



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis experimental de las emisiones de combustibles
alternativos en un quemador de biomasa.*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: José María Larios Pérez

DIRECTORES: Araceli Regueiro Pereira
Juan Jesús Rico Fuentes

CURSO ACADÉMICO: 2019-2020

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis experimental de las emisiones de combustibles
alternativos en un quemador de biomasa.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

La realización de este trabajo de fin de grado presenta como principal temática de estudio las emisiones tanto gaseosas como de partículas durante la combustión de biomasa. Para la realización de los ensayos se emplea pellet de vid y pellet de madera comercial, con el fin de hacer una comparativa entre ellos. Los ensayos se llevaron a cabo en un quemador experimental de biomasa acuotubular de lecho fijo. La configuración de la instalación presenta una gran versatilidad, permitiendo analizar un amplio rango de modos de operación.

Para los diferentes ensayos realizados se varían una serie de parámetros como son el combustible utilizado, el caudal total de aire utilizado, la proporción de aire que se introduce a través del conducto de entrada de aire primario y secundario. De este modo, se modifican las características de la combustión, permitiendo un estudio de las emisiones de partículas y emisiones gaseosas para diferentes configuraciones de la instalación.

Las muestras se toman de los gases de escape de los diferentes ensayos llevados a cabo. Se emplea un impactador de partículas y un analizador de gases, para la medición de las partículas y la composición de los gases emitidos respectivamente. Los resultados obtenidos en cada ensayo son analizados con la finalidad de obtener conclusiones relativas a la viabilidad comercial del empleo de nuevos combustibles (pellet de vid), también se establecen aquellos parámetros operativos óptimos para un correcto funcionamiento de las instalaciones.

PALABRAS CLAVE

Biomasa, pellet, emisiones, gases, partículas, madera, vid

AGRADECIMIENTOS

A mi amigo Luisete, por enseñarme a valorar lo importante de la vida.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
Índice de Esquemas	6
1 Introducción.....	7
1.1 Situación energética global.	7
1.2 Situación energética en España.....	8
1.3 Situación energética en Galicia.....	9
2 La Biomasa.....	11
2.1 Clasificación de la biomasa.....	12
2.2 Características energéticas de la biomasa.	12
2.2.1 Composición química.	12
2.2.2 Tamaño y forma.....	12
2.2.3 Humedad.....	12
2.2.4 Contenido en cenizas.	13
2.2.5 Densidad aparente.....	13
2.3 Métodos de procesado de la biomasa para la obtención de energía.....	14
2.3.1 Procesos termoquímicos.	14
2.3.2 Procesos biológicos.	14
2.4 Ventajas e inconvenientes del aprovechamiento de la biomasa.	14
2.4.1 Ventajas.	14
2.4.2 Desventajas.	15
3 El combustible.....	17
3.1 El pellet como combustible.....	17
3.1.1 Proceso de fabricación.....	17
3.1.2 Características del pellet empleado en los ensayos.	19
3.2 Tipos de calderas.....	20
3.2.1 Calderas acuotubulares.	20
3.2.2 Calderas pirotubulares.	21
4 Problemáticas de la combustión de biomasa.....	23
4.1 Emisión de gases.....	23
4.2 Emisión de partículas.....	24
5 Estudios previos	27

5.1 Evolución de la temperatura en el quemador.....	27
5.2 Efecto de la utilización de material poroso.	28
5.3 Diferentes diseños de secundario.	30
5.4 Ciclos de alimentación.	31
6 Instalación experimental y equipos de medida.....	35
6.1 Descripción general de la instalación.....	35
6.2 Equipos auxiliares.	37
6.2.1 Analizador de gases.	37
6.2.2 Impactador de partículas.	38
7 Metodología de ensayo.....	41
7.1 Acciones requeridas antes del encendido de la instalación.....	41
7.2 Encendido y funcionamiento de la instalación.	41
7.3 Recogida y presentación de datos.	42
8 Análisis de los resultados	45
8.1 Estabilidad de la instalación.....	46
8.2 Emisión de partículas.	47
8.2.1 Concentración de partículas. Vid como combustible.	47
8.2.2 Comparación entre la emisión de partículas con pellet de vid y con pellet de madera. ...	48
8.2.3 Distribución de partículas.	49
8.3 Emisión de gases.	50
8.3.1 Emisiones de O ₂	50
8.3.2 Emisiones de CO.	51
8.3.3 Emisiones de CO ₂	53
8.3.4 Emisiones de NO.	54
8.4 Correlación entre la emisión de gases y la emisión de partículas.	55
9 Conclusiones	57
10 Líneas futuras	59
11 Bibliografía.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

1-I Diagrama consumo energético global. Fuente: elaboración propia. [1]	7
1-II Porcentaje de energía procedente de fuentes renovables, 2017. [2].....	8
1-III Diagrama consumo energético nacional. Fuente: elaboración propia. [4].....	9
1-IV Gráfico dependencia energética nacional. [5].....	9
1-V Diagrama consumo energético en Galicia.Fuente: elaboración propia. [6]	10
2-I Generación de biomasa. Fuente: [7]	11
3-I Pellet.	17
3-II Clasificación de las calderas según su diseño. Fuente: Mebotec tecnología.....	21
4-I Concentración de partículas finas en función del combustible empleado. [11]	25
4-II Composición de las partículas finas emitidas en función del combustible. [11]	25
4-III Tamaño de partículas para diferente caudal de aire suministrado. [11].....	26
5-I Distribución axial de la temperatura del flujo de gases medida con termopares.....	27
5-II Material poroso utilizado en el ensayo.	29
5-III Concentración de partículas emitidas en el quemador de biomasa.....	29
5-IV Distribución de partículas finas medidas con el impactador de partículas.	30
5-V Resultados resumidos para ACT.	32
5-VI Resultados resumidos para CCT.....	33
6-I Instalación experimental.	36
6-II Presentación de composición de gases por el analizador.	38
6-III Impactador de partículas Dekati. [19]	38
7-I Proceso de encendido de la cámara de combustión.....	42
7-II Ejemplo hoja registro de partículas.	43
7-III Ejemplo de presentación de comportamiento de los gases.	43
8-I Estabilidad de la instalación en función de las emisiones gaseosas. Pellet de vid	47
8-II Concentración de partículas para la vid. Primer impactador.....	47
8-III Concentración de partículas para la vid. Segundo impactador.	48
8-IV Comparación emisión de partículas entre pellet de vid y pellet de madera.....	48
8-VII Distribución de partículas para la vid. Primer impactador.	49
8-VIII Distribución de partículas para la vid. Segundo impactador.....	49
8-IX 8 VI Distribución de partículas para la madera. Primer impactador.....	50
8-X Distribución de partículas para la madera. Segundo impactador.	50
8-XI Emisiones O ₂ para la vid.	51
8-XII Emisiones O ₂ para la madera.	51
8-XIII Emsiones de CO para la vid.	52

8-XIV Emisiones de CO para la madera.	52
8-XV Emisiones de CO ₂ para la vid.	53
8-XVI Emisiones de CO ₂ para la madera.	53
8-XVII Emisiones de NO para la vid.	54
8-XVIII Emisiones de NO para la madera.	54
8-XIX Porcentaje de CO frente a concentración de partículas para pellet de vid.	55
8-XX Porcentaje de CO frente a concentración de partículas para pellet de madera.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Análisis inmediato pellet de madera comercial.....	19
Tabla 2 Análisis elemental pellet de madera comercial.	19
Tabla 3 Análisis inmediato pellet de vid.	19
Tabla 4 Análisis elemental pellet de vid.	19
Tabla 5 Análisis de ceniza XRF de madera comercial y vid.....	20
Tabla 6 Características de los diferentes ciclos de alimentación.	31
Tabla 7 Resumen de los ensayos realizados.....	46

ÍNDICE DE ESQUEMAS

Esquema 1 Esquema general del funcionamiento de la instalación. Fuente: [17].	37
Esquema 2 Proceso de preparación y análisis de los filtros del impactador.	39

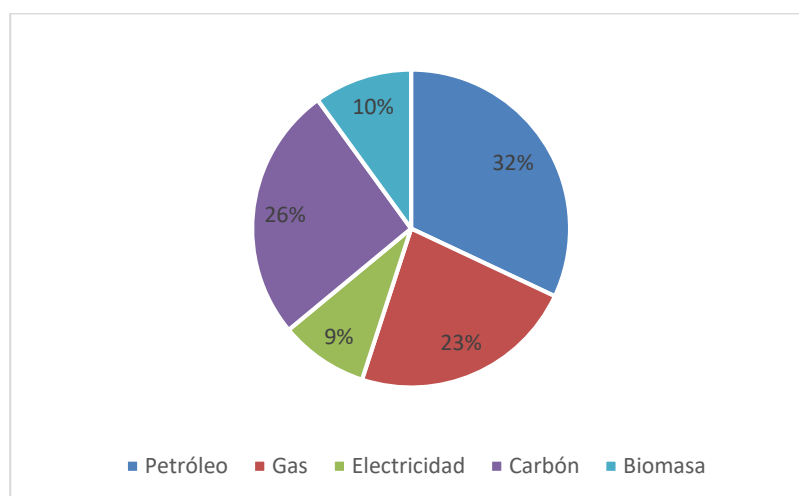
1 INTRODUCCIÓN

1.1 Situación energética global.

La explotación energética en la actualidad se encuentra inmersa en una situación preocupante, en cuanto a lo que el gasto de recursos no renovables se refiere, de la cual no se conocen sus consecuencias económicas y sociales, y sobre la que expertos de la materia suelen ser bastante pesimistas en su análisis. La precaria situación que vive este sector en la actualidad lleva, inevitablemente, a considerar todas las opciones y recursos que presentan accesibilidad para autoabastecimiento.

Todos los países desarrollados utilizan como base de su abastecimiento energético las energías convencionales tales como el carbón, petróleo, gas, energía hidráulica y uranio para, a través de diversos métodos de explotación, lograr su aprovechamiento práctico.

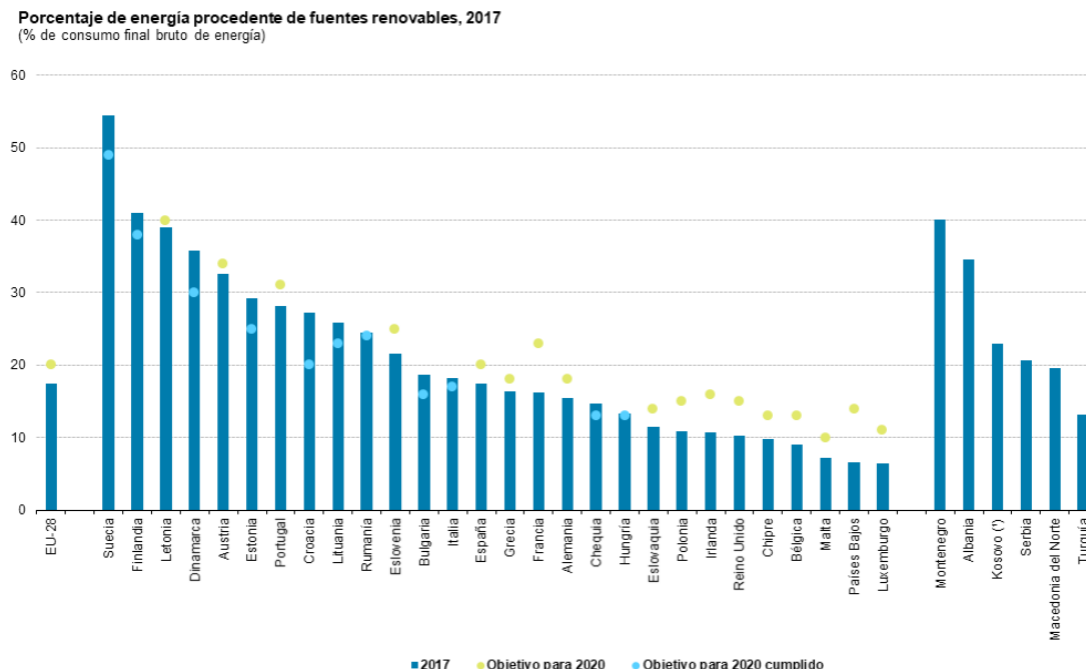
En el siguiente gráfico se representa el consumo de los diferentes recursos a nivel global para el año 2018:



1-I Diagrama consumo energético global. Fuente: elaboración propia. [1]

Frente a los ya mencionados recursos convencionales, que se mantienen como los más utilizados, se observa que una parte importante de la explotación de estos corresponde a la biomasa como medio para la obtención de combustible.

El gráfico 1-II muestra un diagrama porcentual de la explotación de energías renovables por los distintos países europeos. Se trata de un valor porcentual en el contexto interno de cada país.



1-II Porcentaje de energía procedente de fuentes renovables, 2017. [2]

Desde 2007, el empleo de energías renovables en Europa ha pasado de ser de un 11% a superar el 17% en tan sólo una década. Existe una mayor tendencia para la explotación de energías limpias entre los países del norte y del este de Europa. España se sitúa en la media de estos valores, alcanzando un 17,5%, aunque aún muy lejanos quedan los líderes de este sector: Suecia con un 54,5% y Finlandia con un 41%.

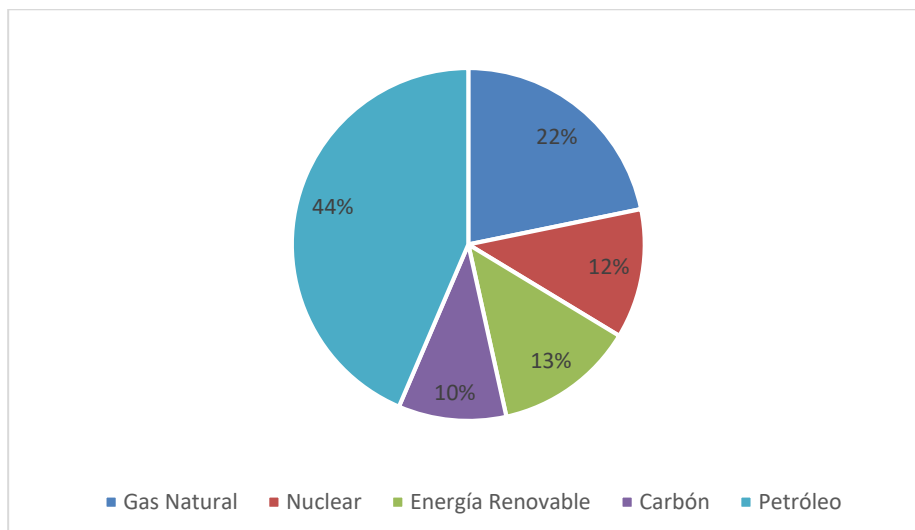
1.2 Situación energética en España.

En este contexto marcado por la situación energética global en el apartado anterior, la directiva 2009/28/CE [3] del Parlamento Europeo y del Consejo establece que cada estado ha de desarrollar un plan de acción de energías renovables. Los objetivos que recoge España en el PANER¹ tratan de que las energías renovables han de representar un 20% del consumo total bruto de energía y un 10% del total de energía empleada para transporte. Los tres ejes sobre los que se desarrolla este plan de acción en el ámbito nacional son los siguientes:

- Exceso de consumo. España necesita más Energía que la media de países europeos para producir una unidad del producto interior bruto.
- Dependencia energética de España sobre otras naciones.
- Emisiones elevadas de efecto invernadero.

Datos facilitados por el Ministerio para la Transición Ecológica, actualizados por última vez en el año 2017, muestran los resultados de este plan de actuación de energías renovables.

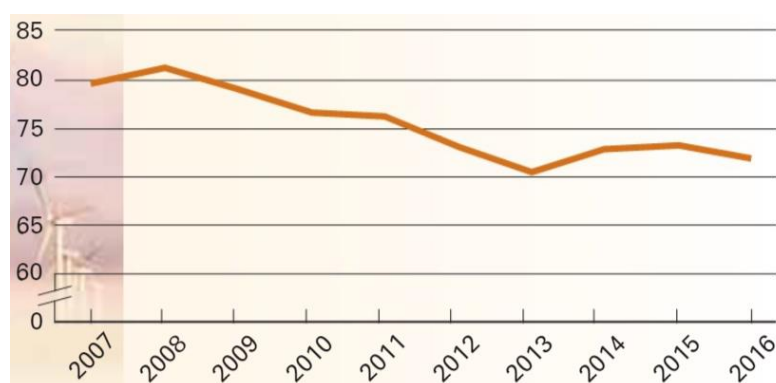
¹ Plan de acción nacional de energías renovables.



1-III Diagrama consumo energético nacional. Fuente: elaboración propia. [4]

Los datos presentados en la figura 1-III muestran que se está bastante lejos de alcanzar ese 20% de consumo general procedente de energías renovables, representado en el gráfico porcentual anterior como un 13%.

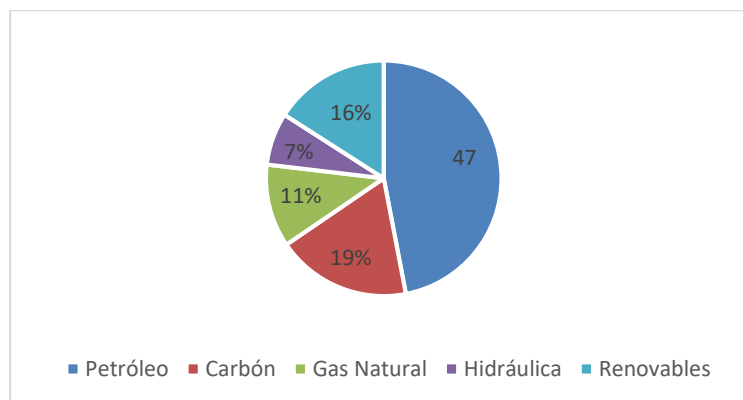
Por otra parte, España sí que ha mejorado en lo referente a dependencia energética desde que se firmara el plan, como se puede apreciar porcentualmente en el siguiente gráfico:



1-IV Gráfico dependencia energética nacional. [5]

1.3 Situación energética en Galicia.

Por su geografía y entorno Galicia es una región que se presta a la explotación de sus recursos naturales para la obtención de energías renovables. Se puede observar en el gráfico que se muestra a continuación una realidad muy distinta, donde, siguiendo la tónica nacional, las energías convencionales predominan y las energías renovables siguen teniendo una importancia menor de la deseable.

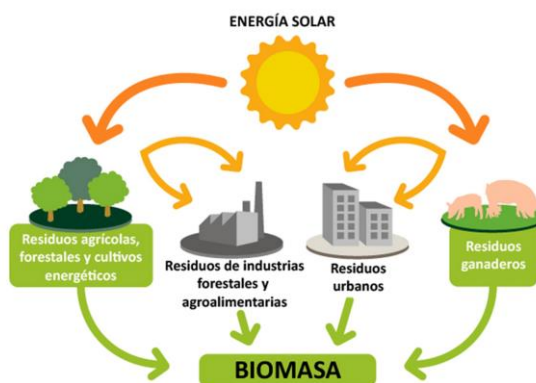


1-V Diagrama consumo energético en Galicia.Fuente: elaboración propia. [6]

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el análisis de la viabilidad comercial de pellet fabricado a partir de restos de podas de vid recogidos en el sur de Galicia y norte de Portugal. Para analizarlo se realizaron ensayos con diferentes parámetros, y se centró el análisis en las emisiones gaseosas y de partículas. Todos los resultados obtenidos se compararon con pellet de madera comercial, con el fin de determinar la viabilidad y establecer los parámetros óptimos de funcionamiento.

2 LA BIOMASA

La Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de la energía procedente de fuentes renovables, define la biomasa como “*la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales*”. Es decir, el término biomasa hace referencia a toda materia tanto origen natural como procesado de carácter biodegradable, reciente en el tiempo y susceptible de ser empleado para producir energía. [7]



2-1 Generación de biomasa. Fuente: [7]

Se considera la biomasa como una fuente de energía renovable ya que su aportación de CO₂ al medio en la liberación de energía que se produce en la combustión es neutro. Las emisiones de este gas que se producen en la combustión son las mismas que aprovechan las plantas para realizar su proceso de fotosíntesis. Esto no ocurre con los combustibles fósiles ya que, en la combustión de estos, el CO₂ que se libera procede de materia que lleva en el medio millones de años y, por tanto, aportar más cantidades de CO₂ favorece el efecto invernadero.

2.1 Clasificación de la biomasa.

- Biomasa natural: es aquella que genera el medio natural sin intervención del ser humano. Comprende árboles, raíces, hojas, ramas pequeñas... Son recursos que, aunque no son aprovechables para la construcción, poseen un alto poder calorífico, ideal para la obtención de energía aprovechable.
- Biomasa residual: al contrario que la natural, su procedencia deriva de la acción humana. Residuos biodegradables como madera, serrín, productos alimenticios, etc. Estos elementos en su proceso de descomposición emiten gases de efecto invernadero como el metano o el CO₂. Su reciclaje para la obtención de energía, además de ser económicamente muy favorable, a nivel social supone una liberación de altas cantidades de residuos.
- Biomasa seca: se trata de la biomasa que se encuentra con un nivel de humedad por debajo del umbral del 60%. Es más propensa a ser utilizada en procesos termoquímicos o fisicoquímicos.
- Biomasa húmeda: la cantidad de humedad que posee excede el umbral mencionado del 60%. Los procesos químicos son los habituales para su aprovechamiento energético.

2.2 Características energéticas de la biomasa.

2.2.1 Composición química.

La biomasa está formada por materia orgánica e inorgánica. La materia orgánica se consume durante la combustión para su transformación energética, mientras que la materia inorgánica es la que da lugar a la formación de cenizas y residuos.

Es importante conocer la composición química de la biomasa que se trata, analizando los componentes más importantes como son el carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y nitrógeno, así como oxígeno.

2.2.2 Tamaño y forma.

Estos parámetros afectan directamente a la velocidad de carbonización del combustible, siendo la velocidad un parámetro determinante durante el proceso de combustión. Si la reacción química se produce a una velocidad demasiado elevada, llegando a un punto de descontrol, puede ocasionar que la reacción no se produzca de forma completa y originando así inquemados y emisión de gases como el monóxido de carbono que favorecen el efecto invernadero.

Se determina la velocidad de la carbonización a partir de la siguiente fórmula:

$$v = \frac{V/S}{Vol \cdot t}$$

Equation 1

V: Volumen de la partícula (mm³)

S: Superficie de la partícula (mm²)

Vol: contenido en volátiles en base seca

t: duración del experimento (s)

2.2.3 Humedad.

La cantidad de agua en peso por kilogramo de materia que posee la biomasa es un factor a tener en cuenta ya que, durante la combustión, a mayor porcentaje de humedad presente, menor es la energía útil

que se obtiene del proceso. Parte de la energía se pierde al ser absorbida por el agua para su proceso de cambio de estado. Son necesarios valores de humedad relativa inferiores al 30% para llevar a cabo el proceso. En caso de que se tengan valores superiores a este valor, es necesario realizar un pretratamiento para reducir la humedad relativa.

Se puede obtener los valores de la humedad en base seca y la humedad en base húmeda a partir de las siguientes ecuaciones:

$$h = \frac{P_h - P_o}{P_o}$$

Equation 2

$$H = \frac{P_h - P_o}{P_h}$$

Equation 3

h: humedad en base seca
H: humedad en base húmeda
P_o: peso seco
P_h: peso húmedo

Así, se puede ver cómo afecta el porcentaje de humedad de la biomasa al poder calorífico de la misma a través de la siguiente fórmula:

$$PCI = \frac{PCI_s}{1 + \%h} - \%h \cdot (c_p \cdot \Delta t + L)$$

Equation 4

PCI: poder calorífico inferior (kJ/kg)
PCI_s: poder calorífico inferior en base seca (kJ/kg)
c_p: calor específico a presión constante (J/kg·K)
Δt: variación de la temperatura (K)
L: calor latente de evaporación (kJ/kg)

2.2.4 Contenido en cenizas.

A mayor contenido en cenizas, menor es la temperatura de combustión y más difícil resulta la transmisión de calor. Por lo tanto, se buscará minimizar su presencia antes del proceso. La obstaculización de los orificios de entrada de oxígeno en el quemador y el degradado de las parrillas son otros de los efectos no deseados que provoca la presencia de cenizas.

2.2.5 Densidad aparente.

La relación de energía por unidad de volumen es mayor cuanto mayor es la densidad de la biomasa. Se requieren quemadores más pequeños para el proceso de combustión y el transporte y almacenaje se resulta más sencillo.

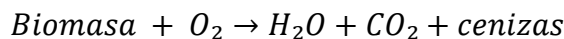
2.3 Métodos de procesamiento de la biomasa para la obtención de energía.

Se habla en este apartado de los métodos para el procesamiento de la biomasa teniendo como objetivo su aprovechamiento energético.

2.3.1 Procesos termoquímicos.

2.3.1.1 Combustión.

Es la forma más antigua de la historia para la obtención de energía. El proceso se basa en una reacción de oxidación que se obtiene exponiendo la biomasa a altas temperaturas. Es habitual durante este proceso trabajar con oxígeno en exceso ya que evita la formación como producto de un elemento tan perjudicial como es el monóxido de carbono (CO). Durante la reacción se desprende calor, siendo esta la característica principal de la combustión de la biomasa ya que ese calor resulta de utilidad para uso en domicilios e instalaciones. La siguiente fórmula expone la reacción química que se lleva a cabo durante el proceso:



2.3.1.2 Pirólisis.

Proceso de combustión incompleta que se realiza a una temperatura de 500°C y en ausencia de oxígeno para la obtención de carbón vegetal. Durante el proceso se libera un gas pobre, de poco poder calorífico, que puede ser aprovechado para el funcionamiento de motores. [8]

2.3.1.3 Gasificación.

El resultado del procesamiento de la biomasa es un combustible gaseoso, aprovechable para motores o turbinas. Al contrario que en el proceso de combustión, se utiliza menos oxígeno del requerido para una oxidación completa, lo que da lugar a una oxidación parcial de la biomasa. El poder calorífico del gas resultante depende del agente gasificante utilizado. [8]

2.3.1.4 Liquefacción.

En este proceso, se somete la biomasa a una temperatura menor que en los procesos que se han mencionado anteriormente, entre 250°C y 300°C, y a una presión de entre 100 y 200 bares, obteniendo así la biomasa en estado líquido, ideal para biocombustibles.

2.3.2 Procesos biológicos.

2.3.2.1 Fermentaciones alcohólicas.

Proceso de obtención de alcohol en forma de etanol a partir de hidratos de carbono acumulados en la biomasa, tras diferentes etapas. El tipo de biomasa afecta a la eficiencia del proceso. [8]

2.3.2.2 Fermentación metánica.

Digestión de la biomasa en ausencia de oxígeno por parte de bacterias. Ideal para la biomasa húmeda, especialmente la que procede de recursos ganaderos o de lodos. [8]

2.4 Ventajas e inconvenientes del aprovechamiento de la biomasa.

2.4.1 Ventajas.

- La cantidad de CO₂ que se emite a la atmósfera contribuye al efecto invernadero, pero, como se ha comentado anteriormente, en la combustión de biomasa se da un ciclo cerrado de corta

duración. El dióxido de carbono que se expulsa durante el proceso es absorbido por las plantas, a diferencia de lo que ocurre con los combustibles fósiles.

- La cantidad de recursos de biomasa disponibles, que supera a la que presentan los combustibles fósiles, hace de la biomasa un recurso competitivo para la obtención de combustibles y crea menos dependencia de los combustibles fósiles.
- Se trata de un recurso muy versátil pues se pueden obtener múltiples tipos de combustibles y dar lugar a diferentes formas de energía.
- Muy barato en comparación con los combustibles fósiles.
- Se puede obtener a nivel doméstico, sin dependencia de grandes compañías energéticas.

2.4.2 Desventajas.

- No se trata de una energía completamente limpia. Si bien las emisiones de CO₂ se cierran en un ciclo cerrado que no afecta al efecto invernadero, se producen otras emisiones que pueden afectar al entorno local, aunque no de una manera tan drástica como lo hacen los combustibles fósiles.
- Su coste es mayor que el de otras energías renovables como son la solar, la eólica o la hidráulica.
- En el caso de la biomasa obtenida de los recursos forestales, existe la amenaza de la deforestación si no se llevan a cabo una repoblación de aquello que se consume.
- Es necesario bastante espacio para el almacenamiento y procesamiento de los recursos. Espacio que no siempre está disponible, especialmente en las zonas urbanas.
- El consumo de agua en la formación de recursos de biomasa es muy elevado, siendo el agua un recurso natural muy preciado y cada vez de más difícil acceso.
- Los procesos son más ineficientes que los que se llevan a cabo con los combustibles fósiles.
- Si bien su influencia está creciendo, aún está en vías de desarrollo.

3 EL COMBUSTIBLE

3.1 El pellet como combustible.

Según la norma UNE-EN ISO 17225:2014 el pellet es *“biocombustible densificado a partir de la biomasa leñosa con o sin aditivos, generalmente con una forma cilíndrica, de longitud aleatoria típicamente de 5mm a 40mm y diámetro hasta 25mm, y con extremos rotos”*.



3-I Pellet.

3.1.1 Proceso de fabricación.

La formación de los pellets a partir de los residuos forestales requiere de varias etapas que se desarrollan en los siguientes puntos del trabajo.

3.1.1.1 Materia prima.

Se emplea para la formación de pellets el serrín, astillas y virutas. Para evitar la emisión de gases de efecto invernadero y tóxicos durante la combustión, es un requisito importante que esta materia prima no haya sido tratada con agentes químicos.

La pelletización es un proceso continuo, por ello, se debe garantizar que nunca se acaben las existencias. Además, para obtener la mayor efectividad en la combustión posterior, el almacenamiento de la materia prima ha de asegurar el mantenimiento de las propiedades de esta, y no variar así su poder calorífico.

3.1.1.2 Secado.

Se trata de una de las etapas más importantes del proceso y consiste en disminuir la cantidad de agua presente en la materia prima a pelletizar hasta que el valor de su humedad relativa sea inferior a un 10% y pueda ser empleada para la combustión.

3.1.1.3 Triturado.

La materia prima se tritura para obtener un material de menor tamaño y homogéneo. La finalidad de este proceso es, además de la homogeneización del tamaño del pellet, obtener una alimentación estable, reducir el desgaste de los rodillos de la alimentación y obtener un combustible de mayor calidad.

3.1.1.4 Pelletización.

Se somete a la materia prima ya triturada a un proceso de extrusión para su granulado. Se presiona la materia a través de unos rodillos cilíndricos y se hace pasar a través de una lámina de metal con orificios con el tamaño de diámetro del combustible que se quiere obtener. Un sistema de cuchillas situado junto a la lámina metálica corta el material extruido cuando este tiene la longitud que se requiere para los procesos posteriores.

El aumento de la temperatura que sufre la materia durante el proceso de extrusión ocasiona una liberación de lignina, una sustancia desprendida por el propio material que actúa como aglutinante. Para mejorar el proceso, en ocasiones se requiere de una adición extra de aglutinante, ya que el papel de este es fundamental para evitar la emisión de gases de efecto invernadero durante la combustión.

3.1.1.5 Enfriamiento.

Se hace pasar el pellet, tras el proceso de extrusión en el que la temperatura aumenta, por una cámara de enfriamiento en la que desciende la temperatura bruscamente. Con esta etapa se consigue una mayor dureza y resistencia, aumentando la calidad del pellet y favoreciendo su manipulación.

3.1.1.6 Tamizado.

Se somete al pellet a unas vibraciones para eliminar el polvo sobrante generado durante la etapa de pelletización. El polvo sobrante se devuelve al inicio del ciclo, vuelve a ser materia prima, evitando así su desperdicio.

3.1.1.7 Empaquetado.

Una vez finalizada la producción del pellet, se procede al empaquetado para su comercialización. Se suele empaquetar en lotes de entre 15 y 18 kg., aunque también es normal verlo a granel. La forma de empaquetamiento depende de las exigencias del cliente, aunque se ha de garantizar que se preservan las cualidades deseadas.

3.1.2 Características del pellet empleado en los ensayos.

El pellet empleado en los ensayos llevados a cabo en este trabajo fin de grado fue proporcionado por la empresa Gain, una empresa gallega de innovación que se encarga de proveer el pellet para la realización del programa Interreg Biomasa AP, un proyecto conjunto entre España y Portugal.

Al pellet empleado se le realiza un análisis inmediato y un análisis elemental. El primero de ellos aporta información de las características generales del combustible, el segundo aporta información acerca de su composición.

Además, se realiza un análisis XRF, que se trata de un análisis también de tipo elemental, y se lleva a cabo tras excitar la materia con rayos x y rayos gamma.

En los siguientes apartados se muestran los resultados de dichos análisis para los distintos tipos de pellet empleados en el ensayo.

3.1.2.1 Características pellet de madera comercial y pellet de vid.

	Humedad [%]	Volátiles [%]	Carbono fijo [%]	Cenizas [%]
Base seca con cenizas	5.2321	71.57	22.81	0.3879

Tabla 1 Análisis inmediato pellet de madera comercial.

	N [%]	C [%]	H [%]	O [%]*	S [%]**
Base seca sin cenizas	0.084	47.209	6.341	45.9563	-

Tabla 2 Análisis elemental pellet de madera comercial.

* Oxígeno calculado por diferencia.

** Azufre por debajo del límite de detección (DL= 0.3%).

	Humedad [%]	Volátiles [%]	Carbono fijo [%]	Cenizas [%]
Base seca con cenizas	7.467	72.562	16.511	3.46

Tabla 3 Análisis inmediato pellet de vid.

	N [%]	C [%]	H [%]	O [%]*	S [%]**
Base seca sin cenizas	0.78	47.835	5.84	45.545	-

Tabla 4 Análisis elemental pellet de vid.

* Oxígeno calculado por diferencia.

** Azufre por debajo del límite de detección (DL= 0.3%).

	Pellet de madera	Pellet de vid
Elemento	[mg/kg]	[mg/kg]
Na	21.544	325
Mg	482.233	1183
Al	681.497	897
Si	354.921	2064
P	32.414	1011
S	96.776	660
Cl	34.078	312
K	661.652	6753
Ca	589.040	10250
Ti	5.528	21
Cr	0.000	-
Mn	59.441	86
Fe	65.053	410
Ni	2.081	-
Cu	0.000	-
Zn	5.249	91
Rb	4.352	-
Sr	7.201	-
Zr	0.000	-
Ba	0.000	-

Tabla 5 Análisis de ceniza XRF de madera comercial y vid.

3.2 Tipos de calderas.

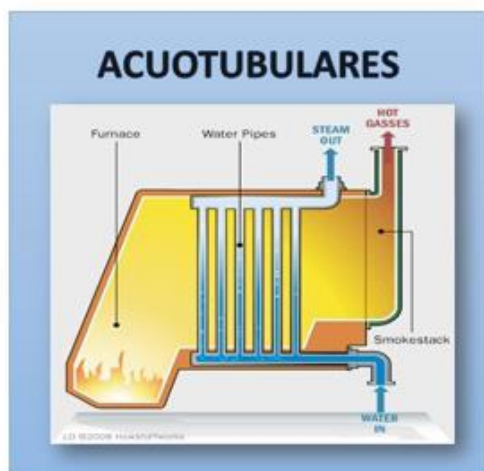
3.2.1 Calderas acuotubulares.

La cámara de combustión se encuentra en la parte central de la instalación, atravesada por un haz de tubos por los que circula agua. Este tipo de instalaciones permite un funcionamiento seguro y dan la posibilidad a que la presión de salida sea elevada. Por estos motivos es la más utilizada en procesos termoeléctricos. Se le pueden añadir sobrecalentadores para conseguir un mayor rendimiento en el proceso de combustión.

3.2.2 Calderas pirotubulares.

Un depósito de agua es el elemento principal de la instalación siendo este recorrido por unos tubos. Dichos tubos contienen gases a altas temperaturas, resultado de la combustión. La falta de seguridad es el gran inconveniente de las calderas de este tipo, ya que hay peligro en caso de que la demanda de energía descienda de forma brusca, pues se produciría un aumento de la presión debido a la acumulación de vapor, que podría causar una explosión.

CLASIFICACIÓN SEGÚN SU DISEÑO



3-II Clasificación de las calderas según su diseño. Fuente: Mebotec tecnología.

4 PROBLEMÁTICAS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA

Son objeto de estudio, fundamentalmente, el valor energético que es capaz de proporcionar la biomasa y, además, las emisiones que derivan de su combustión.

En este apartado se expone de manera teórica la emisión de gases y de partículas que se producen como consecuencia de la combustión de biomasa y sus posibles efectos sobre el efecto invernadero y sobre el ser humano. Se realiza este apartado en base a estudios contrastados.

4.1 Emisión de gases.

[9]Un estudio realizado por Naoharu Murasawa con pellet de madera comercial y con estiércol de pollo muestra que la emisión de gases comienza a ser un problema ya en el momento de su almacenamiento y transporte. Ha habido casos en los que los desechos en un triturador de basura han fermentado, contaminando el ambiente con gases inflamables y causando una explosión. Esta fermentación ha ocurrido en otros casos en el lugar donde se almacenaba la biomasa, desprendiendo grandes cantidades de CO_2 y causando la muerte de trabajadores.

El análisis de los gases de varias muestras, revelan un incremento de la cantidad de CO_2 cuando se le añade agua destilada. También se aprecia generación de H_2 debido a la posibilidad de una fermentación anaeróbica además de la fermentación aeróbica. No se observa emisión de CO ni CH_4 en estas condiciones.

En el ensayo realizado con pellet de madera se aprecia un incremento importante en la emisión de CO_2 en presencia de humedad. Con el estiércol de pollo aumenta la emisión de CO_2 independientemente de la adición de agua destilada.

En condiciones normales, incluso si se desprende CO_2 o gases inflamables, las emisiones se mezclan con el aire y su concentración disminuye por lo que su riesgo es menor.

[10]Un segundo estudio realizado por el Dr. Sippula sobre la combustión de combustible de madera convencional incluye combustible procedente de residuos forestales, residuos de aserraderos y pellets hechos con material de los tallos de madera. Las concentraciones de CO emitidas varían entre 7 y 241 mg/MJ y en algunos casos guarda relación con la cantidad de nitrógeno del combustible. Las concentraciones de SO_2 y HCl son despreciables en la combustión de pellet de madera.

En una combustión completa, el C, H y O del combustible sólo forman CO_2 y H_2O . El vapor de agua aparece cuando el agua se evapora del combustible o durante la oxidación del hidrógeno. Combustibles

de madera también contienen N, S y componentes minerales volátiles. Los compuestos NO_x en gases de combustión se forman principalmente de nitrógeno combustible. A altas temperaturas, NO_x también se forma a partir de N_2 . El N_2O es un gas de efecto invernadero, pero en la combustión de biomasa su emisión suele ser bastante baja. El azufre del combustible se oxida formando SO_x . SO_x y puede formar ácido sulfúrico. Además, de forma particular para los combustibles con un alto contenido de cloro, es habitual la emisión de HCl. Por otra parte, los combustibles de madera contienen pequeñas cantidades de N, S y partículas volátiles de metales alcalinos, por lo tanto, las emisiones NO_x , SO_2 , y HCl son habitualmente bajas. [11]

La combustión de madera en quemadores de pequeña escala es casi siempre incompleta debido a las condiciones locales alrededor de la llama, las bajas temperaturas de combustión, un aporte insuficiente de aire o una pobre mezcla entre los gases de combustión y el aire. Como consecuencia se forma CO e hidrocarburos volátiles. En combustión por lotes, cuando comienza la combustión de carbono la temperatura de la cámara de combustión disminuye, alcanzando en muchos casos un valor menor del necesario para la completa oxidación de CO. Si la combustión es altamente incompleta, compuestos orgánicos complejos se emiten en forma de gas. Uno de volátiles orgánicos más importantes debido a la combustión de biomasa es el metano, que tiene gran impacto sobre el efecto invernadero. El efecto de calentamiento del CH_4 es 21 veces mayor que el del CO_2 . [11]

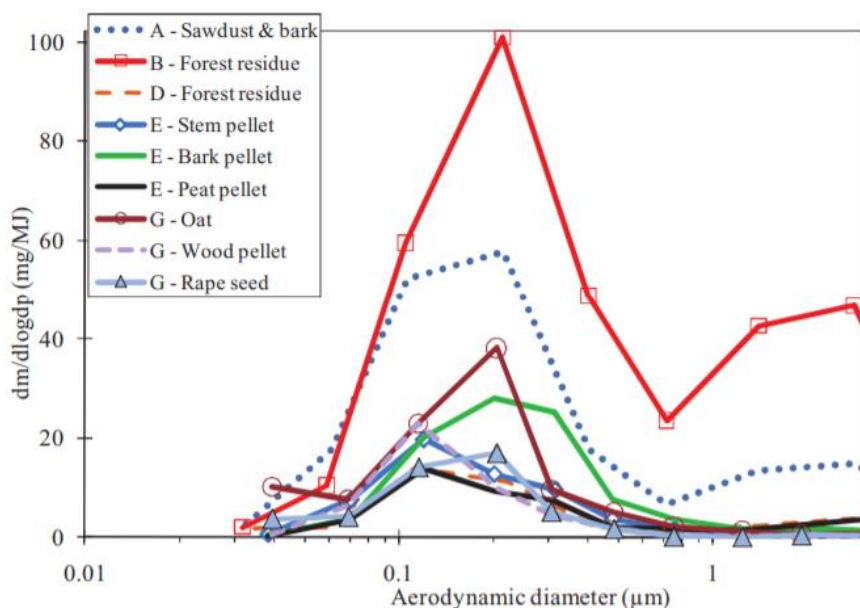
4.2 Emisión de partículas.

[10] En el ensayo realizado por el Dr. Sippula, comentado en el apartado anterior, se observa que la composición de partículas de tamaño menor de $1\mu\text{m}$, son las más peligrosas, pues por su pequeño tamaño pueden acceder al sistema respiratorio de los seres humanos, siendo cancerígenas (en adelante partículas finas) son fundamentalmente potasio, azufre y cloro. Además, en la mayoría de los ensayos había fracciones considerables de zinc, sodio y carbonatos. La composición de partículas finas inorgánicas coincidía con las de la combustión de madera. Los combustibles de cereales diferían de los combustibles de madera generando fracciones más grandes de PO_4 en las partículas finas. Se observa también que la configuración de laboratorio de madera pulverizada produce grandes cantidades de Ca y Mg en las partículas finas, lo que no se observa en la combustión de unidades más grandes. La cantidad de cloro y azufre es muy variable. El uso de combustibles ricos en azufre, aumenta la cantidad de azufre y disminuye la cantidad de cloro de las partículas finas. La cantidad de partículas finas de carbono originadas por una combustión incompleta, varían en función del combustible. La concentración de estas se utiliza para medir la eficiencia de la reacción.

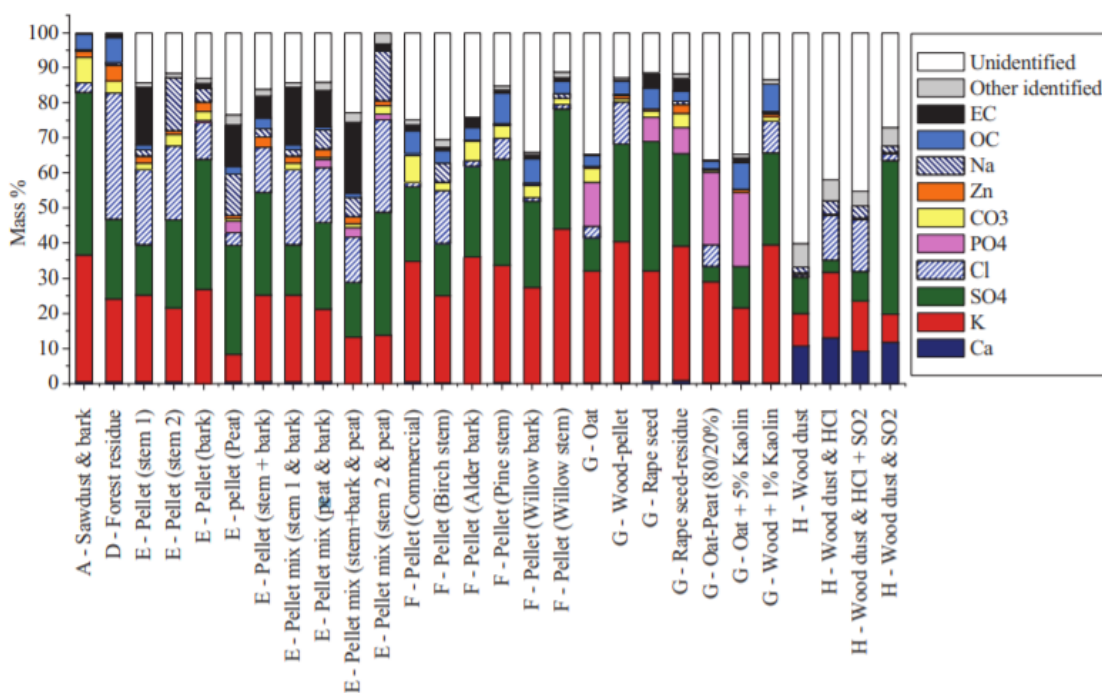
La emisión de partículas distintas del Zn está limitada para la combustión de residuos de acuerdo con la Directiva Europea de combustión de residuos (Directive 2010/75/EU, 2011). Los combustibles del ensayo contienen cantidades considerables de N y Mn, mientras que otros elementos se presentan en cantidades relativamente bajas. Zn, Pb, Cd, Cu, As y Ti se encontraron en la composición de las partículas finas. Por el contrario, el Mn apareció en la formación de las cenizas. La contaminación de estas trazas metálicas no se puede despreciar. Los resultados coinciden cualitativamente con los ensayos realizados en otros quemadores de lecho fijo, pero varían con los obtenidos a partir de un quemador de lecho fluidizado.

En general, los resultados muestran que los compuestos de metales alcalinos dominan la formación de partículas finas.

A continuación, se presentan dos gráficos en los que se muestra la concentración de partículas finas emitidas en función del combustible empleado y la composición de estas partículas finas.



4-I Concentración de partículas finas en función del combustible empleado. [11]

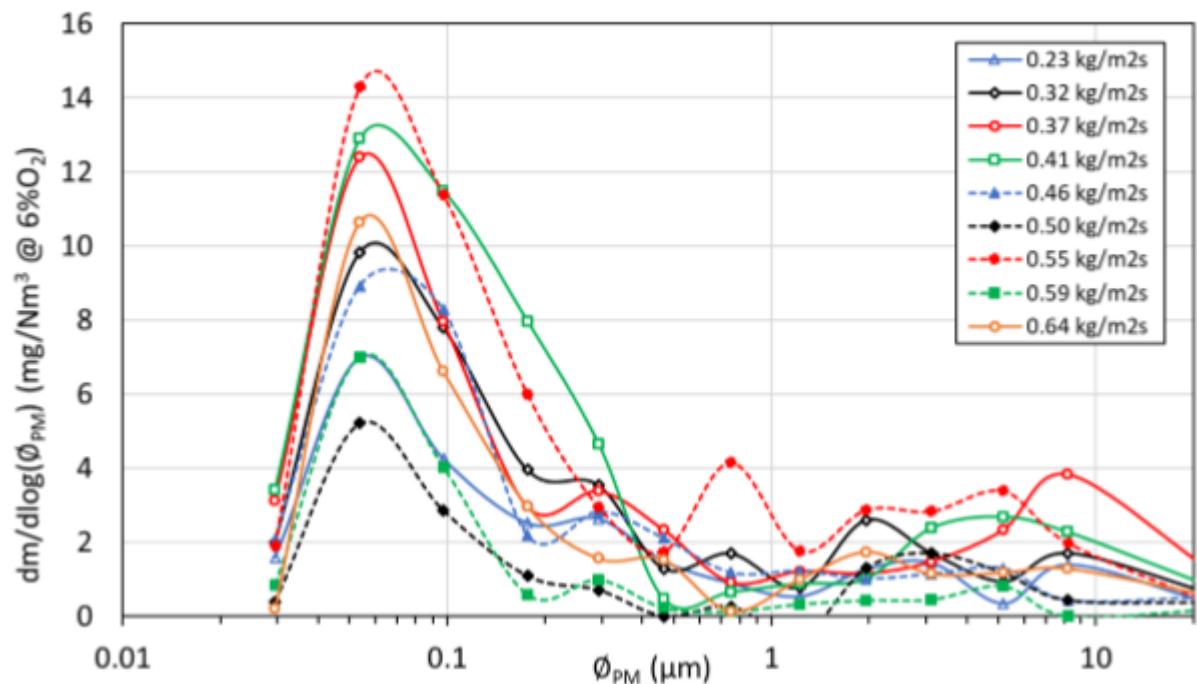


4-II Composición de las partículas finas emitidas en función del combustible. [11]

[12] Utilizando como referencia un ensayo con tres pellets distintos de madera comercial, en el mismo quemador que el que se va a utilizar para este trabajo, se sacan las siguientes conclusiones. Tras estudiar la influencia de los parámetros más significativos para llevar a cabo la combustión, no se consiguió obtener una conclusión. Se variaron los parámetros de: tipo de combustible, cantidad de aire

suministrado y zona de alimentación de dicho aire. Aunque no se pudo demostrar la relación de estos parámetros con la emisión de partículas, sí se pudo delimitar los valores de concentración y dispersión de las partículas emitidas. Se obtuvieron valores de entre 15 y 75 mg/Nm³, datos obtenidos al 6% de O₂. En la misma instalación se ha comprobado que cuando solo se produce una inyección de aire por el primario, sin zonificar, se alcanza un valor de partículas concentradas de hasta 360 mg/Nm³.

Se obtuvo como conclusión del análisis de este ensayo, que el tamaño de las partículas emitidas se sitúa entre 50 y 100 nm, valor menor de una micra, con independencia de la cantidad de aire suministrada durante el proceso. Se muestra gráficamente en la siguiente figura:



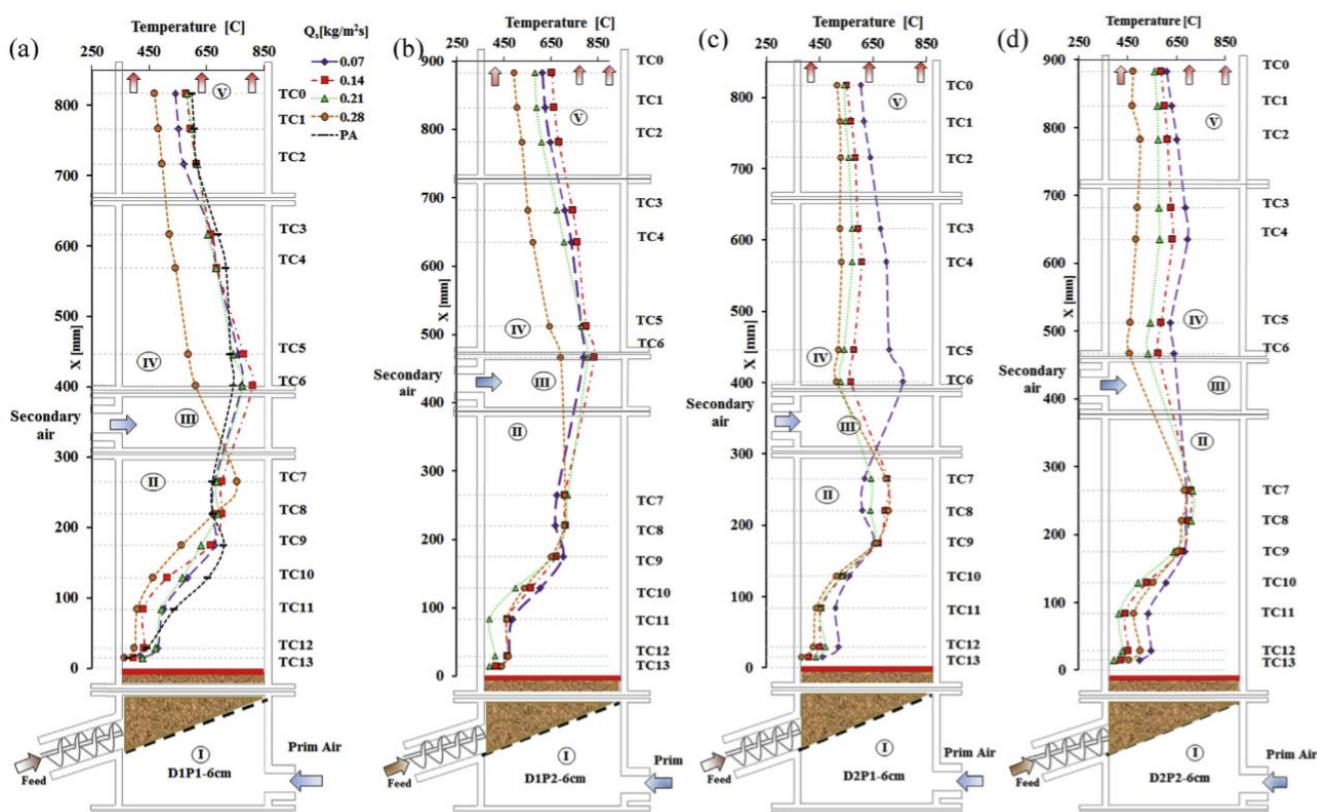
4-III Tamaño de partículas para diferente caudal de aire suministrado. [11]

5 ESTUDIOS PREVIOS

5.1 Evolución de la temperatura en el quemador.

[13] Se utilizan los termopares como elemento de medida para conocer la temperatura del flujo de gas a lo largo del quemador. Se sitúan sobre la línea central del quemador, a una distancia de 3 cm del borde de este.

Para el estudio que se va a realizar se dispone de 14 termopares distribuidos por toda la instalación, el combustible utilizado será pellet de madera comercial. Se asume despreciable el error de medición de los termopares y se analiza con dos geometrías distintas en la entrada de aire del secundario (D1, D2) y dos posiciones distintas del mismo (P1, P2).



5-I Distribución axial de la temperatura del flujo de gases medida con termopares.

Para la zona de combustión primaria (Zona II) se observa que los valores máximos y mínimos de temperatura coinciden ambos con el ensayo D1P1 registrándose unos valores de 360°C por TC13 como valor mínimo y un valor máximo de 755°C por TC7. Se observa en esta zona una tendencia general al aumento progresivo de la temperatura y en la fase final se estabiliza e incluso desciende, especialmente con D2.

La temperatura en la zona de postcombustión (Zona IV) se ve muy afectada por la posición de la entrada de secundario. La distribución general de temperaturas para la zona IV en los ensayos a) y b), representados en la figura anterior, muestra una tendencia lineal con picos en TC6, próximo a la entrada de secundario. Para D2 no sigue esta tendencia. Para D2P1 el pico de temperatura se observa en TC4, aproximadamente a 20 cm de la entrada de aire de secundario. Los resultados revelan además que la temperatura medida por la mayoría de los termopares de la zona IV aumenta para cualquier flujo de aire introducido cuando se aumenta la distancia de la entrada del secundario al lecho. En la zona de postcombustión se registran unos valores de temperatura máximo de 834°C en TC& para D1P2 y mínimo de 460°C en TC6 para D2P2.

5.2 Efecto de la utilización de material poroso.

[14]Este estudio se llevó a cabo en el mismo quemador que se utilizó para llevar a cabo el presente trabajo, el combustible utilizado fue pellet de madera sin aditivos. Los ensayos analizados tienen una duración total de 115 minutos, de los cuáles los primeros 45 minutos se considera período de transición hasta que la planta comienza a trabajar de forma estable. Después de 30 minutos de funcionamiento estable, se conecta el impactador de partículas durante 20 minutos para medir la concentración y distribución de la muestra de partículas. Se emplea el impactador de partículas Dekati DLPI de 13 escalas, capaz de medir la concentración y distribución de partículas, clasificándolas en diferentes tamaños entre 0.073 y 29.068 μm . Para recolectar las partículas en el impactador se utilizan filtros de aluminio que reciben un tratamiento térmico antes y después de cada ensayo.

Se incorpora un módulo de material poroso justo encima de la entrada de aire secundario y se analiza cómo afecta a la emisión de partículas. Los ensayos se realizan con y sin material poroso y situando el módulo en dos alturas diferentes sobre la cámara de combustión: 380 y 540 mm. El material poroso utilizado está formado por óxido de zirconio (ZrO_2) con una porosidad de 10 poros por pulgada y que puede soportar temperaturas de hasta 1750°C.

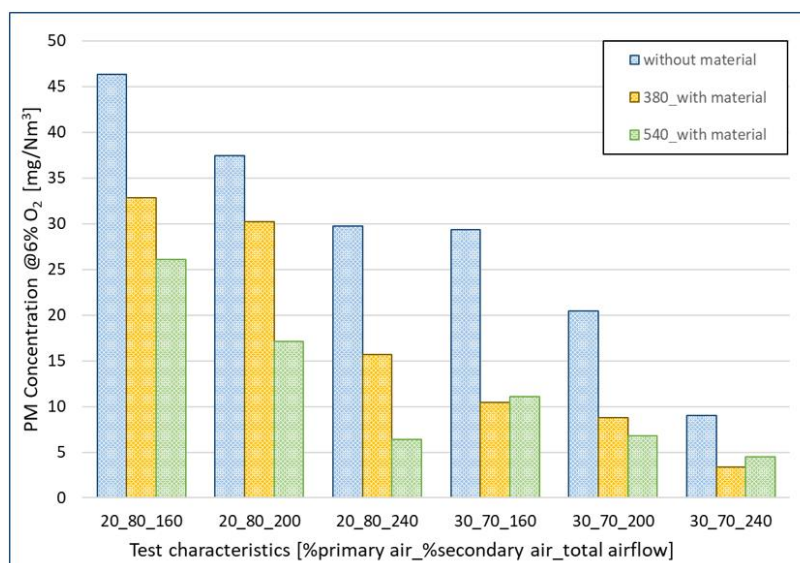


5-II Material poroso utilizado en el ensayo.

Se realizan diferentes ensayos modificando la proporción de aire en el primario y el secundario y el caudal total introducido. Se utilizan los valores de 20_80 y 30_70 (% aire primario_% aire secundario) y valores de caudal total de 160, 200 y 240 l/min.

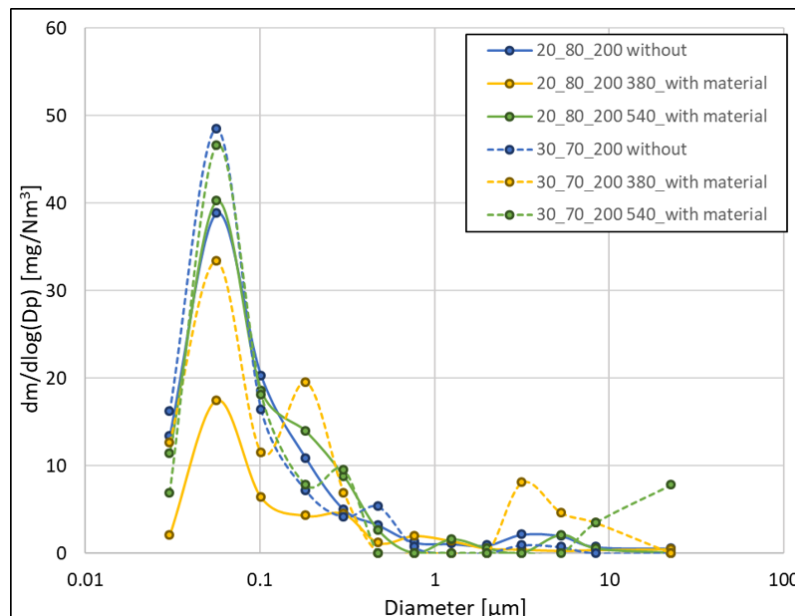
En términos generales, los resultados muestran que la emisión de partículas finas se reduce a mayor caudal de aire introducido. Además, también se ve reducida la emisión de partículas finas para un mismo caudal total de aire introducido, cuanto mayor es el porcentaje de aire en el primario.

En relación al efecto del material poroso, se demuestra que su inclusión en el quemador reduce la emisión de partículas. Se produce una mayor reducción de este tipo de partículas cuando se coloca a una distancia de 540 mm del lecho. Esta posición del material cerámico favorece la alta temperatura del flujo de gas durante una mayor distancia a lo largo del quemador, mejorando la combustión. Se muestran en la siguiente figura de forma gráfica los datos obtenidos:



5-III Concentración de partículas emitidas en el quemador de biomasa.

Respecto a la distribución de partículas, muestran una distribución unimodal. Se comprueba que la mayoría de ellas son de tamaño inferior a $1\ \mu\text{m}$, las más perjudiciales para el ser humano, como se puede comprobar con la figura que se muestra a continuación:



5-IV Distribución de partículas finas medidas con el impactador de partículas.

5.3 Diferentes diseños de secundario.

[15] Se exponen en este punto los resultados obtenidos para diferentes configuraciones de la entrada de aire del secundario en el quemador que se ha empleado para este trabajo. Entre las diferentes posibilidades que presenta la versatilidad de su configuración se realiza el estudio con deflector en dos posiciones diferentes ($H = 240\ \text{mm}$ y $H = 425\ \text{mm}$) y sin deflector de aire. El efecto de un deflector en la línea central del flujo de gases debe de ser la mezcla de los mismos.

El quemador incluye una sección de aire secundario con una altura de $66\ \text{mm}$ que introduce aire a través de 44 agujeros uniformemente distribuidos de $4\ \text{mm}$ de diámetro. Estos agujeros del secundario se sitúan a lo largo de una única fila con una distancia horizontal entre los centros de $10\ \text{mm}$, y centrados en el perímetro de entrada de aire de esta sección. El aire del secundario se proporciona con un ventilador de frecuencia variable. Se mide la cantidad de aire introducida mediante un caudalímetro.

Los ensayos realizados para las diferentes configuraciones muestran tendencias similares en lo que se refiere a la eficiencia de la combustión (conversión de la masa del combustible). Por ello, se puede deducir que el impacto de los deflectores es despreciable.

Las emisiones de NO y CO sí que se ven afectadas por la variación de las condiciones operativas del secundario. La inclusión de un deflector de aire reduce las emisiones de NO y de CO_2 , pero mantiene una cantidad elevada de emisiones de CO. En lo que refiere al NO, estas conclusiones no son sensibles a las distintas posiciones del deflector pues parece que variar su altura de colocación no afecta a las emisiones de este gas.

La presencia de deflectores propicia un aumento de temperaturas en las paredes de la cámara de combustión. Sin embargo, produce un efecto totalmente opuesto en las paredes de la zona de postcombustión, donde la temperatura disminuye.

5.4 Ciclos de alimentación.

[16] Para el análisis de esta variable se utiliza como referencia un estudio de los diferentes ciclos de alimentación para el quemador. Se utilizan ciclos más largos de lo habitual frente a ciclos comerciales (1_10; 1 s ON + 10 s OFF), manteniendo en todos los casos un 10% de rendimiento. Un ciclo 8_80 se utiliza como límite bajo de frecuencia de alimentación, con el objetivo de mostrar su efecto sobre las emisiones, a pesar de que los sistemas alimentados manualmente tienen una frecuencia mucho menor. Se presentan dos análisis diferentes: uno para el estudio de las emisiones entre dos ciclos de alimentación iguales, llamados ensayos auto-coherentes (ACTs), y uno para la comparación de las emisiones entre diferentes ciclos de alimentación, llamados ensayos de coherencia cruzada (CCTs).

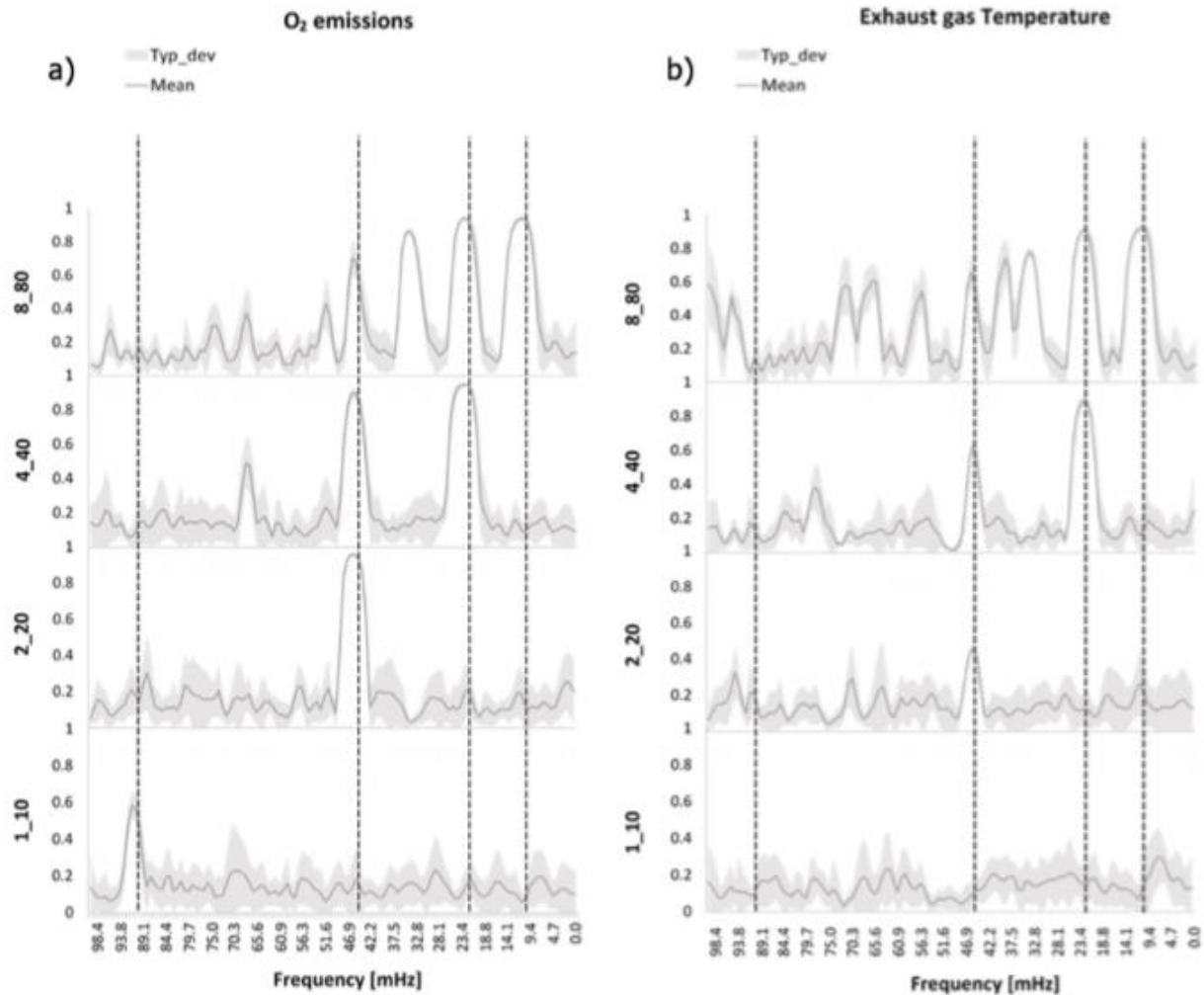
Name	t_{ON} [s]	t_{OFF} [s]	t_{ON+OFF} [s]	Feeding frequency [mHz]
8_80	8	80	88	11.4
4_40	4	40	44	22.7
2_20	2	20	22	45.5
1_10	1	10	11	90.9

Tabla 6 Características de los diferentes ciclos de alimentación.

Para lograr una correcta interpretación de los ensayos ACTs es necesario centrarse tanto en los valores obtenidos como en las bandas de frecuencia. Si los valores son relativamente altos para una frecuencia específica, implica que los diversos factores implicados están relacionados entre sí, lo que lleva a que este fenómeno suceda con una cierta periodicidad.

En lo relativo a la banda de frecuencia, se observa su relación con la frecuencia real de los ciclos de alimentación para los ciclos más rápidos (8_80, 4_40, 2_20) que son 90.9, 45.5 y 22.7 mHz, respectivamente. Esto implica que las emisiones están estrechamente relacionadas con los ciclos de alimentación. Concretamente, para mayor tiempo entre dos activaciones consecutivas del tornillo sin fin de la alimentación, la señal de alimentación toma un valor intermitente, que provoca notables fluctuaciones en el proceso de combustión y, por tanto, en las emisiones.

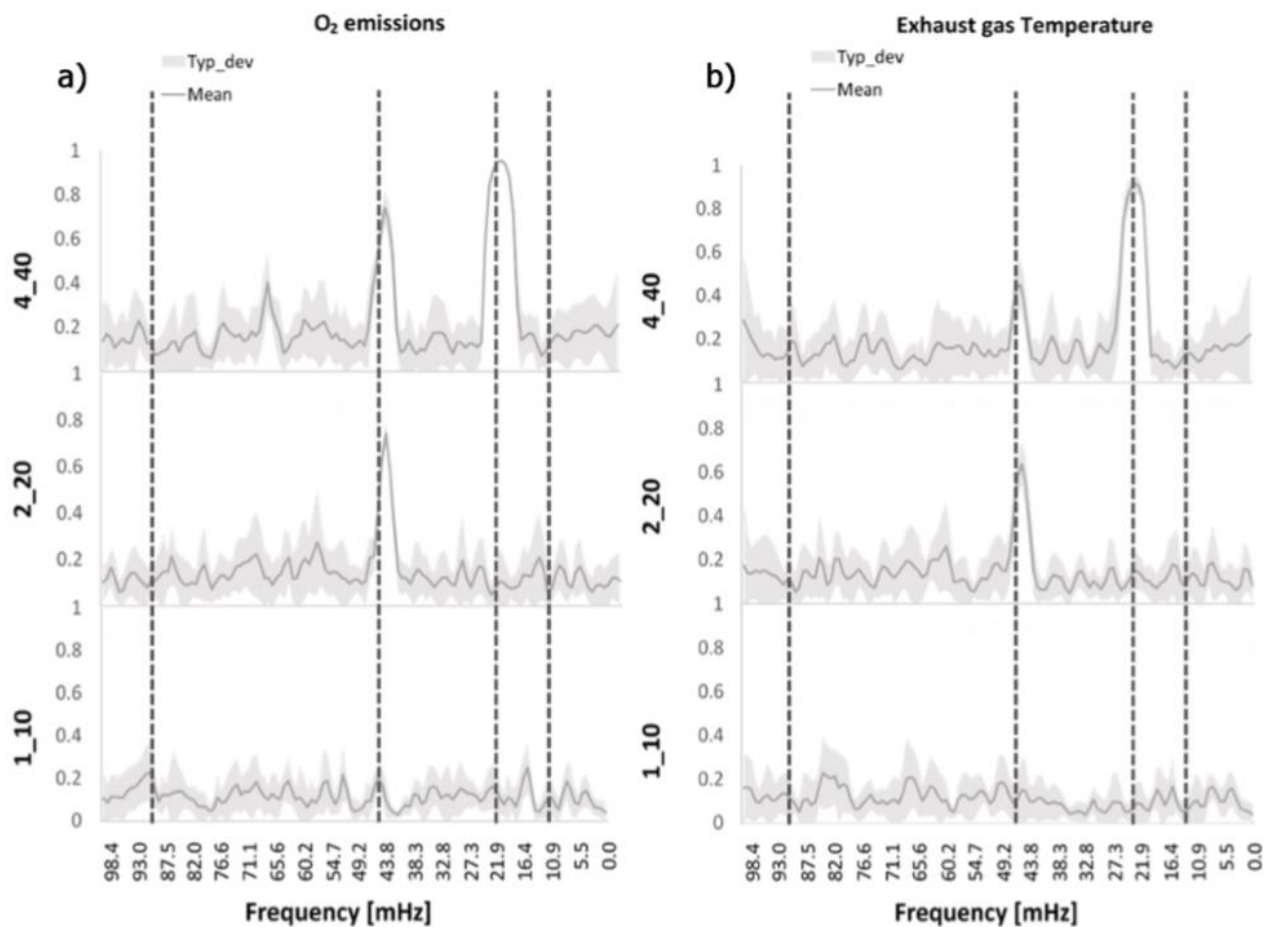
Por el contrario, para ciclos 1_10, donde el período entre dos entradas de combustible consecutivas es menor, el efecto anteriormente mencionado se ve disminuido. Trabajar con mayor frecuencia y menos cantidades de combustible reduce el comportamiento intermitente, ayudando a que el sistema se estabilice.



5-V Resultados resumidos para ACT.

Se observa una correlación entre las frecuencias coherentes y la frecuencia de alimentación para las emisiones de oxígeno y para la temperatura de los gases de exhaustación, mientras que los perfiles de CO y NO no parecen estar relacionados directamente con la entrada de combustible.

En lo relativo a los CCT, el propósito es establecer una comparación entre los diferentes ciclos de alimentación para descartar el efecto del mecanismo de alimentación y las frecuencias naturales sobre el sistema, intentando encontrar algún otro tipo de periodicidad representativa, con el objetivo de mejorar la descripción del sistema, para una simulación numérica más realista del quemador de biomasa. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente, presentando la misma estructura que la representación de los ACT.



5-VI Resultados resumidos para CCT.

En este estudio, los valores máximos de coherencia se dan a frecuencias que corresponden con las de los ciclos de alimentación. Esto se debe a que las frecuencias características de los ciclos de alimentación seleccionados presentan una banda armónica que no puede ser completamente eliminada. Como conclusión de este estudio se comprueba que la longitud de los períodos de alimentación y espera afectan significativamente en el funcionamiento de las instalaciones.

6 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y EQUIPOS DE MEDIDA

6.1 Descripción general de la instalación.

Se procede en este apartado a trazar unas líneas generales de los diversos componentes que conforman la instalación experimental en la que se han realizado los ensayos que confieren este trabajo, para la extracción de datos y su posterior análisis y discusión.

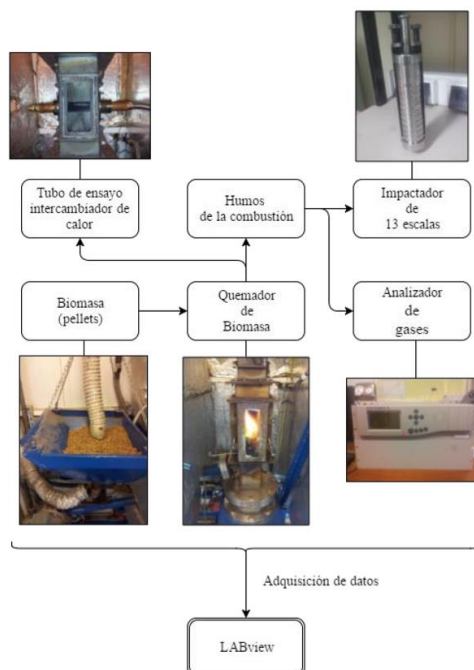
Se trata de un quemador experimental de biomasa acuotubular de lecho fijo. El combustible se encuentra en una tolva con forma cónica invertida. La tolva se sujeta con unas cadenas, en la parte superior se encuentra una célula de carga que aporta información sobre la cantidad de combustible presente en la tolva. El combustible alimenta la cámara de combustión desde la tolva a través de un tornillo sin fin que se acciona por un motor eléctrico desde el panel de control. La cámara de combustión tiene una entrada de aire primario a través de la parrilla, en la parte inferior. Por la parte superior de la cámara de combustión se encuentra la entrada de aire secundario cuya misión es conseguir una mayor eficiencia de la combustión. Tanto el aire primario como el secundario se suministran con unos ventiladores conectados a un sistema de regulación en lazo cerrado que permite variar la frecuencia de funcionamiento de los mismos. Los gases de la combustión, en su tránsito hacia el exterior pasan por un tubo intercambiador de calor. Se recogen muestras de la composición de gases que se trasladan a un analizador de gases y a un impactador de partículas, y posteriormente se representan los datos adquiridos en el programa informático LabView. Los gases salen al exterior a través de una chimenea, donde se coloca otro ventilador con el fin de bajar la temperatura de los gases antes de su expulsión al exterior.



6-I Instalación experimental.

La instalación dispone de algunos equipos de control para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de la misma. Tanto la admisión de primario como de secundario cuentan con un caudalímetro para conocer la cantidad de aire que se está introduciendo. El circuito de agua está dotado de un caudalímetro y de un manómetro. El manómetro no deberá marcar en ningún caso un valor superior a 3,5 bar y es un elemento crítico para garantizar la seguridad en la instalación.

Se pueden modificar algunos de los parámetros operacionales en función de lo que se desee analizar y de los resultados que se esperen obtener. El combustible es uno de los parámetros operacionales modificables. Se puede modificar el tipo de combustible empleado, tamaño y forma. El caudal de aire que entra tanto por primario como por secundario también son modificables, con el fin de variar las condiciones de la combustión. El secundario, además, puede ser variado en cuanto a dónde se ubica y en cuanto a la forma de admisión de aire, es decir, en su diseño. Por ubicación, se puede instalar la entrada de aire secundario a diferentes alturas, lo cual permite la variación de parámetros de eficiencia de reacción y estudiar cómo se comporta un determinado combustible sometido a distintas circunstancias. El diseño varía por la geometría en la admisión. Esta admisión se puede dar por sólo una de las caras del quemador o, de forma uniforme, por todas las caras.



Esquema 1 Esquema general del funcionamiento de la instalación. Fuente: [17].

En el Esquema 1 se resume el modo de toma de datos durante cada ensayo. Se aprecia que es a partir de los humos de combustión de la caldera cómo se hacen pasar por el impactador de partículas y por el analizador de gases. Los datos extraídos del analizador de gases se registran directamente a través del LabView, mientras que las partículas quedan retenidas en el impactador de partículas y se analizan por diferencia de peso de los filtros en comparación con el peso de estos antes del ensayo.

6.2 Equipos auxiliares.

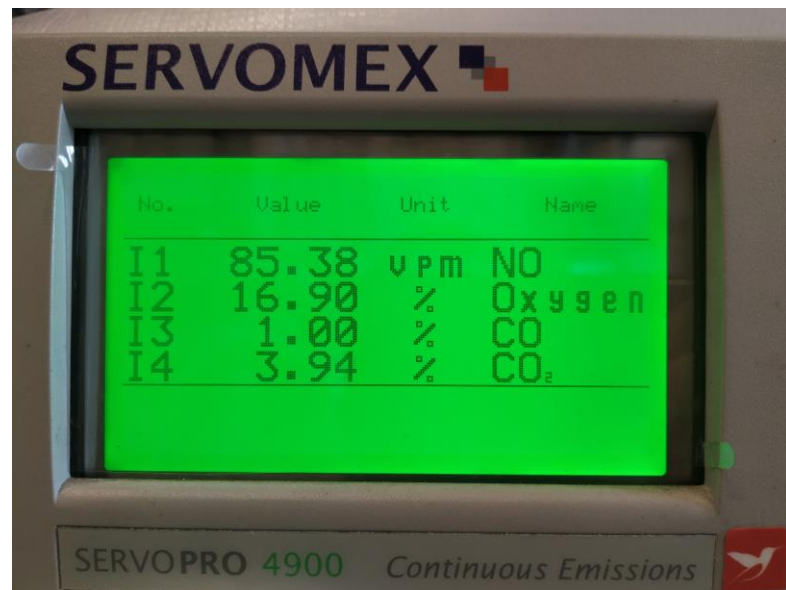
En este apartado se explica en detalle los equipos auxiliares para toma de muestras que se tratan en este trabajo: el analizador de gases y el impactador de partículas.

6.2.1 Analizador de gases.

Se analiza la composición de los gases emitidos en el proceso de combustión a través de un equipo de la marca SERVOMEX modelo 4900.

Los gases se extraen del flujo la chimenea. Se hacen pasar por un filtro que retiene las partículas que puedan estar presentes en la mezcla gaseosa y se trasladan por medio de un tubo calefactado que mantiene la muestra a 120°C de temperatura; se preparan para su análisis haciéndolos pasar a través de un módulo de acondicionamiento. Posteriormente, se enfría la muestra hasta el punto de rocío para eliminar la humedad que pueda contener.

Finalizado el proceso de acondicionamiento, se hace pasar la muestra al analizador de gases que obtiene los porcentajes de su composición de la manera que se muestra en la siguiente imagen.



6-II Presentación de composición de gases por el analizador.

El analizador de gases mide la concentración de gases NO, oxígeno, CO y CO₂, como se puede apreciar en la imagen 6-II. El analizador se encuentra directamente conectado a un ordenador con el software de registro de datos LabView para el posterior tratamiento de los propios datos.

6.2.2 Impactador de partículas.

Se dispone de un impactador Dekati de 13 escalas para la medición de las partículas de los gases que se generan durante la combustión.



6-III Impactador de partículas Dekati. [19]

El impactador se prepara con unos filtros sometidos a tratamiento térmico durante 60 minutos a una temperatura de 105°C en una mufla para eliminar cualquier partícula o humedad que pueda contener previamente. Tras el tratamiento térmico se depositan los filtros en un deshumidificador previamente a ser utilizados durante al menos 24 horas.

Una vez los filtros están listos para su utilización se colocan en el impactador tras haber sido pesados, pues la medición de partículas se realiza por diferencia de peso. El montaje del impactador con los filtros se realiza con el máximo cuidado para evitar su contaminación.

Una vez montado el impactador, se introduce en una caja calefactada a 120°C, protegida en el interior por una manta térmica. Los gases se extraen de la chimenea del quemador, a través de un tubo

calefactado también a 120°C para evitar la condensación de los gases. Se garantiza que el flujo de gases sea constante mediante la incorporación al sistema de una bomba que absorbe los gases del quemador y un manómetro que permite controlar la presión en la salida del impactador.

El impactador se coloca durante dos períodos de 20 minutos durante el ensayo, siendo estos períodos siempre posteriores al tiempo de transición inicial.

Finalizada la exposición del impactador al flujo de gases se realiza el proceso inverso al del montaje del impactador. Al desmontar los filtros se somete al tratamiento térmico en la mufla y, tras este proceso, se deja reposar durante 24 horas en el desecador. Transcurrido este tiempo, se pesan los filtros y se dejan registradas las medidas en una tabla donde también se registraron las masas iniciales de dichos filtros. Se extraen las medidas finales por diferencia de masa inicial y final de los filtros.



Esquema 2 Proceso de preparación y análisis de los filtros del impactador.

7 METODOLOGÍA DE ENSAYO

Se realiza en este apartado una descripción de cómo se lleva a cabo un ensayo completo, desde antes de arrancar la instalación hasta el tratamiento de los datos obtenidos durante el ensayo.

7.1 Acciones requeridas antes del encendido de la instalación.

La primera acción a llevar a cabo para preparar el ensayo es el encendido del analizador de gases, junto con el tubo calefactado por el que van a circular los gases antes de entrar en el analizador. La temperatura que ha de adoptar el tubo es de 120°C. El analizador de gases necesita un tiempo estimado de 30 minutos para funcionar de forma óptima por lo que, mientras, se pueden ir realizando otras actividades necesarias para el ensayo.

Una de estas acciones es la limpieza de la cámara de combustión. Se debe garantizar que la cámara de combustión está limpia de ceniza que proceda de otros ensayos anteriores, pues impediría tomar datos precisos del ensayo que se va a realizar. La limpieza de la cámara de combustión se realiza mediante la aspiración de los restos procedentes de ensayos hechos con anterioridad. También en el cenicero, situado debajo de la cámara de combustión es importante asegurar que no hay restos de ceniza antes de iniciar la actividad en la instalación.

Se puede dejar preparado durante este tiempo el impactador de partículas que se va a utilizar en el ensayo, de la forma detallada en el apartado 6.3.

Se alimenta la tolva con el combustible requerido para el ensayo. Accionando el tornillo sin fin llena de combustible la cámara de combustión. Este pellet se utilizará para iniciar el proceso. Esta alimentación inicial se realiza modificando en el panel de control de la función “PARO” a “ALIMENTACIÓN” y desactivando el temporizador de la alimentación.

Para la adquisición y procesamiento de datos, se enciende el ordenador con el programa LabView, el cual se utilizará para el análisis de los parámetros del ensayo.

7.2 Encendido y funcionamiento de la instalación.

Teniendo el combustible necesario para iniciar la reacción ya alojado en la cámara de combustión, se procede a la apertura del primario y la ignición se realiza mediante un decapador, que inyecta aire caliente a 660 °C. La razón para la apertura del primario es favorecer que el combustible continúe reaccionando cuando se retire el aire caliente. El aire caliente se aplica de forma homogénea por todas las zonas de la cámara de combustión para que afecte a todo el combustible.



7-I Proceso de encendido de la cámara de combustión.

Los primeros 45 minutos de combustión constituyen la fase transitoria del ensayo. Se trata de una fase donde el comportamiento de la combustión es irregular y, por lo tanto, no es un periodo fiable para la toma de datos, debido a la constante variación de los valores de los diferentes parámetros analizados. Es importante durante esta etapa controlar los valores de la presión del circuito para garantizar que no se encuentra en estado vapor, lo cuál sería muy peligroso para el operador y para la propia instalación.

Es necesario durante el período en el que la instalación no trabaja de forma estable controlar la cantidad de combustible presente en la cámara de combustión. Es importante pues un defecto de combustible acabaría provocando que se apague la instalación y, un exceso, que la combustión se descontrola, lo cuál es muy peligroso para la seguridad tanto del personal como del material.

Es durante esta etapa en la que se coloca el impactador de partículas para la recogida de muestras. Para ello, se emplaza el tubo calefactado y, teniendo el impactador de partículas en la caja, con la manta térmica y el tubo a la temperatura adecuada, se acciona la bomba de aspiración y se establece la presión a la que ha de trabajar para garantizar que el flujo de aire en la absorción es constante. Esta presión es de 0.1 bar.

7.3 Recogida y presentación de datos.

En lo correspondiente a este apartado se tratarán los gases y las partículas emitidas en la combustión como muestras, aunque las cenizas y el slagging también son susceptibles de ser analizados pues aportan información muy útil sobre el combustible experimental.

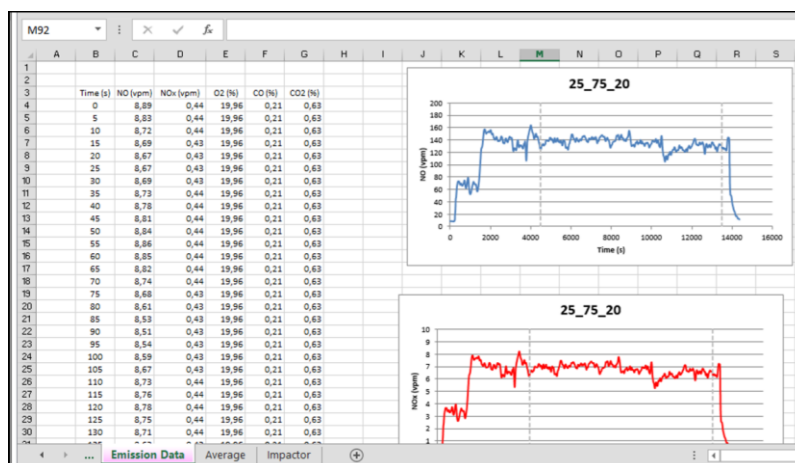
Las partículas quedan recogidas en los distintos filtros colocados en las diferentes escalas del impactador de partículas. Estos filtros, tras ser tratados térmicamente y almacenados en un deshumidificador durante un período de 24 horas, se pesan y se registra su masa en una hoja Dekati en la que se compara con la masa del filtro antes del ensayo.

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS EMISIONES DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS EN UN QUEMADOR DE BIOMASA

DATA SHEET	
Test	50-50-6cm
Data	30/09/2015
Duration[h]	2h 5 min
Pellet	
Impactador 3 / 13	
Hour	16:25
Duration[min]	25 min
Temperature[°C]	23.7
%Humidity	55
Pressure [kPa]	970
Flow [l/min]	
Before	After
0'04265	0'04273
0'04264	0'04332
0'04266	0'04344
0'04264	0'04292
0'04265	0'04288
0'04260	0'04278
0'04263	0'04276
0'04264	0'04266
0'04265	0'04265
0'04260	0'04266
0'04265	0'04275
0'04264	0'04273
0'04270	0'04274

7-II Ejemplo hoja registro de partículas.

Los datos que corresponden a los gases se recogen en el analizador de gases. Los datos a estas muestras se representan directamente en el software de tratamiento de datos LabView, desde donde se extraen a un fichero Excel para su procesamiento.



7-III Ejemplo de presentación de comportamiento de los gases.

8 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para la realización de este trabajo se han llevado a cabo ensayos con diferentes configuraciones y para los combustibles de vid y madera por separado. La finalidad de este trabajo fin de grado va a ser analizar la viabilidad comercial de pellet de vid, estudiando los valores de emisiones gaseosas y de partículas y realizando una comparativa con un pellet de madera comercial.

La **Tabla 7** muestra las diferentes configuraciones empleadas en los ensayos realizados con los mencionados combustibles.

TEST	COMBUSTIBLE	% PRIMARIO	% SECUNDARIO	CAUDAL TOTAL (l/min)
1	VID	20	80	160
2	VID	20	80	200
3	VID	20	80	240
4	VID	30	70	160
5	VID	30	70	200
6	VID	30	70	240
7	VID	40	60	160
8	VID	40	60	200
9	VID	40	60	240
10	MADERA	20	80	160
11	MADERA	20	80	200
12	MADERA	20	80	240
13	MADERA	25	75	160
14	MADERA	25	75	200
15	MADERA	25	75	240
16	MADERA	30	70	160
17	MADERA	30	70	200
18	MADERA	30	70	240

Tabla 7 Resumen de los ensayos realizados.

En los ensayos realizados se proporcionan tres valores de caudal total distintos: 160, 200 y 240 l/min concretamente.

Este reparto de caudal total de aire suministrado se divide entre una entrada de primario y una entrada de secundario. La nomenclatura de este reparto de aire es la siguiente: %primario_%secundario.

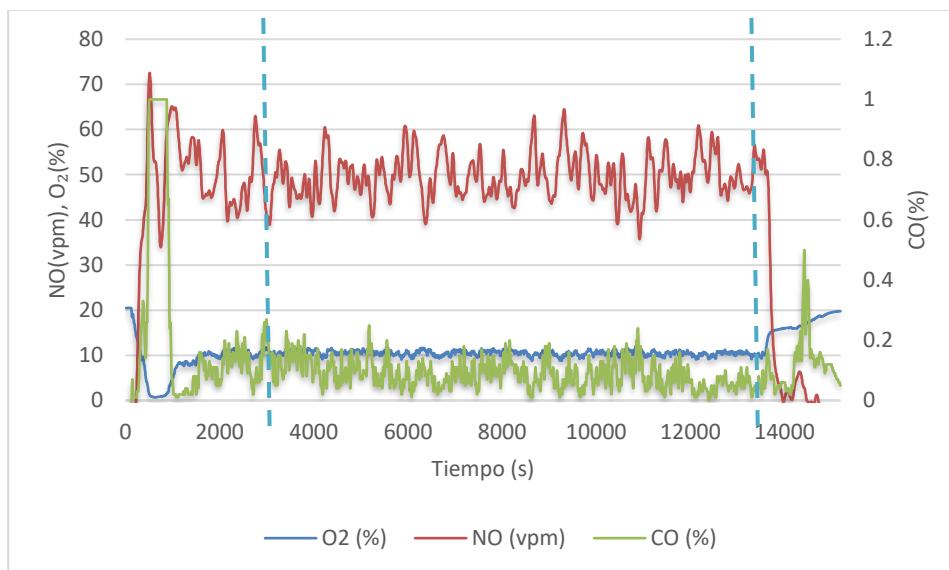
Para los ensayos utilizando la vid como combustible se utilizan los repartos 20_80, 30_70 y 40_60, mientras que para aquellos realizados con madera los repartos utilizados son 20_80, 25_75 y 30_70.

8.1 Estabilidad de la instalación.

La planta experimenta diferentes comportamientos en función del punto de trabajo en la que se encuentre. Una vez se arranca la instalación se estima un período de transición de 45 minutos, durante el cual los datos extraídos no se consideran óptimos para estudio.

Tanscurrido el tiempo de transición, la planta entra en un intervalo estable que dura lo que el usuario considere oportuno para su ensayo y la acumulación de ceniza y slagging característica de cada combustible haga posible. Para los ensayos realizados durante este trabajo, se consideró un tiempo de

estabilidad de 180 minutos, transcurridos los cuales, se procede al apagado de la instalación durante los siguientes 15 minutos.



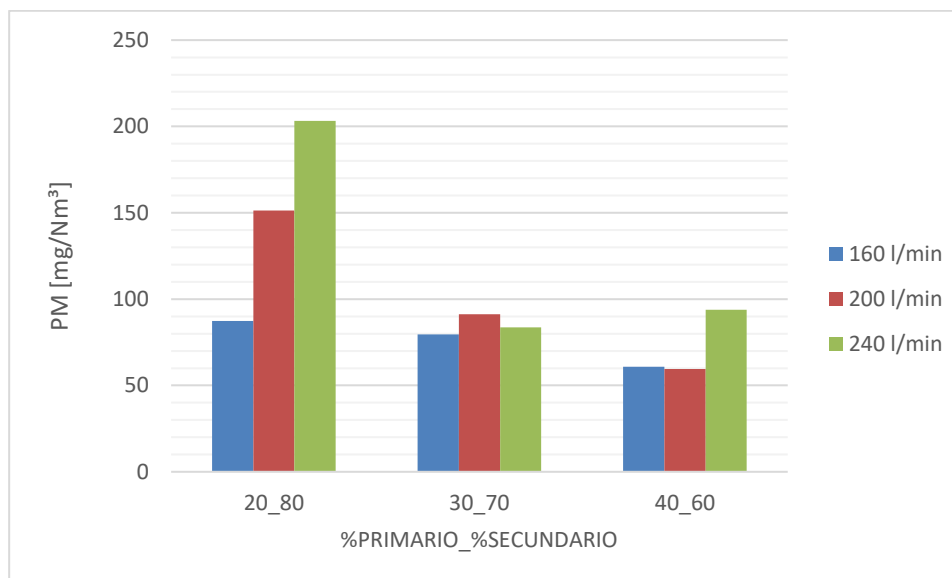
8-I Estabilidad de la instalación en función de las emisiones gaseosas. Pellet de vid

En la gráfica 8-I se pueden apreciar las distintas fases relativas a la estabilidad de la planta que transcurren durante un ensayo, basada en las emisiones de NO, O₂ y CO. La gráfica está representada para un 30% de primario, 70% de secundario y un flujo total de aire de 160 l/min, con pellet de vid. El comportamiento de la instalación en cuanto a su estabilidad es siempre el mismo. Requiere de aproximadamente 45 minutos para lograr la estabilidad y los últimos 15 minutos previos al apagado vuelve a desestabilizarse el ensayo.

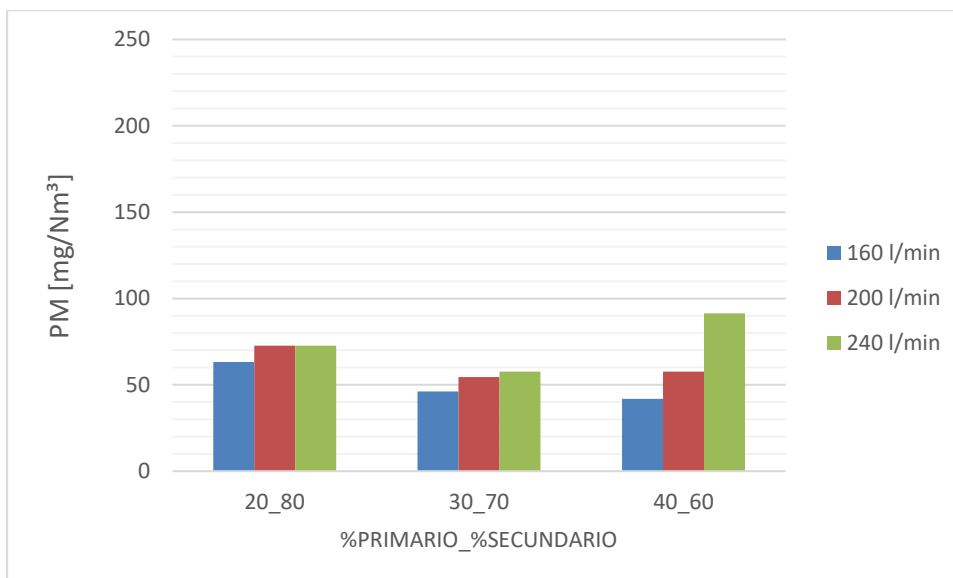
8.2 Emisión de partículas.

Se presenta en las gráficas 8-II y 8-III, la concentración de partículas medida para los diferentes ensayos realizados. Los datos que se muestran, fueron obtenidos por la instalación de dos impactadores de partículas diferentes durante cada ensayo.

8.2.1 Concentración de partículas. Vid como combustible.



8-II Concentración de partículas para la vid. Primer impactador.



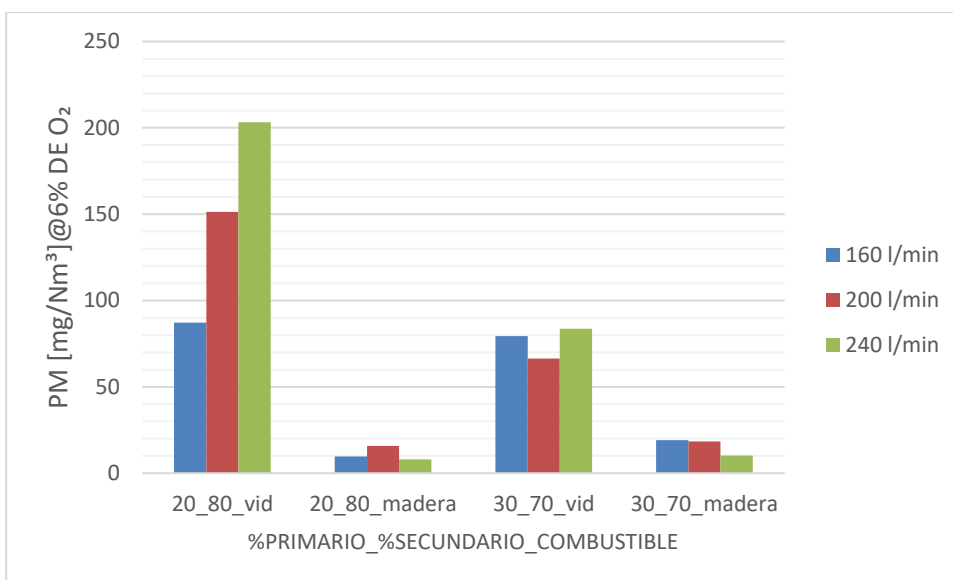
8-III Concentración de partículas para la vid. Segundo impactador.

Las emisiones de partículas sólidas se encuentran entre 45 y 200 mg/Nm³.

Se puede observar en las gráficas anteriores una tendencia creciente en la emisión de partículas a medida que se aumenta el caudal total de aire suministrado durante el ensayo.

El reparto del flujo de aire entre el primario y el secundario presenta una mayor concentración de partículas cuanto menor es la proporción de aire que se suministra a través de la entrada de primario. Esto se debe a que la combustión producida con este reparto es de peor calidad. En cuanto a los repartos 30_70 y 40_60, no se aprecia de los resultados obtenidos diferencias significativas, debido a que ambas configuraciones dan como resultado una combustión de características similares.

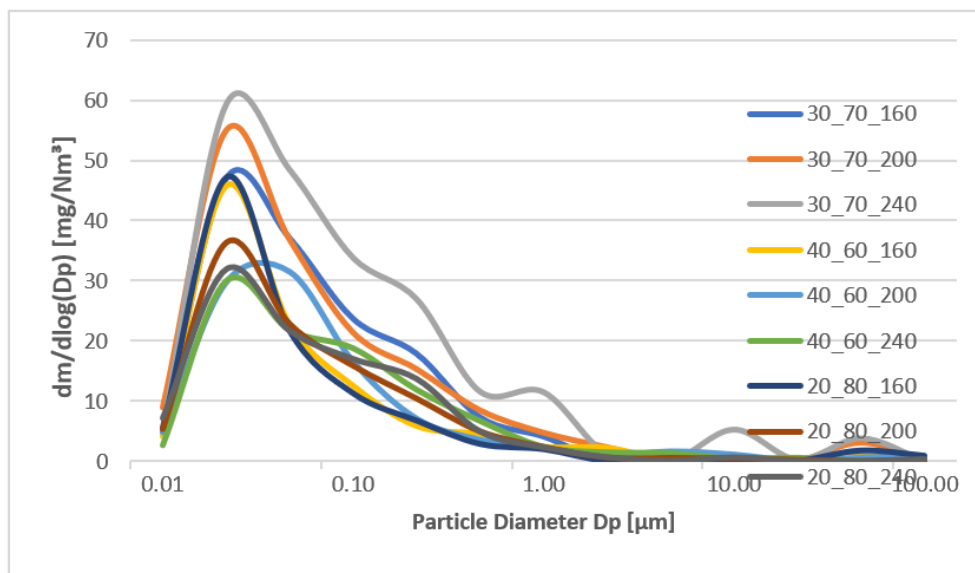
8.2.2 Comparación entre la emisión de partículas con pellet de vid y con pellet de madera.



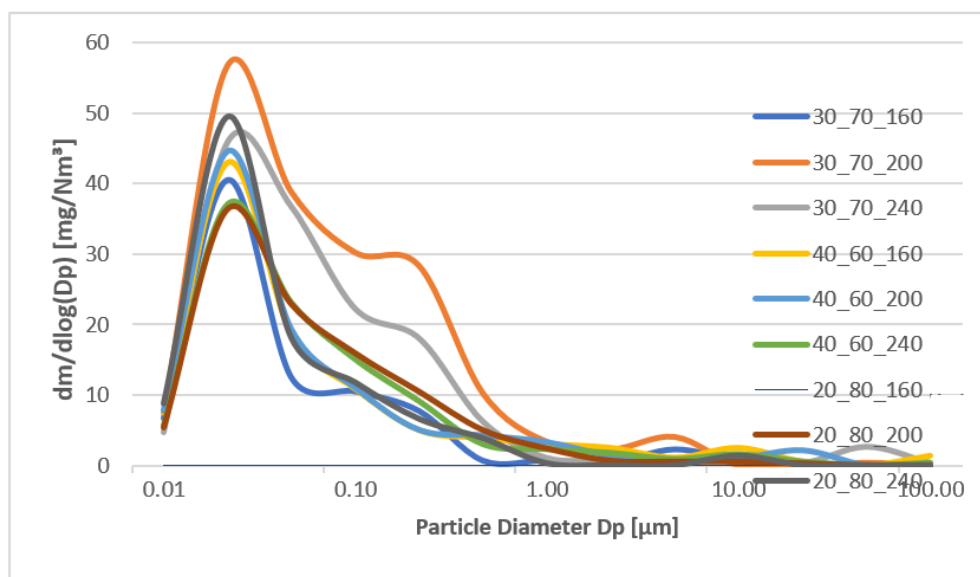
8-IV Comparación emisión de partículas entre pellet de vid y pellet de madera.

Se aprecia en la gráfica 8-IV que las emisiones con pellet de vid son mucho mayores alcanzando con el pellet de vid valores de 200 mg/Nm^3 mientras que las emisiones de madera no superan en ninguno de los ensayos realizados los 20 mg/Nm^3 .

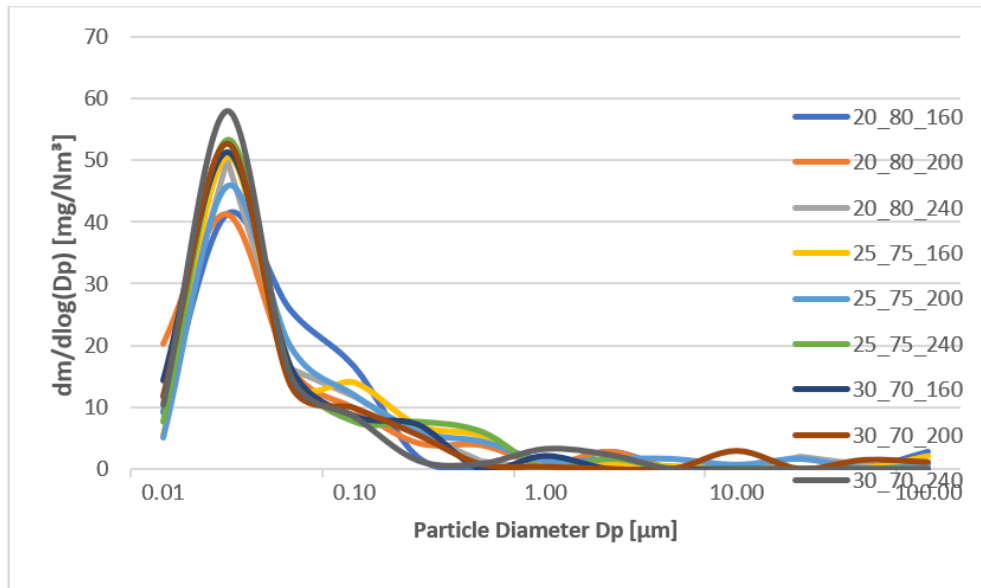
8.2.3 Distribución de partículas.



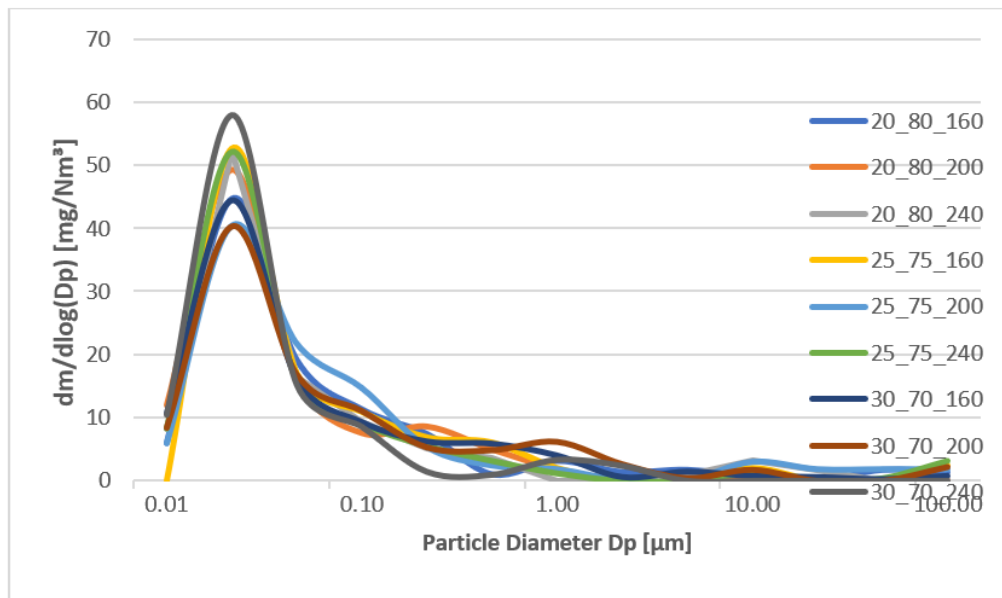
8-V Distribución de partículas para la vid. Primer impactador.



8-VI Distribución de partículas para la vid. Segundo impactador.



8-VII 8 VI Distribución de partículas para la madera. Primer impactador.



8-VIII Distribución de partículas para la madera. Segundo impactador.

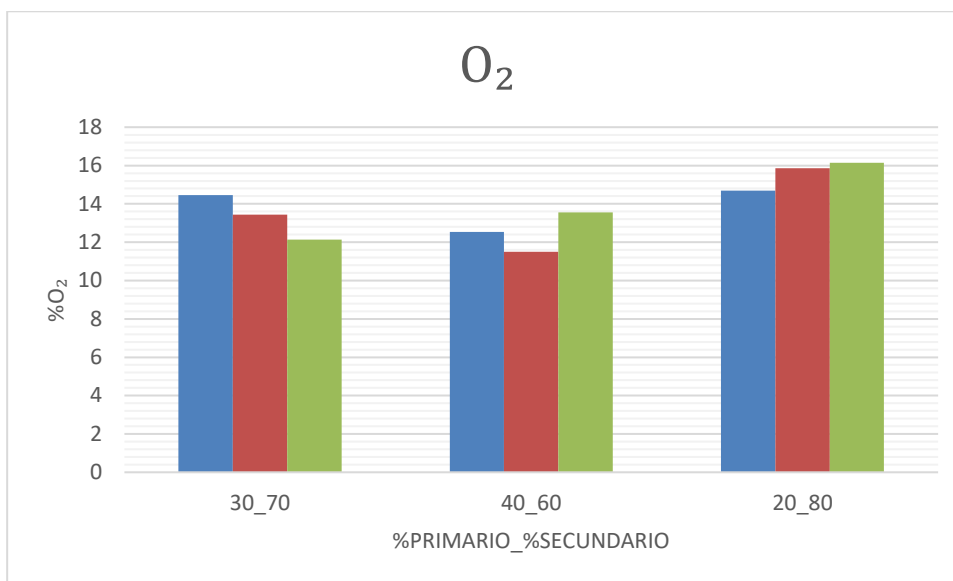
Las gráficas anteriores que representan la distribución de partículas para los distintos ensayos realizados muestran una distribución unimodal. La mayor parte de las partículas emitidas en los ensayos para ambos combustibles en sus distintas configuraciones son de diámetro inferior a 1 μm . Estas partículas están generalmente formadas por los elementos que se vaporizan durante la combustión, más tarde se saturan y mediante el mecanismo de nucleación forman partículas finas. Después estas partículas pueden seguir creciendo mediante reacción superficial, condensación, coagulación y aglomeración. [18]

8.3 Emisión de gases.

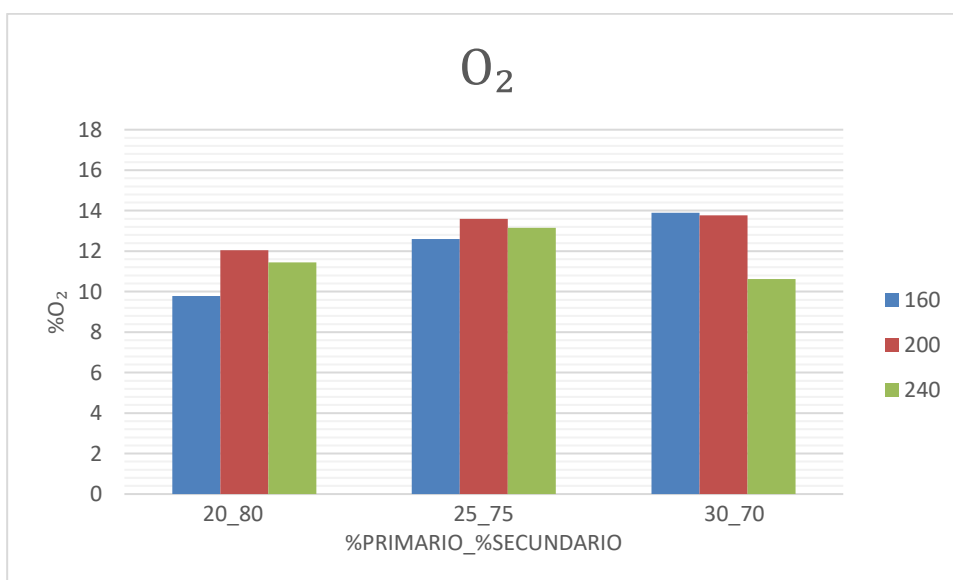
En este apartado las medidas de caudal están medidas en litros por minuto.

8.3.1 Emisiones de O_2 .

Se presentan en este apartado dos gráficas que resumen los valores de las emisiones de O_2 emitidos en los ensayos para los combustibles en estudio.



8-IX Emisiones O₂ para la vid.



8-X Emisiones O₂ para la madera.

De las gráficas anteriormente mostradas se puede extraer que las emisiones de O₂, teniendo en cuenta los ensayos realizados con ambos combustibles, no varían significativamente, presentando los valores extremos entre 9% y 16%. Los ensayos realizados con pellet de vid presentan valores más elevados de este gas. Esto se debe a una combustión de peor calidad, quedando más O₂ sin reaccionar.

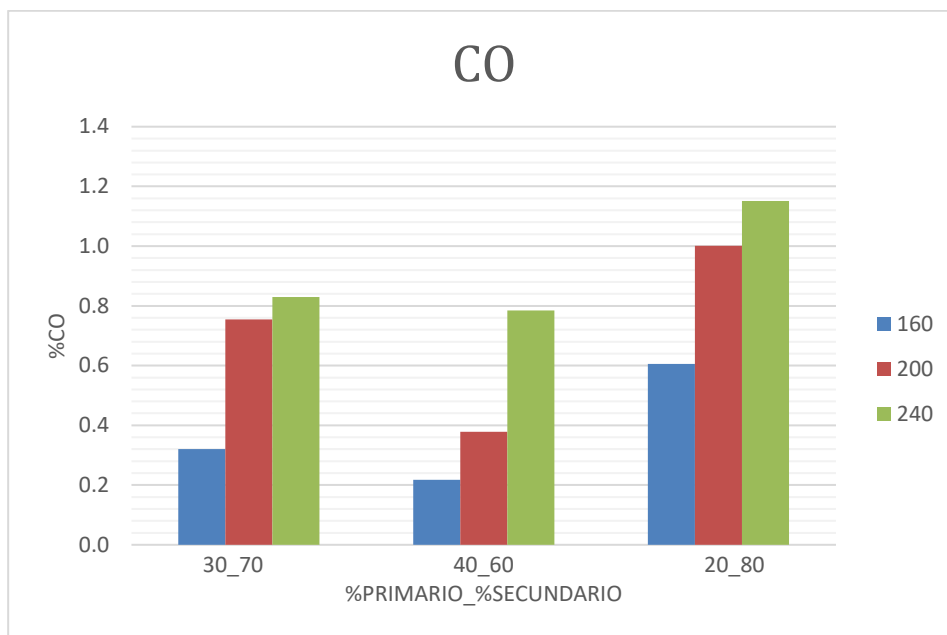
No se puede deducir ninguna relación en cuanto al caudal total de aire se refiere para los ensayos, resultando más determinante la distribución de este flujo ente primario y secundario.

Las gráficas que se presentan, muestran cómo un mayor porcentaje de aire en el secundario respecto del primario ofrece una mayor emisión de O₂. Estas emisiones son debidas a que, el flujo que se suministra por el secundario, que tiene la función de lograr una mayor eficiencia en la combustión, no es útil en su totalidad pues no llega a reaccionar y se escapa por la chimenea.

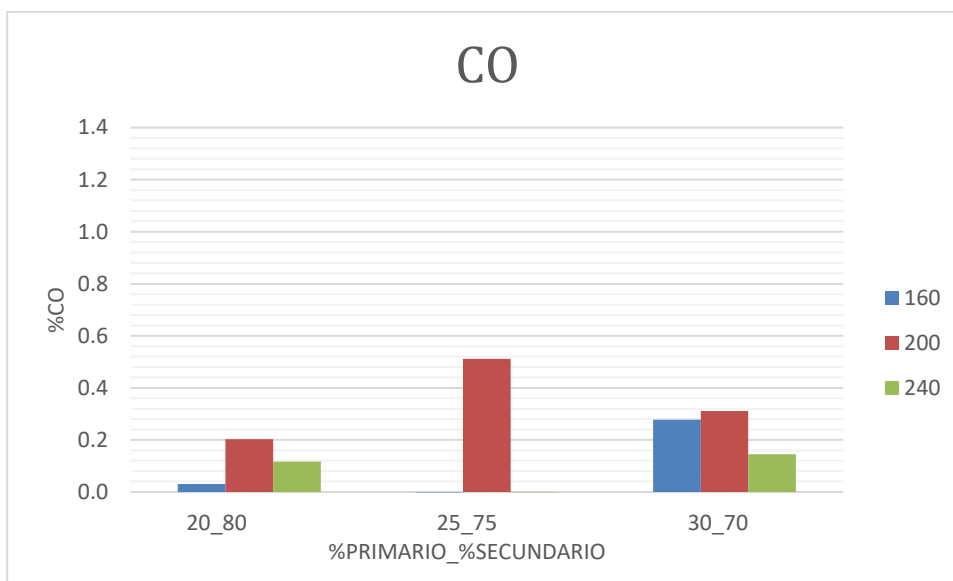
8.3.2 Emisiones de CO.

Las emisiones de CO son directamente proporcionales a una combustión incompleta en el quemador. Las causas de esta deficiencia en la combustión se deben a un defecto de la instalación, así como en la

configuración de los parámetros modificables. Se presentan a continuación dos gráficas que resumen las emisiones de este gas.



8-XI Emsiones de CO para la vid.



8-XII Emisiones de CO para la madera.

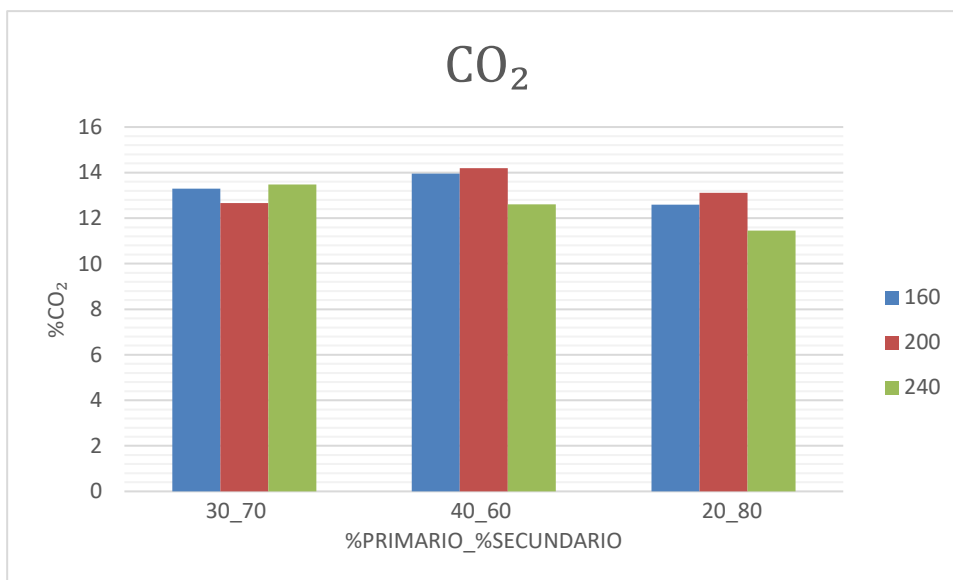
De los resultados obtenidos con el pellet de madera se puede comprobar que los resultados obtenidos están muy por debajo de los obtenidos para el pellet de vid. El valor máximo en las emisiones de los ensayos con madera se sitúa en un 0.55% mientras que su equivalente para pellet de vid muestra un 1.19%.

De los datos obtenidos con pellet de vid concluimos que, a mayor flujo total de aire, peor es la combustión y, por lo tanto, más elevadas son las cantidades de CO emitidas. Al contrario de lo que pueda parecer, más cantidad de aire suministrado no equivale a una mayor eficiencia en la combustión. Puede provocar un descenso de la temperatura en la cámara de combustión que tiene como resultado una combustión menos eficiente.

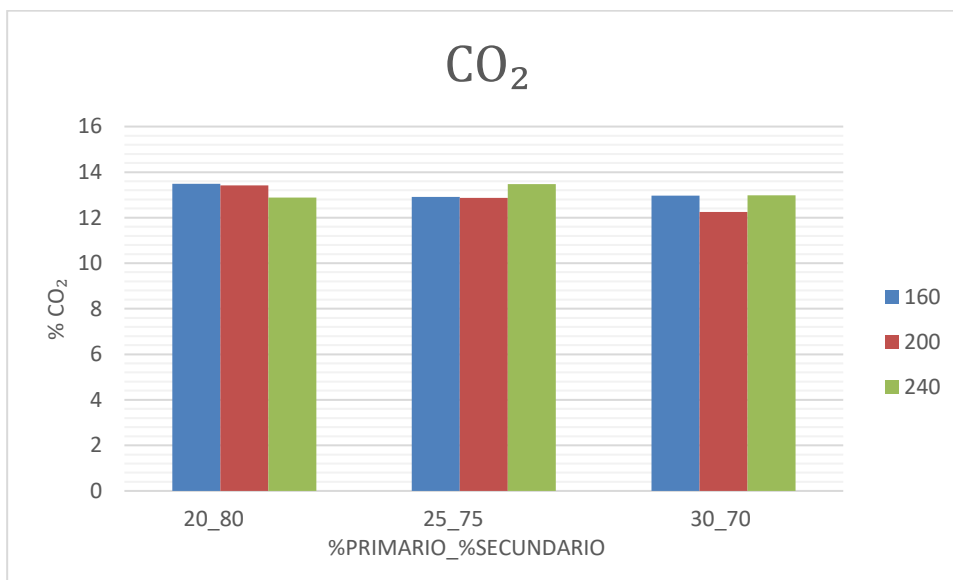
El reparto del flujo total también resulta determinante en este aspecto. Mayor cantidad de aire introducido a través de secundario provoca un mayor descenso de las temperaturas y una mayor emisión de CO, tomando como referencia los ensayos realizados.

8.3.3 Emisiones de CO₂.

La combustión de hidrocarburos provoca la emisión de dióxido de carbono en una proporción mayor al resto de gases.



8-XIII Emisiones de CO₂ para la vid.

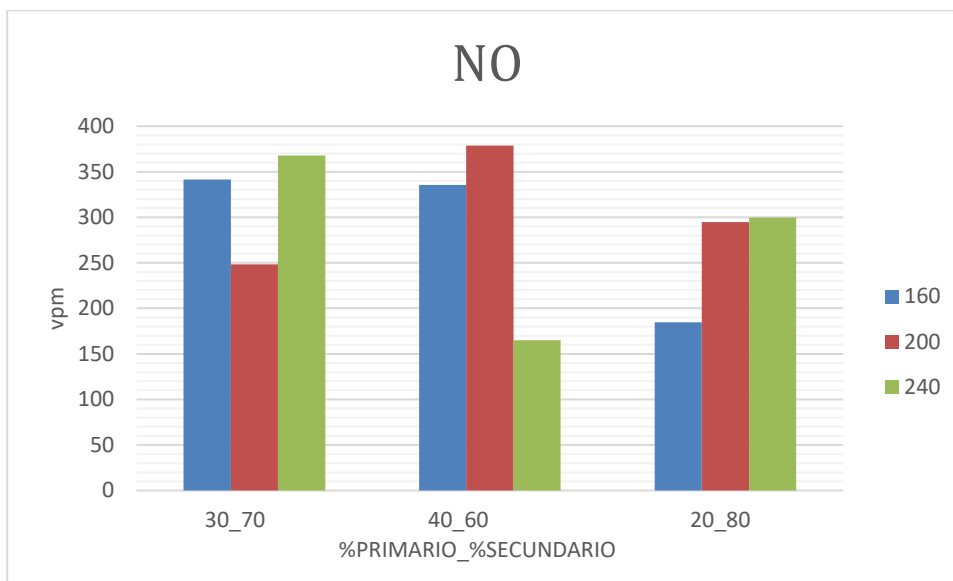


8-XIV Emisiones de CO₂ para la madera.

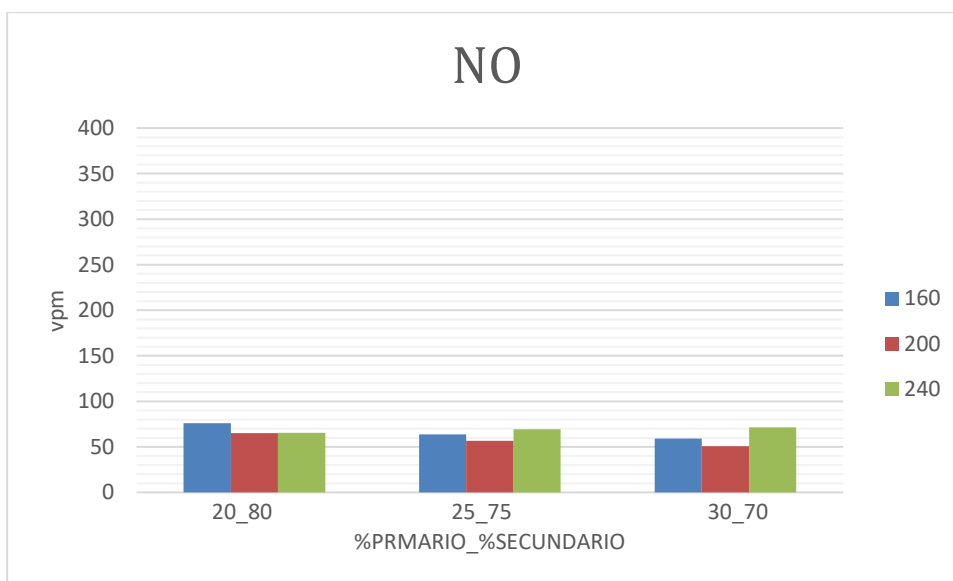
El análisis de las emisiones de dióxido de carbono no muestra resultados concluyentes. No se aprecian diferencias significativas en su emisión ni para variación de flujo de aire total ni para la variación de su configuración entre primario y secundario. Tampoco para los distintos combustibles. Se mantiene un valor constante para todos los ensayos en torno al 13%.

8.3.4 Emisiones de NO.

Se tiene en cuenta para este trabajo el estudio de las emisiones de NO, descartando el resto de composiciones NO_x ya que, las formaciones de NO son mucho más frecuentes y se considera un dato más representativo.



8-XV Emisiones de NO para la vid.



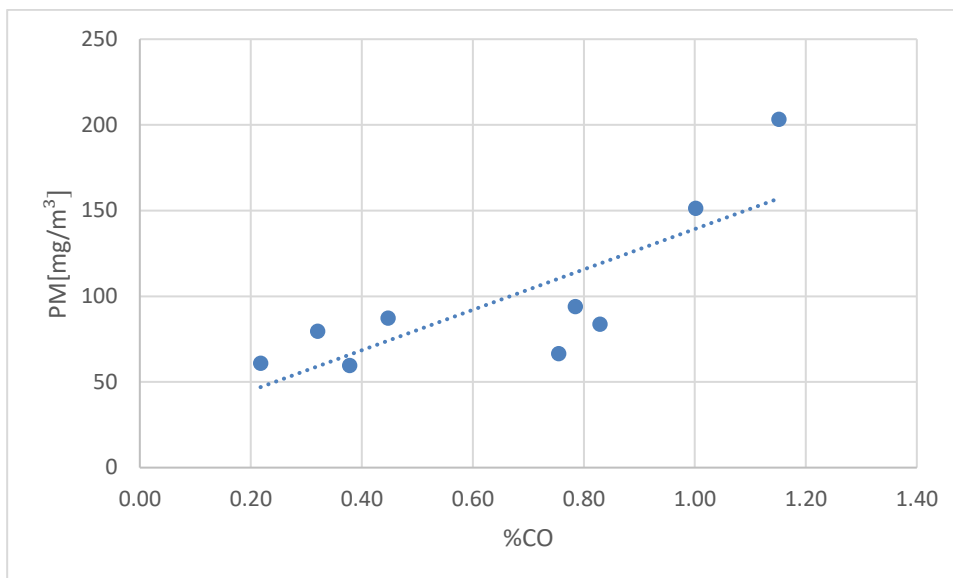
8-XVI Emisiones de NO para la madera.

La formación de NO se ve favorecida por las altas temperaturas durante la combustión. Se aprecia en los resultados obtenidos que las emisiones de NO con pellet de vid son mucho más elevadas que para el pellet de madera. Se debe a que las temperaturas que alcanza este combustible durante el ensayo son de valor más alto lo que da lugar a que N₂ y O₂ y reaccionen más fácilmente. El ensayo con pellet de vid alcanza valores de temperatura de 750°C mientras que con el pellet de madera sólo se alcanza el valor de 600°C.

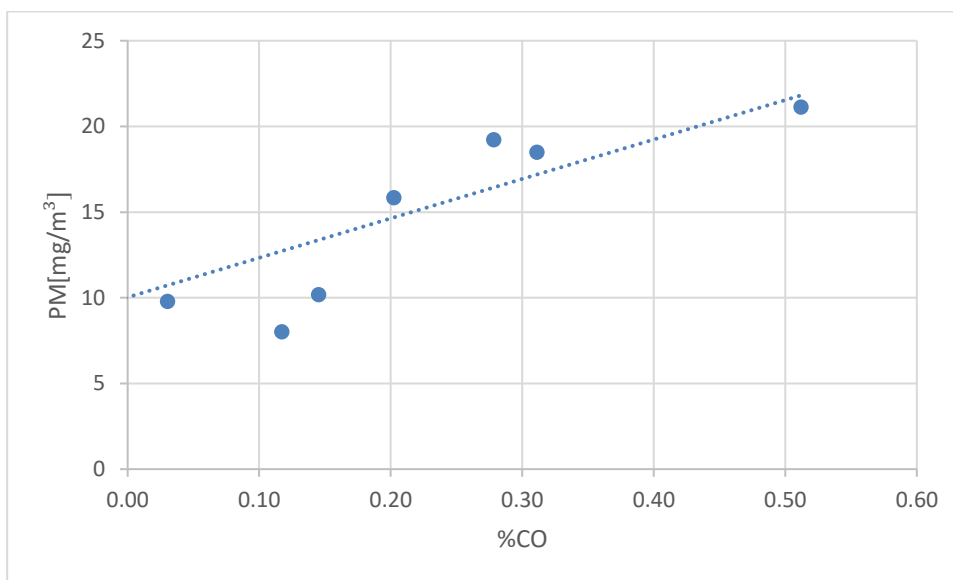
Por otro lado, no se aprecia para los ensayos realizados relación alguna entre el flujo total de aire introducido o el diseño del reparto entre primario y secundario con la emisión del gas en estudio. Por tanto, no se puede sacar ninguna conclusión relevante al respecto.

8.4 Correlación entre la emisión de gases y la emisión de partículas.

Se presenta en este apartado la correlación existente entre el porcentaje de CO emitido y la concentración de partículas para los diferentes ensayos realizados.



8-XVII Porcentaje de CO frente a concentración de partículas para pellet de vid.



8-XVIII Porcentaje de CO frente a concentración de partículas para pellet de madera.

Se observa de las gráficas anteriores que existe una relación directamente proporcional entre las emisiones de CO y la concentración de partículas, para los ensayos realizados con ambos tipos de combustible. Como ya se sabe, cuando la combustión tiene lugar en condiciones pobres, las partículas sólidas están fundamentalmente formadas por productos inquemados (hollín). En consecuencia, la influencia del CO en las emisiones de PM es más importante que cualquier otro parámetro previamente analizado en este trabajo. Esto podría explicar las dificultades encontradas para extraer conclusiones sobre el comportamiento en relación con el caudal de aire total o con el reparto de caudales, ya que esos parámetros parecen ser menos relevantes. [18]

9 CONCLUSIONES

En los ensayos realizados se demuestra que la instalación se comporta de forma estable durante el transcurso de los mismos. Tras el análisis y estudio de los datos obtenidos a partir de los ensayos requeridos para la realización de este trabajo de fin de grado, se concluye:

- Para un mayor flujo total de aire suministrado durante los ensayos, la concentración de partículas que se emite es más elevada. Durante los ensayos realizados, la emisión de partículas para un flujo total de 240 l/min supera los 200 mg/Nm³, mientras que con un flujo de 160 l/min en ningún caso se superan los 100 mg/Nm³.
- El pellet de madera emite menos partículas por cada ensayo, debido a que presenta mejores características de combustión. El valor medio de la emisión de partículas con pellet de vid se sitúa en 130 mg/Nm³, mientras que con pellet de madera este valor medio es de 20 mg/Nm³.
- La cantidad de aire total introducida por primario y secundario para el proceso tiene influencia directa sobre la emisión de CO. Una mayor cantidad provoca un aumento en la emisión de CO.
- El aumento del flujo de aire proporcionado por el secundario, aumenta las emisiones de CO. Este aumento es consecuencia de un descenso de temperaturas durante la combustión por la influencia del aire introducido, lo que provoca que dicha combustión sea menos eficiente.
- Las emisiones de CO y NO se reducen con la utilización de pellet de madera frente al pellet de vid, debido a que la madera posee mejores características para la combustión. La emisión de NO se justifica por la composición química de ambos combustibles. La madera posee un 0.084 % de N frente a un 0.78% que presenta la vid.
- Existe una relación directa entre la emisión de CO y la emisión de partículas. El valor de las emisiones de CO aporta información acerca de la eficiencia de la combustión. Un aumento de CO indica una combustión más pobre y provoca la presencia de mayor cantidad de inquemados.

10 LÍNEAS FUTURAS

Durante este trabajo de fin de grado surgen nuevos frentes de estudio de cara al futuro. Son los siguientes:

- Repetir los ensayos relativos al pellet de vid, introduciendo en la composición del combustible aditivos caolín o CaCO_3 y estudiar el comportamiento de este combustible en esas circunstancias, la emisión de gases y de partículas que se genera y establecer una comparación con los resultados obtenidos en este trabajo de fin de grado.
- Modificar para los ensayos realizados la posición de la entrada de secundario, modificando su posición y la forma de admisión de aire y analizar así la repercusión que tienen estas variaciones en las emisiones de gases y partículas.
- Repetir los ensayos para distintos tipos de pellet y estudiar su comportamiento durante la combustión.
- Realizar un estudio de las temperaturas en la instalación, distribución de la temperatura a lo largo de la misma y analizar una posible correlación entre las emisiones de gases y partículas y las temperaturas durante los ensayos.

11 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «ENERDATA. ANUARIO ESTADÍSTICO MUNDIAL DE ENERGÍA.,» 2018. [En línea]. Available: <https://datos.enerdata.net/gas-natural/consumo-mundial.html>. [Último acceso: 13 Enero 2020].
- [2] «EUROSTAT. STATISTICS EXPLAINED.,» 2017. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Renewable_energy_highlight_FP2019-ES.png. [Último acceso: 11 Enero 2020].
- [3] M. p. l. t. ecológica, «Plan de acción nacional de energías renovables de España,» 2011-2020.
- [4] «Ministerio para la transición ecológica.,» [En línea]. Available: <https://energia.gob.es/balances/Balances/LibrosEnergia/Libro-Energia-2017.pdf>.
- [5] «INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA.,» [En línea].
- [6] «Xunta de Galicia,» [En línea]. Available: http://centros.edu.xunta.es/iesbeade/Departamento_biologia-xeologia/CTMA-Recursos_minerales_y_energeticos.pdf.
- [7] «EBA,» Estructuras bioclimáticas avanzadas, [En línea]. Available: <https://ebasl.es/producir-energia-con-la-biomasa/>.
- [8] Ana Isabel de Lucas Herguedas, «Universidad de Palencia,» [En línea]. Available: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>.
- [9] N. M. a. H. Koseki, «Investigation of Heat Generation from Biomass Fuels,» *energies*, 2015.
- [10] O. Sippula, «FINE PARTICLE FORMATION AND EMISSIONS IN BIOMASS COMBUSTION,» 2010.
- [11] J. Tissari, «Fine particle emissions from residential wood combustion,» 2008.

- [12] A. R. Pereira, «Contribuciones a la reducción de emisiones en combustión de biomasa a través de medidas primarias y secundarias en planta piloto.,» Universidad de Vigo, Vigo, 2017.
- [13] H. Khodaei, F. Guzzomi, G. h. Yeoh, A. Regueiro y D. Patiño, «An experimental study into the effect of air staging distribution and position on emissions in a laboratory scale biomass combustor.,» Vigo, 2016.
- [14] A. Regueiro, D. Patiño, N. Cid y J. L. Míguez, «PM abatemen effect in biomass combustion using inert porous material.,» CNIT, 2018.
- [15] B. Rashidian, «Effect of freeboard deflectors in the fixed bed combustion of biomass.,» Vigo, 2016.
- [16] R. Pérez-Orozco, «Influence of the Feeding Rate on the Transient Behavior of a Biomass Combustor.,» 2019.
- [17] C. R. Carballo, «Influencia del material del intercambiador de calor en su ensuciamiento en combustión de biomasa.,» Vigo, 2017.
- [18] A. R. Pereira, «Contribuciones a la reducción de emisiones en combustión de biomasa a través de medidas primarias y secundarias en planta piloto.,» 2017.

