ya que comienza formándose la masa adherida sobre la superficie del tubo intercambiador, y hasta que no está formada por completo, no comienzan a depositarse las partículas. Si se quisiera obtener una alternativa al pellet de madera, ninguno de los

expuestos podría hacerlo debido a sus altas masas de ensuciamiento, únicamente el Ulex se acercaría a los niveles de la madera en cuestión de masa depositada.

Otro aspecto a concluir dentro del análisis del fouling - depositado, viene presentado por la utilización de distintos caudales de aire total, viendo como para los combustibles en cuestión, a medida que se aumenta el nivel de aire disminuyen las masas de deposición. Presentando en este caso los niveles más bajos en el ensayo de 240 l/min.

## 7.2 Líneas futuras

A lo largo de este trabajo de fin de grado van surgiendo nuevas problemáticas y posibles mejoras, que dado la amplitud del trabajo no pueden ser analizadas con detalles por lo tanto se proponen para trabajos futuros.

- En la línea de lo que se ha comentado en una de las conclusiones, la ceniza depositada sobre el tubo no es la definitiva debido a que la única que se completa, siendo esta la primera en hacerlo, es la de adherido. De ahí que una propuesta sea la implementación de un ensayo de mayor duración en el que se consiga depositar toda la ceniza y se pueda llevar a cabo un análisis comprobando si existe un valor límite de este tipo de ceniza.
- Se plantea para futuros proyectos la utilización de un abanico más amplio de nuevos combustibles, así como de parámetros nuevos como la energía térmica generada en cada ensayo. De esta manera se podría avanzar en la búsqueda de combustibles que sean capaces de obtener unos resultados similares a la madera, tales que permitan su uso en calderas convencionales.
- En cuanto a la composición de los combustibles empleados, una manera de mejorar la combustión de los mismos y de esta manera minimizar las emisiones, puede ser el uso de aditivos. Estos le proporcionarían al pellet utilizado unas nuevas propiedades que mejoran sus características y de esta manera los resultados en un proceso de combustión.
- En relación a la planta experimental se podrían implementar algunas mejoras como la instalación de un sistema de aspiración a la altura del quemador. El cual, tras la retirada de las cenizas y escorias de mayor tamaño, se active y consiga eliminar todas las partículas restantes. De esta manera se aseguraría tener un espacio libre de impurezas para llevar a cabo una combustión eficiente. Así mismo se ahorraría tiempo en la utilización de instrumentos más rudimentarios como aspiradoras convencionales para dicha limpieza.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad.pdf». Accedido: 25 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- [2] «Renovables en el mundo y en Europa», *APPA Renovables*. <https://www.appa.es/energias-renovables/renovables-en-el-mundo-y-en-europa/> (accedido 25 de enero de 2022).
- [3] «Los inversores globales inyectaron medio billón de dólares al sector de energías limpias en 2020». <https://elperiodicodelaenergia.com/los-inversores-globales-inyectaron-medio-billon-de-dolares-al-sector-de-energias-limpias-en-2020/> (accedido 25 de enero de 2022).
- [4] nicholasnhede, «Energy transition: Investors move away from fossil fuels», *Power Engineering International*, 21 de julio de 2021. <https://www.powerengineeringint.com/renewables/global-investment-in-the-energy-transition-hits-500-billion-energy-transition/> (accedido 25 de enero de 2022).
- [5] Ambientum, «Balance de la biomasa - Enciclopedia Medioambiental», *Ambientum Portal del Medioambiente*. <https://www.ambientum.com/> (accedido 25 de enero de 2022).
- [6] «Biomasa - EVE». <https://www.eve.eus/Actuaciones/Actuaciones/Biomasa?lang=es-es> (accedido 25 de enero de 2022).
- [7] «La UE invierte 122 millones de euros para descarbonizar la economía», *European Commission - European Commission*. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip\\_21\\_3842](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_21_3842) (accedido 25 de enero de 2022).
- [8] E. Works, «Europa defiende el uso de la biomasa como fuente de energía renovable ante los lobbies - Actualidad RETEMA», <https://www.retema.es/>. <https://www.retema.es/noticia/europa-defiende-el-uso-de-la-biomasa-como-fuente-de-energia-renovable-ante-los-lobbie-WdsDm> (accedido 25 de enero de 2022).
- [9] «Consumo de Energía en España | Consumo eléctrico | [guiaenergia.idae.es](http://guiaenergia.idae.es)», *GuiaEnergia*. <http://guiaenergia.idae.es/el-consumo-energia-en-espana/> (accedido 25 de enero de 2022).
- [10] S. Fernández, «España necesita invertir un tercio del PIB para lograr un futuro 100% renovable», *elconfidencial.com*, 11 de mayo de 2021. [https://www.elconfidencial.com/empresas/2021-05-11/transicion-ecologica-renovables-energia-bra\\_3070123/](https://www.elconfidencial.com/empresas/2021-05-11/transicion-ecologica-renovables-energia-bra_3070123/) (accedido 25 de enero de 2022).
- [11] M. de Gregorio, «BIOMASA EN ESPAÑA. GENERACIÓN DE VALOR AÑADIDO Y ANÁLISIS PROSPECTIVO», p. 28. [https://www.ief.es/docs/destacados/publicaciones/revistas/pgp/97\\_03.pdf](https://www.ief.es/docs/destacados/publicaciones/revistas/pgp/97_03.pdf)
- [12] «El consumo de biomasa en España | Formación de ingenieros». <https://www.tecpa.es/consumo-biomasa/> (accedido 25 de enero de 2022).
- [13] «Biomasa | Idae». <https://www.idae.es/tecnologias/energias-renovables/uso-termico/biomasa> (accedido 31 de enero de 2022).
- [14] Regueiro Pereira, Araceli. PFC. 2013.
- [15] «Figura 4.8. Esquema del reactor de pirólisis rápida en lecho circulante.», *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-48-Esquema-del-reactor-de-pirolisis-rapida-en-lecho-circulante\\_fig8\\_281976634](https://www.researchgate.net/figure/Figura-48-Esquema-del-reactor-de-pirolisis-rapida-en-lecho-circulante_fig8_281976634) (accedido 14 de marzo de 2022).
- [16] «Calderas pirotubulares y acuotubulares | VYC Industrial». <https://vycindustrial.com/calderas-de-vapor-pirotubulares-y-acuotubulares/> (accedido 27 de enero de 2022).
- [17] M. Domínguez, «CENTRALES DE BIOMASA: TIPOS DE CALDERA Y CASO PRÁCTICO», oct. 2018. [https://www.researchgate.net/profile/Manuel-Dominguez-10/publication/328307481\\_CENTRALES\\_DE\\_BIOMASA\\_TIPOS\\_DE\\_CALDERA\\_Y\\_CASO\\_PRACTICO/links/5bc5caad299bf17a1c559f71/CENTRALES-DE-BIOMASA-TIPOS-DE-CALDERA-Y-CASO-PRACTICO.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Manuel-Dominguez-10/publication/328307481_CENTRALES_DE_BIOMASA_TIPOS_DE_CALDERA_Y_CASO_PRACTICO/links/5bc5caad299bf17a1c559f71/CENTRALES-DE-BIOMASA-TIPOS-DE-CALDERA-Y-CASO-PRACTICO.pdf)

- [18] Admin, «Fabricación de pellets», *Energías Renovables*, 3 de diciembre de 2014. <http://www.energiarenovablesinfo.com/biomasa/fabricacion-pellets/> (accedido 1 de febrero de 2022).
- [19] «UNE-EN ISO 16948:2015 Biocombustibles sólidos. Determinación d...» <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055295> (accedido 10 de marzo de 2022).
- [20] D. L. Casas, «Análise elemental». <https://cactiweb.webs.uvigo.es/Joomla/index.php/gl/seguridade-alimentaria-vigo/analise-elemental-irms#requisitos-das-mostras> (accedido 6 de marzo de 2022).
- [21] «UNE\_EN\_ISO\_1812518.pdf». <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0060319>
- [22] Pérez Orozco, Raquel. “Contributions to the reduction of particulate matter emissions during biomass combustion processes”. Tesis doctoral, 2020.
- [23] Aller, Carmen. “Análisis de la viabilidad técnica de nuevos combustibles en quemador experimental de biomasa”. TFG. 2019.