

AGRADECIMIENTOS

Este documento ha sido realizado utilizando resultados obtenidos en el marco del Servicio Técnico “Ensayos de combustión de astillas comerciales de diferentes humedades y con distinto contenido de finos” (P2017/4525), realizado por CEDER-CIEMAT para el grupo NAPARPELLET (GESBRICK S.L.).

Nuestro agradecimiento al grupo empresarial, no sólo por la aportación de la biomasa preparada para los ensayos realizados, que puede parecer un esfuerzo menor por tratarse de su actividad empresarial, sino sobre todo por su apuesta por la I+D+i como motor del sector de la biomasa al que pertenece, cediendo los datos del estudio realizado para hacer posible esta publicación.

En concreto agradecer a Alfredo Martínez Ruiz de Gopegui, Responsable técnico comercial del Grupo Naparpellet, por su atención e interés.

ÍNDICE

1 PRÓLOGO.....	6
2 INTRODUCCIÓN.....	1
3 COMBUSTIBLES EN ESTUDIO	4
3.1 PREPARACIÓN Y MANEJO.....	4
3.2 MUESTREO.....	5
3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y ENERGÉTICA.....	5
3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SEGÚN ESTÁNDARES.....	8
3.4.1 <i>COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LA PRIMERA FASE.....</i>	<i>8</i>
3.4.2 <i>COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LA SEGUNDA FASE</i>	<i>12</i>
4 ENSAYOS DE COMBUSTIÓN.....	16
4.1 EQUIPO DE COMBUSTIÓN	16
4.1.1 <i>METODOLOGÍA DE ENSAYOS.....</i>	<i>17</i>
4.1.2 <i>RECOGIDA DE CENIZAS.....</i>	<i>19</i>
4.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO.....	19
5 EMISIONES EN COMBUSTIÓN DE BIOMASA	21
5.1 SISTEMA DE ANÁLISIS DE GASES Y PARTÍCULAS	21
5.2 CÁLCULO DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE LOS GASES DE LA COMBUSTIÓN.....	22
6 COMBUSTION DE ASTILLAS DE PINO	24
6.1 EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE	24
6.1.1 <i>CONDICIONES DE OPERACIÓN.....</i>	<i>24</i>
6.1.2 <i>EMISIONES A LA ATMÓSFERA.....</i>	<i>27</i>
6.1.3 <i>EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN.....</i>	<i>29</i>
6.1.4 <i>ESTUDIO DE CENIZAS</i>	<i>30</i>
6.2 EFECTO DEL CONTENIDO EN FINOS DEL COMBUSTIBLE	31
6.2.1 <i>CONDICIONES DE OPERACIÓN.....</i>	<i>31</i>
6.2.2 <i>EMISIONES A LA ATMÓSFERA.....</i>	<i>33</i>
6.2.3 <i>EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN.....</i>	<i>35</i>

6.2.4 ESTUDIO DE CENIZAS	36
6.3 FACTORES DE EMISIÓN	37
7 SÍNTESIS DEL TRABAJO DESARROLLADO.....	39
8 ANEXO.....	42
9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Astilla seca con finos (izquierda) y astilla seca cribada (derecha) utilizadas en los ensayos de combustión de la fase 2.	5
Figura 2: Distribución granulométrica de la muestra global de las biomásas utilizadas en la primera fase de ensayos (astilla seca, semihúmeda y húmeda 2, mezcladas proporcionalmente).	9
Figura 3: Variación de los poderes caloríficos de la astilla de pino con su humedad.	12
Figura 4: Distribución granulométrica de las muestras de biomasa utilizadas en la segunda fase de ensayos (astilla seca con finos y astilla seca cribada). S1: saca 1, S2: saca 2.	14
Figura 5: Caldera experimental de combustión en parrilla móvil.	16
Figura 6: Puntos de medida de la temperatura de los gases de combustión en la caldera.	17
Figura 7: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino seca.	25
Figura 8: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino semihúmeda.	26
Figura 9: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino húmeda 1.	26
Figura 10: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino húmeda 2.	26
Figura 11: Imagen de los filtros de los muestreos discontinuos de partículas durante los ensayos de combustión de la primera fase.	29
Figura 12: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino seca con finos de la segunda fase.	32
Figura 13: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino seca cribada de la segunda fase.	33
Figura 14: Imagen de los filtros de los muestreos discontinuos de partículas durante los ensayos de combustión de la segunda fase.	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Generación de energía eléctrica en TWh y térmica en TJ a partir de biomasa en el mundo	1
Tabla 2: Métodos de análisis y técnicas empleadas en los análisis	6
Tabla 3: Peso y humedad de las sacas utilizadas en los ensayos de la primera fase.	9
Tabla 4: Caracterización química de la muestra global de biomasa de la primera fase.	11
Tabla 5: Peso y humedad de las sacas de astilla utilizadas en la segunda fase de ensayos.	13
Tabla 6: Caracterización química de las muestras globales de biomasa de la segunda fase.	15
Tabla 7: Métodos de análisis y rangos de los distintos analizadores.	21
Tabla 8: Condiciones de operación del estado estacionario de los ensayos de la primera fase.	24
Tabla 9: Valores medios de las temperaturas más importantes durante los ensayos de combustión de la primera fase (estado estacionario y por tramos) ($^{\circ}\text{C}$).	27
Tabla 10: Valores medios de las emisiones durante los ensayos de combustión de la primera fase (estado estacionario y por tramos) (en % y mg/Nm^3).	28
Tabla 11: Valores de eficiencia durante los ensayos de combustión de la primera fase (por tramos).	30
Tabla 12: Contenido en humedad e inquemados de la ceniza tras la primera fase de ensayos.	30
Tabla 13: Distribución de la ceniza recogida tras la primera fase de ensayos.	31
Tabla 14: Condiciones de operación del estado estacionario de los ensayos de la segunda fase.	32
Tabla 15: Valores medios de las temperaturas más importantes durante los ensayos de combustión de la segunda fase (estado estacionario y por tramos) ($^{\circ}\text{C}$).	33
Tabla 16: Valores medios de las emisiones durante los ensayos de combustión de la segunda fase (estado estacionario y por tramos) (en % y mg/Nm^3).	34
Tabla 17: Valores de eficiencia durante los ensayos de combustión de la segunda fase (por tramos).	36
Tabla 18: Contenido en humedad e inquemados de la ceniza tras la segunda fase de ensayos.	36
Tabla 19: Distribución de la ceniza recogida tras la segunda fase de ensayos.	37
Tabla 20: Factores de emisión de la combustión de las distintas astillas.	38
Tabla 21: Emisiones medias en el periodo estacionario de los ensayos.	39
Tabla 22: Cantidades de ceniza recogida al final de los ensayos de cada fase en las distintas partes de la instalación.	41
Tabla 23: Eficiencia de la combustión para los diferentes combustibles usados en cada fase en tramos equivalentes del ensayo	41
Tabla 24: Resumen de especificaciones de astillas de madera clasificadas dentro de la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014. Extraído de tabla 2 de la norma.	42
Tabla 25: Resumen de dimensiones de astillas de madera clasificadas dentro de la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014. Extraído de tabla 1 de la norma.	43
Tabla 26: Límites de emisión según UNE-EN 303-5:2012, para calderas automáticas que usan combustible biogénico en función de la clase de la caldera (3, 4, 5).	43
Tabla 27: Límites estacionales de emisión según Reglamento de Ecodiseño, para calderas automáticas que usan biomasa sólida.	44

1 PRÓLOGO

La biomasa en su combustión produce emisiones gaseosas y partículas sólidas que son emitidas a la atmósfera. Algunas de ellas tienen algún carácter contaminante para el medio ambiente, y otras también pueden tener efectos nocivos sobre la salud humana.

La presencia de estas sustancias, hacen de la combustión de biomasa una actividad potencialmente contaminante. El control de las características del combustible, de las variables de proceso y de las condiciones de mantenimiento de los equipos de combustión, son necesarias para que algunos de estos contaminantes se produzcan en la menor concentración posible, respetando los límites establecidos en la amplia legislación existente, y minimizando su impacto.

Actualmente, el uso de la combustión de biomasa se está extendiendo a diferentes ámbitos que van desde el uso residencial, comercial, institucional, sobre todo para la producción térmica; y uso agrícola e industrial, siendo la combinación de producción de calor y electricidad el destino más habitual en estos casos.

Los combustibles de biomasa son muy variados, la preparación y el tratamiento de la biomasa natural permite obtener combustibles en un amplio rango de características. La existencia de estándares de calidad en los combustibles de biomasa define valores para los parámetros más importantes; y la utilización de los combustibles con calidad contribuye a mejorar los procesos de aprovechamiento minimizando residuos y emisiones producidos.

La regulación existente para el control de las emisiones en combustión de biomasa no es igual en todas sus aplicaciones, así como tampoco las mejores técnicas disponibles para el control de las mismas. Se distinguen entre medidas primarias, denominadas así aquellas que tienen lugar en el propio medio o unidad de combustión, y medidas secundarias aquellas que se toman a partir del conducto de gases de salida del equipo principal. Estas últimas son menos habituales en sistemas de menor potencia, por ejemplo para usos residenciales; y aumenta con la potencia de trabajo, el número y complejidad de equipos disponibles para aplicaciones de medidas secundarias.

Los factores de emisión específicos calculados a partir de las emisiones encontradas para múltiples unidades de combustión para un tipo particular de combustible sólido (ya sea biomasa en general, o un tipo concreto), se compilan en factores de emisión genéricos que se utilizan para la estimación de los Inventarios de Emisiones en los distintos países.

En este documento se recogen los resultados encontrados para la combustión de astillas de pino, preparadas comercialmente con diferentes humedades y contenidos en finos, en cuanto al rendimiento de la instalación y las emisiones generadas. Se utiliza una caldera de combustión de tecnología de parrilla móvil de 500 kW_t, en la que se dispone de un multiciclón como medida secundaria de retención de partículas. Se recopilan los factores de emisión calculados para los distintos contaminantes en las distintas pruebas realizadas con los combustibles evaluados.

2 INTRODUCCIÓN

Actualmente, la biomasa supone el 10% del suministro de energía primaria en países desarrollados y un 6% en países OCDE y las principales aplicaciones energéticas que se están dando a la biomasa son térmicas en el sector doméstico e industrial. Tal y como se observa en la Tabla 1, la generación de energía a partir de la biomasa en el mundo es en forma de energía térmica por delante de energía eléctrica [7].

ENERGÍA ELÉCTRICA (TWh)		ENERGÍA TÉRMICA(TJ)	
AÑO	TOTAL	AÑO	TOTAL
2000	164	2000	414.081
2005	227	2005	530.237
2010	372	2010	781.020
2015	528	2015	940.492
2016	571	2016	1.053.861

Tabla 1: Generación de energía eléctrica en TWh y térmica en TJ a partir de biomasa en el mundo

Fuente: World Bioenergy Association

Con la elevada dependencia energética existente de los combustibles fósiles y la conciencia de la sociedad por impulsar un desarrollo sostenible, la biomasa está adquiriendo un papel importante, por tratarse de un recurso autóctono y limpio [4]. Así, desde la Unión Europea se han redactado diversos planes para el desarrollo de las energías renovables en general y de la biomasa en particular, apoyados con financiación económica a través de convocatorias de proyectos.

En Europa existe una amplia diversidad florística tanto en la naturaleza forestal-natural como en la agrícola. De manera que la diversidad de especies puede ser empleada potencialmente para la producción de biocombustibles [9].

Dentro de los países que conforman la UE, España es una gran potencia en cuanto a recursos biomásicos. Para calor y electricidad con biomasa, es esperable que el mayor desarrollo se produzca con biomasa de origen forestal o agrícola (en la industria, en general, ya se viene utilizando) [10], ya que España es el tercer país de Europa por recursos absolutos de biomasa forestal [19]. Se precisan del orden de 1.600 ktep/a adicionales de recursos forestales para el incremento de generación eléctrica y 411 ktep/a adicionales para usos térmicos. En el PER 2011-2020 se valoró, de forma conservadora, que el potencial adicional en España es de 17.286 ktep/a, de los cuales 10.433 ktep/a son restos agrícolas o forestales sostenibles y la diferencia son nuevas masas leñosas o herbáceas. Por consiguiente, existen recursos más que suficientes [10]. Pese a esta situación, en España no se están explotando todos estos recursos disponibles. Como consecuencia, se produce acumulación, abandono y quema incontrolada de biomasa residual con el consiguiente riesgo de incendio y elevadas emisiones a la atmósfera. Por lo que, la valorización energética de los recursos biomásicos resulta fundamental para el medioambiente [7]. El objetivo a corto plazo es la adaptación a las

obligaciones ligadas a la calidad del aire tanto en instalaciones nuevas como en las ya existentes [10].

En referencia a datos de 2016, en torno al 17% de la energía que se consumió en la UE fue renovable, y de esta fracción, un 60% provino de la biomasa. Aproximadamente, el 75% de la energía de la biomasa en Europa se usó con fines térmicos, por delante del consumo de energía eléctrica (13,4%) y de biocarburantes para el transporte (12%) [7]. Según datos del PNIEC, para el año 2030 se espera que en Europa el 32% del total de energía final bruta proceda de energías renovables. En España, el objetivo de energías renovables sobre el uso final de energía es del 42% [10].

La creciente utilización de la biomasa en sustitución de combustibles fósiles puede reducir significativamente las emisiones de CO₂. La combustión es la tecnología más madura disponible para la utilización de biomasa. Sin embargo, es necesario el estudio del proceso y han de tenerse en cuenta las implicaciones medioambientales que conlleva su utilización. En especial, las emisiones de partículas, que constituyen uno de los factores de mayor desventaja en el uso de la biomasa como combustible [11]. En países europeos, donde la biomasa está implantada en el sector doméstico, se ha notado un deterioro de la calidad del aire. Este hecho ha motivado un impulso a la actividad de investigación, tanto de caracterización de emisiones como de desarrollo de equipos de control, y en promulgación de legislación a nivel nacional y europeo.

La biomasa puede tener orígenes muy diversos con composiciones y propiedades muy diferentes dependiendo del tipo, lo que va a determinar su comportamiento durante la combustión y los contaminantes derivados. Existen numerosas biomásas, tanto naturales como de origen residual, que presentan tendencias similares y a su vez, comportamientos diferenciales ante la combustión. En general, la biomasa contiene cantidades variables de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, azufre, humedad y cenizas [3].

Las características y la calidad de la biomasa como combustible dependen principalmente del tipo de biomasa y de los pretratamientos que se aplican en su preparación. Se incluyen en pretratamientos todas las etapas necesarias para producir un combustible desde el recurso de biomasa recolectado (secado, molienda, densificación, etc.). La calidad del biocombustible obtenido dependerá de las etapas utilizadas y, en general, será de mayor calidad cuanto más exhaustiva sea su preparación, al mismo tiempo que aumenta el coste del proceso y del propio biocombustible.

Así, por ejemplo, las biomásas herbáceas son las que habitualmente tienen mayor contenido en cenizas, en azufre y en cloro. Todos estos parámetros hacen que la combustión de las biomásas herbáceas genere una mayor cantidad de ceniza, ensuciamiento y corrosión, lo que marca el diseño y dimensionado de los sistemas de extracción de cenizas y de limpieza de los tubos y puede originar mayores emisiones de óxidos de azufre y de ácido clorhídrico [4].

Los límites de emisión permitidos son cada vez más restrictivos, con la entrada en vigor de la normativa de Ecodiseño (Reglamento UE 2015/1185 y Reglamento UE 2015/1189 [12]) y la de

instalaciones de media potencia (RD 1042/2017), por lo que en ocasiones se hace necesaria la utilización de equipos que puedan acoplarse a las estufas y calderas de biomasa con la finalidad de reducir la emisión de partículas.

La formación de partículas y las características físico-químicas de las mismas, dependen del tipo y características del combustible, de la tecnología de combustión y de las condiciones de operación. La cantidad finalmente emitida a la atmósfera dependerá además de las tecnologías de depuración que se dispongan.

Se encuentran varios ejemplos de estudios de combustión en los que se ha estudiado la influencia de la calidad del combustible sobre las emisiones.

Según el estudio realizado en CEDER-CIEMAT, durante la combustión de hueso de aceituna con proporciones variables de aceite (desde 0,16 a 2%), se observa que los contenidos de aceite por encima del 1% dan como resultado el aumento de las emisiones de CO, TOC, TSP, PM1 y PM0.1. Cuando los ensayos se realizan con hueso de aceituna con contenidos cercanos al 2% en aceite, el aumento de las emisiones es mayor. Además, las emisiones de NO_x aumentan a medida que el contenido de aceite aumenta, debido al mayor contenido de N en el combustible [8].

En otro de los estudios realizados en CEDER-CIEMAT, se evaluó la influencia del contenido de finos en muestras de biomasa sobre las emisiones de contaminantes primarios a la atmósfera. Entre los experimentos realizados con astilla de olivo cribada y sin cribar, en condiciones similares de temperatura del aire de combustión, porcentaje de aire secundario y exceso de aire, se observa que la concentración de partículas presentes en el gas bruto es considerablemente inferior en el caso de la astilla cribada, respecto a la astilla sin cribar. Por otro lado, en este estudio se ha comprobado que la concentración de partículas disminuye en el caso de la astilla peletizada con respecto a la astilla sin peletizar y sin cribar [13].

Por otro lado, de acuerdo con estudios realizados, la humedad del combustible es un parámetro a tener en cuenta a la hora de evaluar la calidad del combustible. El uso de un combustible con un contenido de humedad demasiado alto resulta en una combustión incompleta y en la producción de altos niveles de partículas, así como productos intermedios como alquitranes y PAHs. El proceso de secado permite obtener combustibles con más calidad, aumentando la eficiencia del proceso de combustión. Por otro lado, la proporción de finos en la biomasa es otro parámetro relacionado directamente con su contenido en ceniza. Además, cuanto mayor contenido en finos tenga, lo que está relacionado con una menor calidad del mismo, mayor suciedad se genera en el manejo del combustible. Además, la biomasa peletizada, generalmente produce niveles más bajos de partículas que las astillas y los troncos de madera, ya que posee muy pocos finos y propiedades físico-químicas muy uniformes [5].

3 COMBUSTIBLES EN ESTUDIO

3.1 PREPARACIÓN Y MANEJO

Las biomásas utilizadas en el estudio fueron proporcionadas por Grupo Naparpellet al CEDER-CIEMAT. Cabe remarcar que la línea de producción de astilla de Grupo Naparpellet es de una capacidad de 8-10.000 t/año (aunque se produce a demanda), y que para preparar las astillas usadas en los ensayos de combustión se realizó de otro modo distinto al habitual, según información facilitada por la empresa. De modo que el contenido en finos de las astillas utilizadas puede diferir del habitual y la humedad fue más difícil de conseguir en el grado deseado.

Así, en primer lugar, se inició el estudio de la influencia de la humedad (fase 1) y se recibieron en el centro dos big bags de cada uno de los tipos de astilla a estudiar (1.531 kg de astilla húmeda, 1.048 kg de astilla semihúmeda y 903 kg de astilla seca).

Se programó iniciar los ensayos con la biomasa húmeda lo más rápido posible con el fin de evitar su deterioro. De este modo, se realizó un ensayo de aproximadamente 3 horas y media de duración con la astilla húmeda (53% de humedad). El operador vio necesario detener el ensayo porque debido a la elevada humedad del combustible era muy difícil mantener unas condiciones de combustión razonables en la planta (ensayo de astilla húmeda 1). Además, se observó una temperatura muy elevada en el interior de las sacas de la astilla húmeda y de la semihúmeda por la fermentación debida a su contenido en humedad, por lo que se decidió vaciar las sacas de estos dos combustibles en una zona techada y limpia, para evitar problemas de autoignición de estos combustibles.

Así, unos días después, se realizó el ensayo de combustión de la astilla seca (21,1% de humedad) (ensayo de astilla seca), mientras el contenido en humedad de las otras astillas se reducía ligeramente de forma natural.

La astilla semihúmeda (31,3% de humedad) se quemó tras dos días de estar extendida para su secado natural (ensayo de astilla semihúmeda), mientras que la astilla húmeda (44,4% de humedad) se quemó después de dos semanas secándose de manera natural (ensayo de astilla húmeda 2).

Posteriormente, se llevó a cabo el estudio de la influencia de la presencia de finos (fase 2) para lo que se recibieron en el CEDER-CIEMAT 2 big bags de astilla de pino seca con finos (846 kg) y otros 2 big bags de astilla de pino seca cribada (829 kg), que se mantuvieron almacenados bajo techado y cerrados para evitar posibles contaminaciones hasta que se realizaron los ensayos pertinentes (ensayo de astilla seca con finos y ensayo de astilla seca cribada). En la Figura 1 se pueden ver unas fotos de ambos tipos de astilla, con una clara diferencia en el contenido de finos entre ambos combustibles.



Figura 1: Astilla seca con finos (izquierda) y astilla seca cribada (derecha) utilizadas en los ensayos de combustión de la fase 2.

3.2 MUESTREO

Para el control de la humedad se fueron recogiendo muestras de los distintos tipos de astilla durante su almacenamiento, de distintos puntos para intentar que la muestra fuera representativa.

Además, durante cada ensayo se obtiene una muestra de cada saca de biomasa tomando una cantidad en tres puntos diferentes de la misma. A cada una de estas muestras de sacas individuales se les determina la humedad y el contenido en cenizas.

Posteriormente, en el caso de la primera fase de ensayos, se ha realizado la mezcla de las muestras de todas las sacas de los tres ensayos (húmeda, semihúmeda y seca), sobre la que se ha realizado el resto de la caracterización, ya que el contenido en humedad no tiene influencia sobre la composición. Sin embargo en la segunda fase de ensayos, se ha obtenido una mezcla por cada tipo de combustible (astilla seca con finos y astilla seca cribada), siendo analizadas las dos muestras generadas por separado, ya que se ha considerado que la retirada de finos puede variar la composición de la muestra.

3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA Y ENERGÉTICA

Los análisis realizados a las biomásas y cenizas del estudio que se presenta fueron realizados en el Laboratorio de Caracterización de Biomasa del CEDER-CIEMAT utilizando normas actualizadas de análisis para Biocombustibles sólidos. En la Tabla 2 se recogen las normas de aplicación para cada una de las propiedades analizadas, y a continuación se presenta una breve descripción de algunos de los métodos utilizados.

Preparación de la biomasa: se realiza según procedimiento interno del LCB del CIEMAT-CEDER, siguiendo la Especificación Técnica CEN/TS 14780 “Solid Biofuels - Methods for sample preparation”, de preparación de muestras para análisis a partir de muestras de biomasa de entrada al laboratorio, basado en etapas tales como: homogeneización, división, molienda y secado.

PROPIEDAD	NORMA EUROPEA	NORMA INTERNACIONAL	TÉCNICA
Humedad		ISO 18134-2:2015	Secado
Densidad de pila		ISO 17828:2015	Peso de un volumen conocido
Distribución granulométrica	EN15149-1 y EN15149-2		
Ceniza		ISO 18122:2015	Calcinación
Volátiles		ISO 18123:2015	Pirólisis parcial
Poder calorífico	EN 14918		Calorimetría
C, H, N		ISO 16948:2015	Análisis elemental
Cl, S		ISO 16994:2015	Cromatografía Iónica
O		ISO 16993:2015	Calculado por diferencia
Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, p, Si, Sr, Ti, Zn		ISO 16967:2015	ICP-OES
As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn		ISO 16968:2015	ICP-MS

Tabla 2: Métodos de análisis y técnicas empleadas en los análisis

Humedad: se realiza mediante el procedimiento interno de determinación de la humedad total en biomasa, basado en la pérdida de masa de la muestra hasta alcanzar un valor constante cuando se calienta a 105°C.

Distribución granulométrica de la biomasa: El procedimiento usado deriva de las Normas Europeas EN 15149-1 “Solid Biofuels - Methods for the determination of particle size distribution. Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 1 mm and above”, y EN 15149-2. “Solid Biofuels - Methods for the determination of particle size distribution. Part 2: Vibrating screen method using sieve apertures of 3, 15 mm and below”.

Análisis inmediato:

Cenizas 550°C: se realiza mediante procedimiento interno del LCB del CIEMAT-CEDER de calcinación y determinación del contenido en ceniza a 550°C en biomasa. Se basa en la combustión de la biomasa mediante rampas de calentamiento establecidas hasta 550°C, con el fin de evitar desprendimientos de elementos. Los inquemados de las muestras de ceniza de parrilla, de intercambiador y de ciclón se determinan como la diferencia a 100 del contenido en ceniza, obtenida ésta al calcinar la muestra de ceniza original en el horno del laboratorio a 550°C durante 24 horas.

Volátiles 900°C: se basa en el calentamiento de la biomasa bajo condiciones establecidas hasta 900°C y en ausencia de aire.

Análisis elemental orgánico C, H y N: se realiza mediante el procedimiento interno de determinación de carbono, hidrógeno y nitrógeno en biomasa utilizando un analizador elemental TruSpec (Leco).

Cloro y azufre: En las biomásas se realiza la determinación del cloro y azufre por cromatografía iónica, previa recuperación en disolución acuosa de los compuestos de cloro y azufre que provienen de la bomba calorimétrica.

Poder calorífico superior a volumen constante: se determina siguiendo el procedimiento interno de determinación del poder calorífico en biomasa utilizando calorímetros automáticos, marca LECO AC-300 o IKA C-5000, realizando la combustión de la biomasa con exceso de oxígeno bajo condiciones controladas. El poder calorífico superior a volumen constante se calcula a partir de las mediciones de temperatura realizadas antes y después de la combustión. Este procedimiento deriva de la Norma Europea EN 14918 "Solid Biofuels - Determination of calorific value". Posteriormente se realizan las diferentes correcciones entre las que figuran las correcciones termoquímicas de formación de ácido nítrico y sulfúrico, fruto de aplicar la norma anterior.

Para calcular el poder calorífico anterior en base húmeda se aplica la siguiente fórmula:

$$PCS_{v,x} = PCS_{v,o} (1-0,01X)$$

Donde:

$PCS_{v,x}$ = poder calorífico superior a volumen constante en kJ/kg con humedad X.

$PCS_{v,o}$ = poder calorífico superior a volumen constante (determinado por el calorímetro) en kJ/kg con humedad cero.

X = humedad de la biomasa en % base húmeda.

Poder calorífico inferior a presión constante:

En base seca: se calcula restando al poder calorífico superior en base seca el calor de vaporización del agua formada en la combustión de la biomasa, a partir del contenido en hidrógeno de la materia hidrocarbonada de la biomasa seca. Asimismo, se realiza la corrección mostrada en la norma EN 14918 con objeto de pasar de volumen constante a presión constante. La fórmula final aplicada se indica a continuación:

$$PCI_{p,o} = PCS_{v,o} - 212,2 \cdot H_o - 0,8 \cdot (O_o + N_o)$$

Donde:

$PCI_{p,o}$ = poder calorífico inferior a presión constante en kJ/kg con humedad cero.

H_o = contenido en hidrógeno de la biomasa en % base seca.

O_o = contenido en oxígeno de la biomasa en % base seca.

N_o = contenido en nitrógeno de la biomasa en % base seca.

El contenido en oxígeno de la biomasa se calcula, a su vez, aplicando la siguiente fórmula:

$$O_o = 100 - (C_o + H_o + N_o + ceniza_o + Cl_o + S_o)$$

$ceniza_o$ = contenido en ceniza de la biomasa en % base seca.

Cl_o = contenido en cloro de la biomasa en % base seca.

S_o = contenido en azufre de la biomasa en % base seca.

En base húmeda: para calcular el poder calorífico anterior en base húmeda a la humedad de la muestra que llega al laboratorio, se parte del poder calorífico inferior en base seca y de la humedad de la biomasa y se aplica la siguiente fórmula:

$$PCI_{p,x} = PCI_{p,o} (1 - 0,01 \cdot X) - 24,43 \cdot X$$

Donde:

$PCI_{p,x}$ = poder calorífico inferior a presión constante en kJ/kg con humedad X.

3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES SEGÚN ESTÁNDARES

3.4.1 COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LA PRIMERA FASE

En los muestreos de la biomasa se ha procedido como se indica en el apartado 2.2. , configurándose para los ensayos de esta fase una mezcla global con todos los combustibles, para realizar su caracterización química. En la configuración de la muestra mezcla no se ha utilizado la astilla húmeda 1 (astilla recibida tal cual, con 53% de humedad, como se describe en el apartado 3.1.), dado que el ensayo realizado con la misma sólo tuvo una duración de 3 horas y media, no siendo representativa del total.

En la Figura 2 se puede ver la distribución granulométrica de la biomasa utilizada en los ensayos de la primera fase.

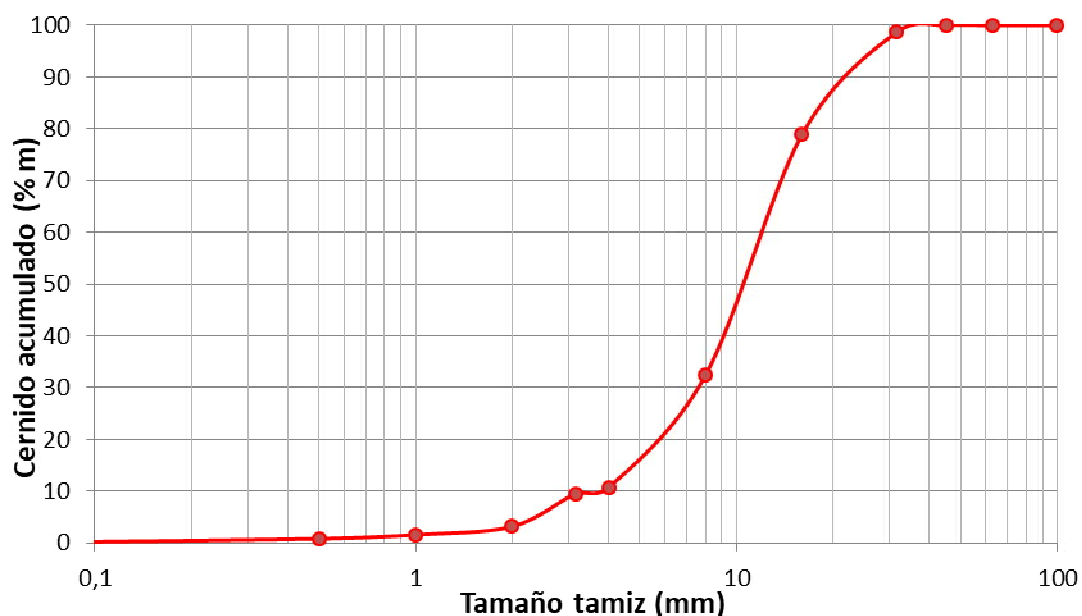


Figura 2: Distribución granulométrica de la muestra global de las biomásas utilizadas en la primera fase de ensayos (astilla seca, semihúmeda y húmeda 2, mezcladas proporcionalmente).

Se observa que el tamaño de partícula medio es ligeramente superior a 10 mm y que sólo el 10% del total de astilla está por debajo de 3.15mm y prácticamente el 100% está por debajo de 31.5mm. Atendiendo a esta proporción de finos y a la cantidad de partículas de tamaño grande, la astilla cumple las propiedades de P16S, según UNE-EN ISO 17225-4:2014 (ver Tabla 25 Anexo I).

En la Tabla 3 se muestran los valores de humedad y de cenizas de las sacas individuales, junto con unas medias ponderadas para cada ensayo.

ASTILLA	MUESTRA	PESO (kg, b.h.)	HUMEDAD (%b.h.)	CENIZAS (%b.s.)
SECA	Saca 1	421	21,1	1,7
SECA	Saca 2	430	21,1	1,0
SECA	Media ponderada	851 ^(*)	21,1	1,3
SEMIHÚMEDA	Saca 1	399	31,3	1,0
SEMIHÚMEDA	Saca 2	263	30,9	0,7
SEMIHÚMEDA	Saca 3	273	31,7	0,6
SEMIHÚMEDA	Media ponderada	935 ^(*)	31,3	0,8
HÚMEDA 2	Saca 1	383	45,5	1,3
HÚMEDA 3	Saca 2	300	44,9	1,6
HÚMEDA 4	Saca 3	280	42,2	2,0
HÚMEDA 5	Media ponderada	963 ^(*)	44,4	1,6

Tabla 3: Peso y humedad de las sacas utilizadas en los ensayos de la primera fase.

(*): peso total de biomasa quemado en el ensayo.

Se puede destacar la elevada homogeneidad en lo que a humedad se refiere.

Respecto al contenido en ceniza, se observa una mayor variabilidad entre las distintas sacas. En los resultados de los análisis de ceniza influye la forma de realizar la toma de muestra de las distintas biomásas, que se hizo del modo más riguroso posible. Una posible explicación de la variabilidad del porcentaje de cenizas es que durante el procesado y el ensacado de la astilla, se puede producir una disgregación por tamaños de la propia biomasa, no estando los finos repartidos de forma homogénea en toda la saca. Estos finos, en buena parte son áridos que van adheridos a la propia biomasa, por lo que su contenido afecta directamente al porcentaje de cenizas.

Así, se han encontrado unos valores mayores al 1% en algunas sacas de astilla seca y semihúmeda y el contenido en ceniza de la astilla húmeda es mayor al 1% en todos los casos.

Atendiendo a los valores de humedad, la astilla seca cumple las propiedades de M25, la semihúmeda de M35 y la húmeda sólo podría clasificarse en calidad B según las definiciones establecidas por la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014 (ver Tabla 24 del Anexo I). En lo que respecta a las cenizas, la astilla semihúmeda cumple las propiedades de A1.0, la seca de A1.5 y la húmeda de A3.0, según esa misma normativa.

Teniendo en cuenta todas las propiedades anteriores en conjunto, las astillas secas y las semihúmedas quedan clasificadas como calidad A2, y las astillas húmedas sólo pueden clasificarse en la calidad B según la citada normativa UNE-EN ISO 17225-4:2014.

En la

Tabla 4 se incluyen los resultados relativos a la caracterización química de la muestra global de los ensayos de la primera fase.

ANÁLISIS INMEDIATO	
Materias volátiles (% b.s.)	83,20
Cenizas (% b.s.)	1,30
ANÁLISIS ELEMENTAL	
Carbono (% b.s.)	52,70
Hidrógeno (% b.s.)	6,20
Nitrógeno (% b.s.)	0,20
Azufre (% b.s.)	0,02
Cloro (% b.s.)	0,02
Oxígeno (% b.s.)	39,56
PODERES CALORÍFICOS	
PCS (MJ/kg b.s.)	20,33
PCI (MJ/kg b.s.)	18,98
PCI (MJ/kg b.h.)- SECA (21,1% humedad)	14,46
PCI (MJ/kg b.h.)- SEMIHÚMEDA (31,3%)	12,28
PCI (MJ/kg b.h.)- HÚMEDA 2 (44,4%)	9,48

Tabla 4: Caracterización química de la muestra global de biomasa de la primera fase.

En lo que se refiere a la composición química, se puede ver el reducido contenido en azufre y cloro de la astilla de pino, por debajo de los límites establecidos en la normativa de la clase B.

El poder calorífico como medida del contenido energético aprovechable en cada combustible se sitúa en diferentes valores en función de la humedad de las astillas usadas. En la Figura 3 se muestra la variación de los poderes caloríficos (PCS y PCI) en función de la humedad de las astillas, teniendo en cuenta la composición media de la muestra ponderada, su PCS₀ y calculados a partir de las fórmulas que aparecen descritas en el apartado 2.3.

Se encuentran poderes caloríficos bajos a humedades por encima de 35%.

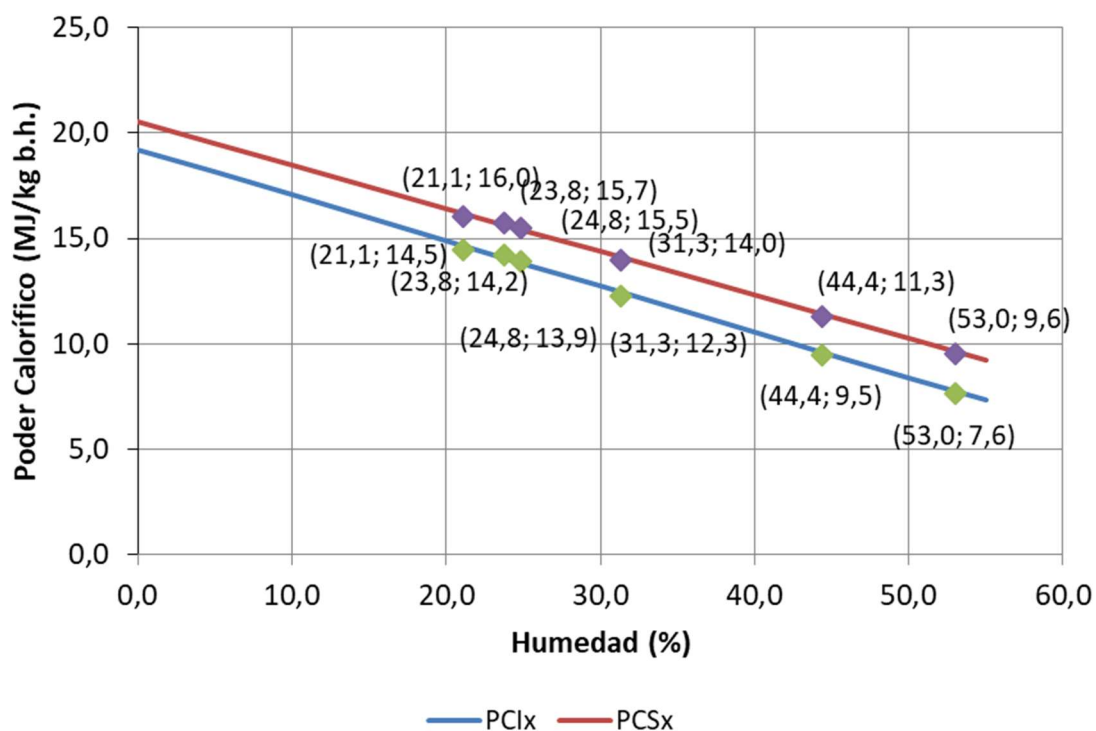


Figura 3: Variación de los poderes caloríficos de la astilla de pino con su humedad.

3.4.2 COMBUSTIBLES UTILIZADOS EN LA SEGUNDA FASE

En las muestras de biomasa generadas durante la segunda fase de ensayos, se ha llevado a cabo la determinación de humedad, cenizas, densidad de pila y distribución granulométrica de cada una de las sacas utilizadas, mientras que la composición química y el poder calorífico se han analizado de la mezcla ponderada de las sacas, para cada ensayo.

En la

Tabla 5 se muestra el peso, humedad, cenizas y densidad de pila de cada una de las sacas de astilla utilizadas en la segunda fase de ensayos.

ASTILLA	MUESTRA	PESO (kg, b.h.)	HUMEDAD (%b.h.)	CENIZAS (%b.s.)	DENSIDAD DE PILA (kg/m ³)
SECA CON FINOS	Saca 1	443	23,3	1,4	240
SECA CON FINOS	Saca 2	379	24,3	1,1	230
SECA CON FINOS	Media ponderada	822 ^(*)	23,8	1,3	235
SECA CRIBADA	Saca 1	429	25,3	0,6	230
SECA CRIBADA	Saca 2	396	24,2	0,6	220
SECA CRIBADA	Media ponderada	825 ^(*)	24,8	0,6	225

Tabla 5: Peso y humedad de las sacas de astilla utilizadas en la segunda fase de ensayos.

^(*): Peso total de biomasa quemado en el ensayo.

Se observa una gran homogeneidad en cuanto a la humedad de la astilla y una mayor variabilidad en el contenido en cenizas de la astilla seca con finos. Al igual que en las astillas usadas en la primera fase de ensayos, esto puede deberse a que las sacas no tienen un contenido homogéneo de finos y, por tanto de ceniza. Sin embargo, en la astilla cribada no se encuentra heterogeneidad debido a la ausencia de finos.

Atendiendo a los valores de humedad, ambas astillas cumplen la propiedad de M25, según las definiciones establecidas por la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014 (ver Tabla 24 del Anexo I). En lo que respecta a las cenizas, la astilla cribada cumple la propiedad de A1.0, mientras que la que tiene finos la de A1.5.

En la Figura 4 se puede ver la distribución granulométrica de las muestras de todas las sacas de astilla utilizadas en los ensayos de la segunda fase. Se observa que el tamaño de partícula medio es aproximadamente 10 mm para todas las sacas. Sin embargo, se observan diferencias a tamaños pequeños, debido al proceso de cribado realizado sobre la astilla seca. Así, la astilla con finos, tiene casi un 20% de partículas por debajo de 3.15 mm, mientras que la astilla cribada tiene sólo el 6% por debajo de este valor. Además, toda la astilla está por debajo de 31.5mm. De este modo, atendiendo a la proporción de finos y a la cantidad de partículas de tamaño grande, la astilla cribada podría ser clasificada como P16S, según las definiciones establecidas por la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014 (ver Tabla 25 del Anexo I), mientras que la astilla sin cribar se encuentra en el límite de las clasificaciones establecidas en la norma por tener una fracción de finos (< 3,15mm) que en algunas muestras sobrepasa el 15% (ver Tabla 25 del Anexo I).

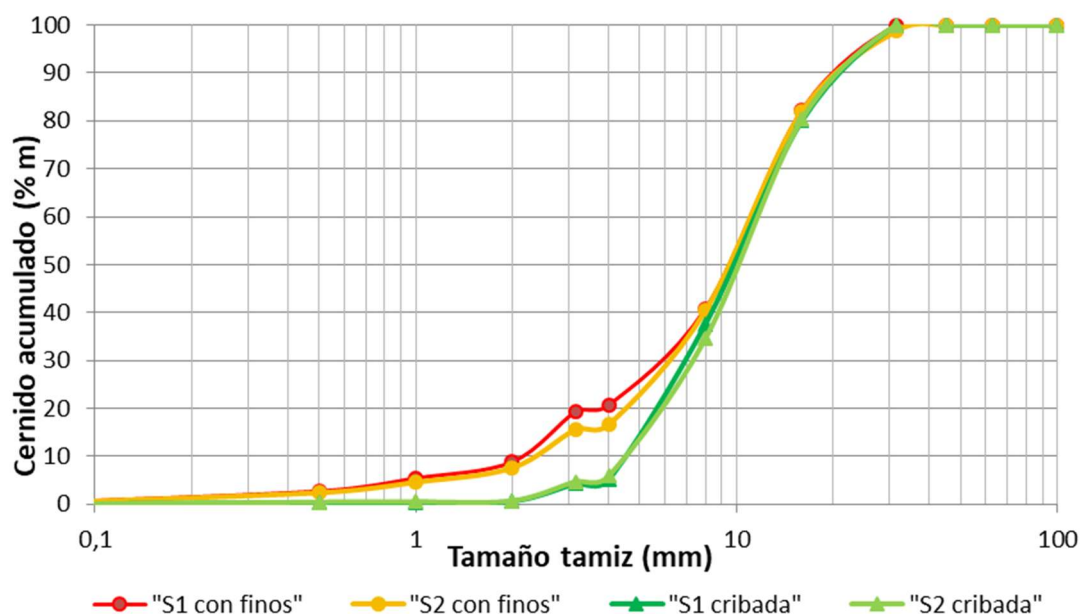


Figura 4: Distribución granulométrica de las muestras de biomasa utilizadas en la segunda fase de ensayos (astilla seca con finos y astilla seca cribada). S1: saca 1, S2: saca 2.

Tomando en consideración los resultados indicados anteriormente y también los obtenidos para la densidad de pila, comparándolos con los valores recogidos en la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014, la astilla cribada se clasifica en calidad A1 y la astilla con finos sería clasificada A2.

En la Tabla 6 se puede ver la caracterización química de cada una de las muestras globales de biomasa de la segunda fase (astilla seca con finos y astilla seca cribada).

En lo que se refiere a la composición química, se puede ver el reducido contenido en azufre y cloro de la astilla de pino, que es inferior incluso a los de las astillas usadas en la primera fase de ensayos. El poder calorífico también se sitúa en valores razonables.

	SECA CON FINOS	SECA CRIBADA
ANÁLISIS INMEDIATO		
Materias volátiles (% b.s.)	82,40	83,40
Cenizas (% b.s.)	1,30	0,60
ANÁLISIS ELEMENTAL		
Carbono (% b.s.)	50,10	50,60
Hidrógeno (% b.s.)	5,80	5,90
Nitrógeno (% b.s.)	0,23	0,21
Azufre (% b.s.)	<0,01	<0,01
Cloro (% b.s.)	<0,01	<0,01
Oxígeno (% b.s.)	42,56	42,69
PODERES CALORÍFICOS		
PCS (MJ/kg b.s.)	20,64	20,60
PCS (MJ/kg b.s.)	15,74	15,49
PCI (MJ/kg b.s.)	19,38	19,31
PCI (MJ/kg b.s.)	14,19	13,92

Tabla 6: Caracterización química de las muestras globales de biomasa de la segunda fase.

4 ENSAYOS DE COMBUSTIÓN

4.1 EQUIPO DE COMBUSTIÓN

En los ensayos de combustión se ha utilizado una caldera de parrilla móvil cuya potencia nominal es de 500 kW_t. Se trata de una caldera comercial de agua caliente, que dispone de una cámara de combustión con parrilla inclinada y móvil de forma escalonada, con extracción de cenizas en continuo (Figura 5). El movimiento de la parrilla se determina por un tiempo de paro y un tiempo de marcha.



Figura 5: Caldera experimental de combustión en parrilla móvil.

La alimentación del combustible se realiza por uno de los extremos de la cámara mediante un tornillo sinfín de gran diámetro. Este tornillo se aísla de las tolvas de alimentación mediante una válvula rotativa que evita el retroceso de gases desde el interior de la cámara.

Para la alimentación del combustible se dispone de varias tolvas. En el caso de la astilla de pino se ha utilizado una tolva de 1 m³ de capacidad aproximada en cuyo fondo hay cuatro tornillos sinfín de velocidad variable, lo que permite dosificar combustibles desde muy bajas densidades y a diferentes tamaños (finamente molidos, de algunos centímetros, astillas,...). Después un elevador de cangilones sube la astilla hasta la válvula rotativa situada en la entrada de la caldera.

La cámara de combustión tiene dos entradas de aire diferenciadas, una bajo la parrilla (aire primario), y la otra por encima de la misma mediante seis toberas distribuidas en ambos laterales

de la cámara (aire secundario). Ambas corrientes se encuentran instrumentalizadas de forma que en todo momento se conoce el aire que entra.

En el fondo de la cámara de combustión, los gases generados entran al intercambiador de calor, que posee tres pasos de humos. En esa zona final de la cámara se dispone de un termopar que indica la temperatura de los humos antes de entrar al primer paso y es la que se presenta en los resultados como “temperatura paso 1”. Además existen otras tres medidas de temperaturas coincidiendo con la entrada de los humos al segundo paso (temperatura paso 2), al tercer paso (temperatura paso 3) y a la salida de la caldera (temperatura humos) (

Figura 6).

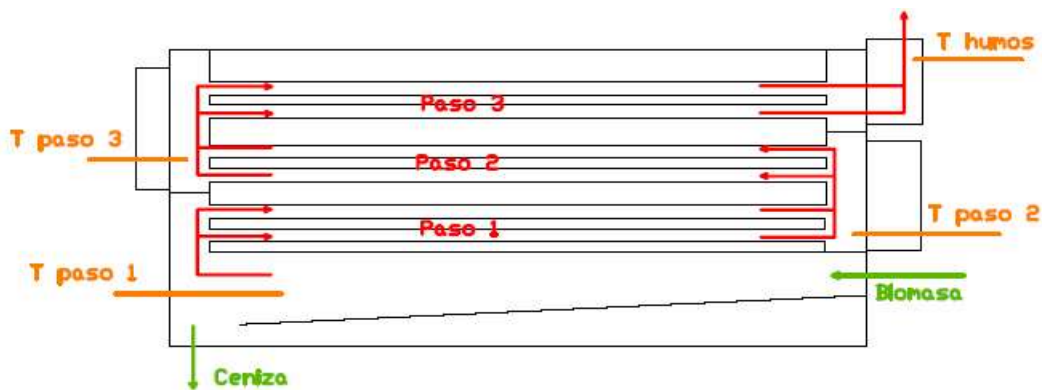


Figura 6: Puntos de medida de la temperatura de los gases de combustión en la caldera.

La caldera está dotada de un sistema de soplado de los tubos mediante aire comprimido que se acciona con una frecuencia definida, para limpiar la ceniza depositada en el intercambiador de calor. Los gases de salida de esta caldera pasan por un multiciclón cuya finalidad es la de separar las partículas más gruesas presentes en el gas (cenizas volantes) y así evitar que sean evacuadas por la chimenea.

El tiro de la caldera viene establecido por un lazo de control que mantiene una consigna de depresión dentro del hogar variando la velocidad del extractor de humos.

Existe un sistema de control centralizado que permite medir y registrar en continuo los flujos de biomasa, aire, calor transferido, temperaturas y presiones.

4.1.1 METODOLOGÍA DE ENSAYOS

Se han llevado a cabo los ensayos en dos bloques: una primera fase en la que se ha estudiado la influencia de la humedad sobre las emisiones y una segunda fase en la que se ha analizado la influencia de la presencia de finos sobre el comportamiento en la combustión.

Para los ensayos realizados en la caldera se ha establecido una duración total aproximada de 8 horas, de las cuáles 6 horas son en estado estacionario trabajando en condiciones próximas a la potencia nominal de la caldera, para lo cual es preciso ajustar la velocidad de alimentación del combustible. Se dispone de un lazo de control que actúa sobre la alimentación del combustible de la planta para conseguir una concentración de O_2 en chimenea determinada.

Se considera alcanzado el estado estacionario, cuando se estabilizan las temperaturas en el horno y la salida de gases, y se obtiene un oxígeno a la salida también estable. Se presentan en este trabajo los parámetros registrados en las seis horas de ensayo tras alcanzar el estado estacionario, como media de todo el período. Además, se ha dividido el período estacionario de cada ensayo en varios tramos, en los que se ha trabajado a una concentración de O_2 distinta en chimenea, con el fin de identificar además las condiciones de operación que generan las mejores emisiones y rendimiento posibles con cada combustible. La medición de la concentración de partículas en los gases de combustión siempre se ha realizado dentro del estado estacionario, y en el tramo más desfavorable entre los probados.

La cantidad de aire de combustión óptima, así como el ciclo de funcionamiento de la parrilla y la proporción de aire primario y secundario, se elige en base a experiencias previas de combustión de otros combustibles similares en esta misma caldera. Además, se han intentado optimizar estos parámetros durante las dos primeras horas de operación en cada ensayo, en función de la situación del combustible en la parrilla y de la salida de cenizas en continuo.

Las variables de proceso registradas en los ensayos de combustión han sido: el flujo de combustible, la temperatura de entrada del aire primario, la temperatura del agua en la ida y en el retorno de la caldera, el caudal de agua de circulación, la temperatura en la chimenea y en los distintos puntos del interior de la caldera, la depresión en el hogar, el caudal de aire primario y secundario de combustión y las emisiones en chimenea.

Se ha tomado como criterio trabajar con el 100% de los datos registrados por los sistemas de análisis de gases en el período estacionario, y expresar las emisiones medidas en mg/Nm^3 referenciados a un contenido de O_2 del 10% en los gases de salida. Por otro lado, se han expresado las emisiones como g/GJ , que es un factor de emisión de cada compuesto, expresado como su masa por cada unidad energética de combustible que entra en la caldera. La unidad g/GJ es de uso habitual en aplicaciones de medida de inmisión (calidad de aire), no en emisiones de focos (chimeneas) y se utiliza para el cálculo de los inventarios de emisiones. Además, en este caso, se ha decidido aplicar esta unidad, debido al diferente contenido energético de los combustibles de la primera fase de ensayo (por su distinta humedad), con la idea de normalizar las concentraciones de los distintos compuestos con la energía del combustible. No obstante, las tendencias observadas en ambas unidades son idénticas, como se verá más adelante, en los resultados de los ensayos de combustión (apartados 6.1 y 6.2).

Con respecto a los óxidos de nitrógeno, la concentración de NO_x siempre se expresa como dióxido de nitrógeno (NO₂) tal como recogen la legislación sobre emisiones (Directivas 2010/75/UE y 2015/2193) o normalización de calderas (EN 303-5).

4.1.2 RECOGIDA DE CENIZAS

El muestreo de cenizas tras el ensayo se realiza de forma rigurosa. Se recoge la ceniza de cada caja de humos (3 cajas) y se limpia el interior de los tubos de la caldera utilizando un cepillo metálico, recogiéndose muestras individuales de los tres pasos de humos (paso 1, paso 2 y paso 3) (

Figura 6), con lo que se puede evaluar la deposición en el interior de la caldera. Estas seis muestras, una vez pesadas, se han unido para configurar la muestra de ceniza depositada en la zona de intercambio, ya que todas ellas conforman la ceniza depositada en la zona de convección de la caldera.

Una vez limpios los tubos, se procede al muestreo de la ceniza obtenida en la parrilla, mediante los sinfines que constituyen el sistema de extracción de cenizas en continuo. Además, se extrae la ceniza que ha caído a través de las pequeñas ranuras y orificios de entrada del aire primario, después del apagado fundamentalmente (muestra: bajo parrilla). Por último, se recoge la ceniza retenida en el multiciclón.

Cuando es necesaria la reducción del peso de alguna muestra original para obtener la muestra analítica del laboratorio, se procede mediante cuarteos consecutivos del material en el laboratorio del CEDER-CIEMAT.

Cuando se hace referencia a la ceniza emitida por chimenea los datos se han obtenido de los filtros recogidos mediante procedimiento isocinético durante el período estacionario del ensayo.

4.2 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO

Se presenta la eficiencia de la combustión como la relación expresada porcentualmente, entre la potencia calorífica útil en la caldera en cada ensayo y la cantidad total de energía utilizada por la caldera en base al combustible alimentado y su poder calorífico inferior a la humedad de trabajo en cada caso.

$$\eta = \frac{Q \cdot C_p \cdot \Delta T}{m \cdot PCI_x} \times 100$$

Donde:

Q es el caudal de agua, expresado en kg/h;

C_p es la capacidad calorífica del agua a la temperatura media entre T_{salida} y T_{entrada}, expresada en kJ/kg/K;

ΔT es la diferencia entre T_{salida} y T_{entrada} , expresada en K;

m es la alimentación media de combustible en cada ensayo, expresada en kg/h;

PCI_x poder calorífico inferior a presión constante con humedad X del combustible, en kJ/kg.

5 EMISIONES EN COMBUSTIÓN DE BIOMASA

5.1 SISTEMA DE ANÁLISIS DE GASES Y PARTÍCULAS

La instalación piloto de combustión de 500 kW_t está dotada de varios sistemas fijos de medida de emisiones y al mismo tiempo existe la posibilidad de realizar muestreos con diversos equipos portátiles (entre ellos, una sonda isocinética para muestreo de partículas). Las tomas de muestras para los análisis de gases en continuo y de partículas en muestreos discontinuos están ubicadas después del multiciclón.

A continuación, se describen los sistemas de análisis utilizados en los ensayos.

Sistema fijo de análisis de gases en continuo

Es un sistema automático de medida extractivo para emisiones, que consta de:

A.- Sistema de muestreo, formado por sonda de toma de muestra, sistema de medición de velocidad de flujo, bomba de aspiración y línea de muestreo calentada.

B.- Sistema de cuantificación, compuesto de cinco analizadores multicomponente que permiten determinar, mediante distintas técnicas analíticas, la concentración de los siguientes gases: O₂, CO₂, CO, NO, SO₂ y COT.

En la

GAS	ANALIZADOR	RANGO
Monóxido de carbono (CO)	Infrarrojo (NDIR) (nº1)	0-1875 / 0-6.250 mg/m ³
Dióxido de carbono (CO ₂)	Infrarrojo (NDIR) (nº1)	0-25% Vol.
Óxido de nitrógeno (NO)	Infrarrojo (NDIR) (nº2)	0-400 / 0-1.000 mg/m ³
Dióxido de azufre (SO ₂)	Infrarrojo (NDIR) (nº2)	0-430 / 0-1.500 mg/m ³
Oxígeno (O ₂)	Paramagnético (nº3)	0-21 % Vol.
Compuestos orgánicos totales (COT)	Ionización de llama (FID) (nº4)	0-5.360 mg/m ³
Dióxido de azufre (SO ₂)	Ultravioleta (nº5)	0-500 mg/m ³

Tabla 7 se recogen los métodos de análisis y rangos para cada uno de los gases señalados, indicándose dos rangos en los analizadores para los que están disponibles.

Tabla 7: Métodos de análisis y rangos de los distintos analizadores.

El FID es un analizador en caliente que utiliza H₂ como combustible y aire comprimido como comburente, para realizar la combustión completa de los compuestos orgánicos totales contenidos en la muestra de gas. Por tanto, una parte de la muestra de gas bruta, una vez filtrada, entra en este analizador para la determinación de COT.

El resto de analizadores, determinan los gases en la muestra fría y seca, por lo que, a continuación, el resto de gas se deriva a un sistema de acondicionamiento de la muestra, cuyo equipo principal es un enfriador, en el que se condensa el agua contenida en la muestra y se añade un reactivo para la fijación del SO₂ contenido en el gas. Además, se dispone de un convertidor catalítico para la conversión de NO₂ a NO, de manera que, los NO_x presentes en el gas de muestra, se analizan como NO.

El conjunto cumple la garantía de calidad de la fase NGC1 exigida dentro de la norma UNE-EN14181.

Sistema discontinuo de medición de la concentración de partículas en los gases de combustión

Se ha determinado la concentración de partículas emitida por chimenea mediante el método gravimétrico. De este modo, se han realizado tres muestreos isocinéticos para cada una de las biomásas ensayadas en la caldera. En estos muestreos se ha utilizado un sistema formado por:

- A. Una sonda compuesta por una boquilla, un porta filtros y un Pitot.
- B. Un tren de muestreo formado por cuatro borboteadores conectados en serie.
- C. Una unidad de bombeo incorporada en la unidad de control.

En este tipo de muestreos se introduce un filtro, previamente pesado, en el porta filtros correspondiente. Durante el muestreo, se mide la velocidad de los gases en la chimenea, mediante el Pitot integrado en la sonda y la propia bomba va realizando el ajuste de la velocidad de succión, de manera que el muestreo se produzca isocinéticamente. Una vez finalizado el muestreo, se pesa de nuevo el filtro, calculándose así la cantidad de partículas recogida. Por otro lado, el equipo tiene un contador de volumen de gas extraído, por lo que puede conocerse la concentración de partículas en los gases de combustión. El filtro antes y después del muestreo es sometido a un secado a 160°C y posterior estabilización térmica en desecador, según la UNE-EN 13284-2 y la UNE-ISO 9096.

5.2 CÁLCULO DE LOS FACTORES DE EMISIÓN DE LOS GASES DE LA COMBUSTIÓN

Los factores de emisión representan la masa de contaminante (CO₂, NO_x, SO₂, N₂O, partículas, etc.) emitido a la atmósfera por energía contenida en el combustible alimentado. A cada ensayo corresponden unos factores de emisión, para cada uno de los compuestos gaseosos y las partículas, calculado mediante las siguientes expresiones:

$$FE_i = \frac{C_i \cdot H}{1000 \cdot E}$$

Donde:

FE_i es el factor de emisión del compuesto i , expresado en g/GJ, siendo $i = \text{CO}, \text{SO}_2, \text{NO}_x, \text{COT}$ y partículas;

C_i es la concentración del compuesto i en el gas, expresado en mg/Nm³;

H es el caudal de gas, expresado en Nm³/h;

$$H = (v \times S \times 3600) \times \frac{P}{T} \times \frac{273,15}{1}$$

Donde:

v es la velocidad del gas, en m/s;

S es la sección de la chimenea, expresada en m²;

P es la presión del gas, en atm;

T es la temperatura del gas, en K.

E es la energía del combustible, expresada en GJ/h.

$$E = \frac{m \times PCI_x}{1000000}$$

Donde:

m es el combustible alimentado, expresado en kg/h;

PCI_x es el poder calorífico inferior del combustible a la humedad X , expresado en kJ/kg.

6 COMBUSTION DE ASTILLAS DE PINO

6.1 EFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL COMBUSTIBLE

Siguiendo el procedimiento incluido en el apartado 4.1.1 y utilizando los combustibles que se describen en el apartado 3.1, se han llevado a cabo los siguientes ensayos de combustión:

- Ensayo de combustión de astilla seca.
- Ensayo de combustión de astilla semihúmeda.
- Ensayo de combustión de astilla húmeda 1 (53% de humedad).
- Ensayo de combustión de astilla húmeda 2 (44,4% de humedad).

6.1.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

En la

Tabla 8 se muestran las condiciones de operación del estado estacionario en que se llevaron a cabo

PARÁMETRO	SECA	SEMIHÚMEDA	HÚMEDA 1	HÚMEDA 2
Humedad de la biomasa (% b,h,)	21,1	31,3	53,0	44,4
Duración total (h)	7,8	7,8	3,4	6,9
Período estacionario (h)	6,0	6,0	-	5,6
Flujo másico de combustible (kg/h)	104,7	121,7	85,5 (*)	145,8
Flujo de aire (Nm ³ /h)	685,0	668,0	668,0	670,0
Aire primario respecto al aire total (%)	46,3	45,9	46,7	46,2
Exceso aire de la combustión (%)	63,0	59,0	231,0	64,0
Potencia térmica salida (kW)	367,0	365,0	93 (*)	329,0
Eficiencia (%)	87,2	88,0	51,4 (*)	85,7
T ambiente (°C)	18,2	18,2	14,2	15,3
P ambiente (atm)	0,89	0,9	0,9	0,9

los ensayos de combustión de la primera fase.

Tabla 8: Condiciones de operación del estado estacionario de los ensayos de la primera fase.

(*): Durante el ensayo con astilla húmeda 1 (53% de humedad), tratando de conseguir una combustión adecuada y que aumentara la temperatura para ver si se conseguía mantener la combustión con dicha astilla, se añadió a intervalos de tiempo una cantidad de otra biomasa leñosa. Esta cantidad no está incluida en el consumo de combustible indicado en la

Tabla 8.

A continuación, se muestra la evolución de las temperaturas en la caldera durante cada ensayo (Figura 7, Figura 8, Figura 9 y Figura 10). En estos gráficos aparecen delimitados los tramos de trabajo en los que el O₂ medio ha sido diferente, persiguiendo encontrar las mejores condiciones de trabajo con cada combustible.

En general, en todas las gráficas, excepto en la del ensayo de la astilla húmeda 1 (Figura 9), se puede ver una elevada estabilidad de las temperaturas, con las fluctuaciones propias causadas por el movimiento de la parrilla, especialmente en la entrada del paso 1 (punto en el que el movimiento de la parrilla tiene una mayor influencia por su proximidad a la llama).

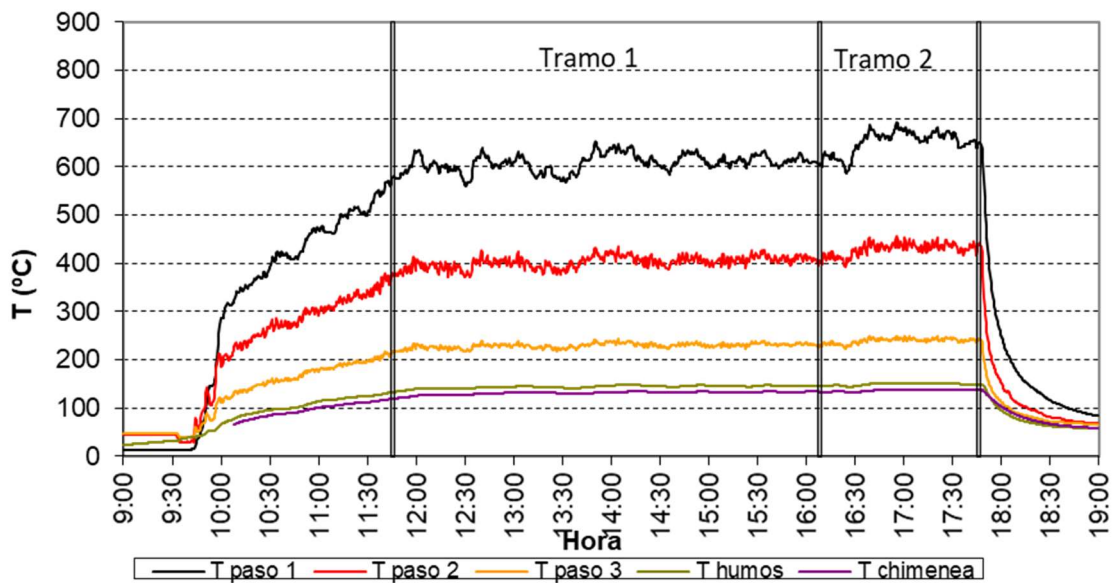


Figura 7: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino seca.

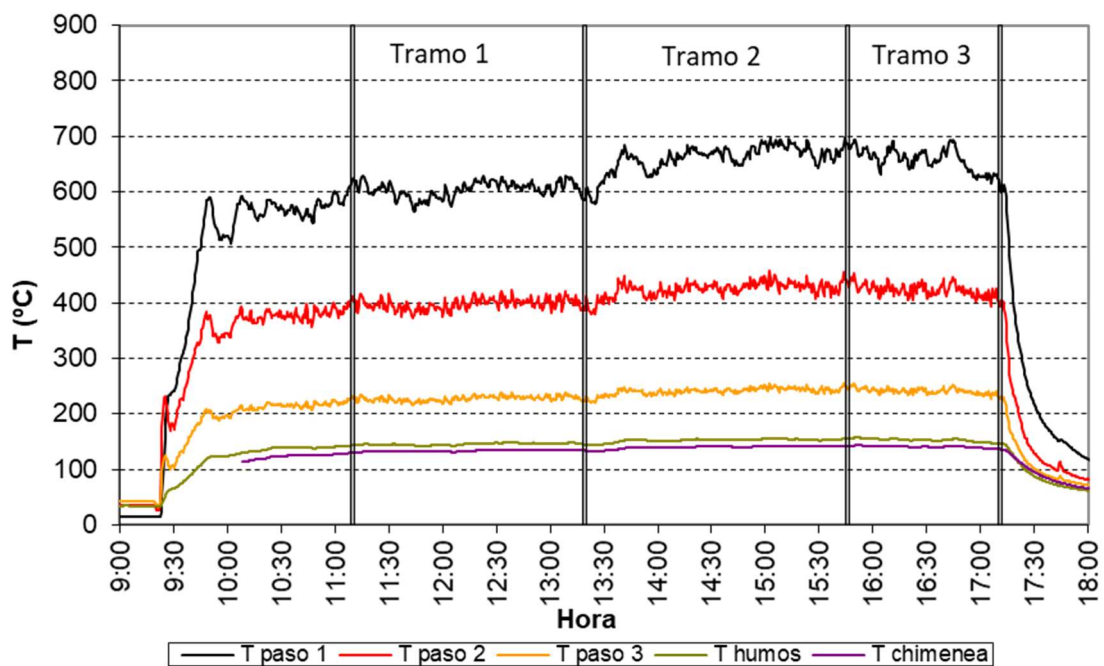


Figura 8: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino semihúmeda.

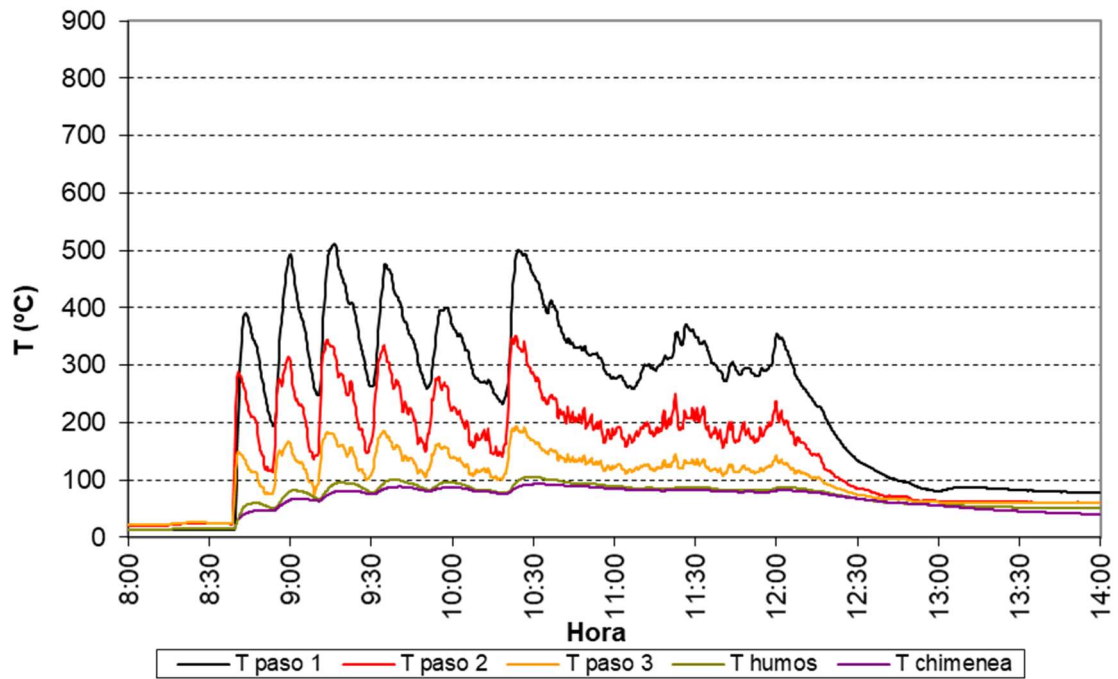


Figura 9: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino húmeda 1.

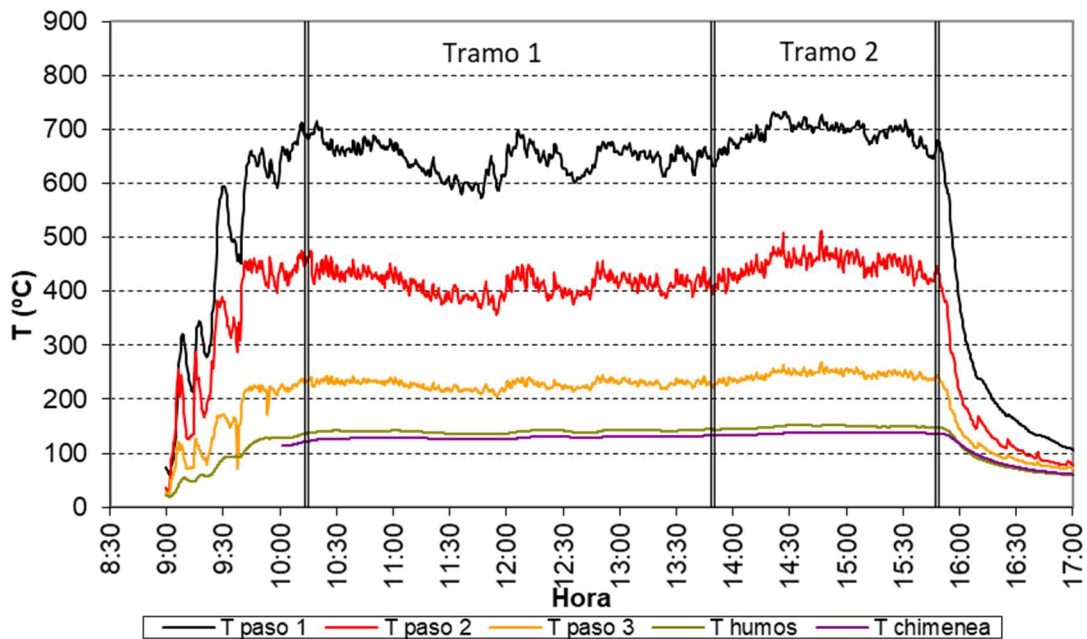


Figura 10: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino húmeda 2.

El ensayo correspondiente a la astilla húmeda 1 se mantuvo hasta 4 horas, pero sin ningún éxito. Para iniciar la combustión fue necesario introducir otro combustible de apoyo (biomasa residual seca) a intervalos durante dos horas. La combustión en las otras dos horas de operación no era

estable (tan sólo se alcanzaron 300°C en el paso 1) y los niveles de emisión de inquemados tan elevados, que el operador consideró no continuar. Se registraron valores continuados de CO superiores a 20.000 mg/Nm³ al 10% de O₂ de referencia y concentraciones elevadísimas de compuestos orgánicos (COT) en torno a 1.000 mg C/Nm³.

En la Tabla 9 se muestra la media de las temperaturas más importantes durante los 3 ensayos válidos (no descartando como tal el de la astilla húmeda 1), incluyendo la media del estado estacionario y la de cada tramo de operación considerado, en cada caso. Se observa que en los tres días de ensayo las temperaturas son del mismo orden, observándose diferencias entre los distintos tramos al trabajarse con distinta potencia y distinto contenido en O₂.

ASTILLA	TRAMO	T _{PASO 1}	T _{PASO2}	T _{PASO3}	T _{HUMOS}	T _{CHIMENEA}	T _{AMB}
SECA	Tramo 1	609	402	229	144	131	17,8
SECA	Tramo 2	652	429	240	149	136	19,0
SECA	Estacionario	620	410	232	145	133	18,2
SEMIHÚMEDA	Tramo 1	604	398	227	145	133	17,5
SEMIHÚMEDA	Tramo 2	660	424	241	152	140	18,6
SEMIHÚMEDA	Tramo 3	658	423	241	153	141	18,8
SEMIHÚMEDA	Estacionario	640	414	236	150	137	18,2
HÚMEDA 2	Tramo 1	646	414	228	140	129	14,6
HÚMEDA 2	Tramo 2	692	449	245	149	137	16,6
HÚMEDA 2	Estacionario	662	426	234	143	132	15,3

Tabla 9: Valores medios de las temperaturas más importantes durante los ensayos de combustión de la primera fase (estado estacionario y por tramos) (°C).

6.1.2 EMISIONES A LA ATMÓSFERA

En la Tabla 10 se muestran las concentraciones de H₂O, O₂, CO₂, CO, NO_x, SO₂, COT (compuestos orgánicos totales) y PST (partículas sólidas totales) emitidos durante los ensayos de la primera fase, expresados como media global de todo el estado estacionario y por tramos de condiciones de operación.

En la Tabla 10 se han expresado las emisiones en mg/Nm³, considerando que el contenido energético del combustible a la entrada de la caldera ha sido diferente en cada caso, debido a su distinto contenido en humedad.

ASTILLA	TRAMO	H ₂ O(%), b.h.	O ₂ (%), b.s.	CO ₂ (%), b.s.	CO ⁽¹⁾	NO _x ⁽¹⁾⁽²⁾	SO ₂ ⁽¹⁾	COT ⁽¹⁾⁽³⁾	PST ⁽¹⁾
SECA	Tramo 1	10,7	10,6	9,5	1.559	99	32	100	35
SECA	Tramo 2	10,7	9,8	10,3	1.529	98	31	83	nd
SECA	Estacionario	10,7	10,4	9,7	1.552	98	32	97	nd
SEMIHÚMEDA	Tramo 1	13,0	10,8	9,4	1.781	113	27	109	41
SEMIHÚMEDA	Tramo 2	14,0	9,6	10,5	1.854	113	31	136	nd
SEMIHÚMEDA	Tramo 3	13,7	9,8	10,3	1.726	114	35	115	nd
SEMIHÚMEDA	Estacionario	13,6	10,1	10,0	1.798	113	30	121	nd
HÚMEDA 2	Tramo 1	16,1	10,8	9,3	1.793	132	21	77	82
HÚMEDA 2	Tramo 2	16,6	9,6	10,5	982	136	21	35	nd
HÚMEDA 2	Estacionario	16,3	10,4	9,7	1.504	134	21	62	nd

Tabla 10: Valores medios de las emisiones durante los ensayos de combustión de la primera fase (estado estacionario y por tramos) (en % y mg/Nm³).

b.h.: expresados en base húmeda; b.s.: expresados en base seca.

⁽¹⁾: expresados en mg/Nm³ en b.s. al 10% de O₂ de referencia; ⁽²⁾: suma de NO y NO₂, expresado como NO₂; ⁽³⁾: expresados como C.

nd: no disponible dado que no se han podido hacer muestreos isocinéticos en todos los tramos.

Se observa un incremento claro en la humedad de los humos a medida que se produce un aumento en la humedad del combustible (desde 10,7% en la astilla seca a 16,3% en la astilla húmeda 2), lo que es lógico, ya que la humedad presente en los humos procede de la evaporación del contenido de humedad del combustible y de la oxidación del hidrógeno de la astilla para formar agua durante el proceso de combustión.

En general, se ha trabajado con un O₂ seco en humos próximo al 10% en todos los casos, siendo esa también la concentración de oxígeno que se da como referencia.

En cuanto a las emisiones de CO, se obtienen unos valores muy similares en los tres ensayos (entre 1.500 y 1.800 mg/Nm³). Las concentraciones de CO y de COT están muy relacionadas entre sí, puesto que se trata de productos de combustión incompleta, de este modo cuando el CO ha sido mayor, también lo han sido los COT.

Los valores de concentración del SO₂ y de los NO_x son reducidos. En el caso del SO₂ son prácticamente iguales en todos los casos ya que dependen en gran medida del contenido en azufre del combustible que es muy bajo; mientras que en la formación de NO_x, muy compleja, además de la presencia de nitrógeno en el combustible entran en juego otras variables entre las que se encuentran la temperatura, la presencia de radicales libre de carbono y la concentración de CO en cada momento, lo que origina que la concentración de NO_x aumente con la humedad de la astilla.

Por último, en el caso de las partículas totales (PST), se observa un valor muy similar para la astilla seca y para la semihúmeda (35 y 41 mg/Nm³), mientras que se produce un incremento en el caso de las astilla húmeda debido a su peor combustión (82 mg/Nm³).

En la Figura 11 se pueden ver los filtros obtenidos en los muestreos discontinuos durante los tres ensayos de combustión. La combustión de madera de coníferas como el pino produce hollines finos que se arrastran fácilmente en la cámara de combustión y que sobrepasa los sistemas de depuración de humo de tipo inercial o ciclónico, por lo que se encuentran filtros de color muy oscuro, más incluso en la combustión de astillas secas que húmedas.

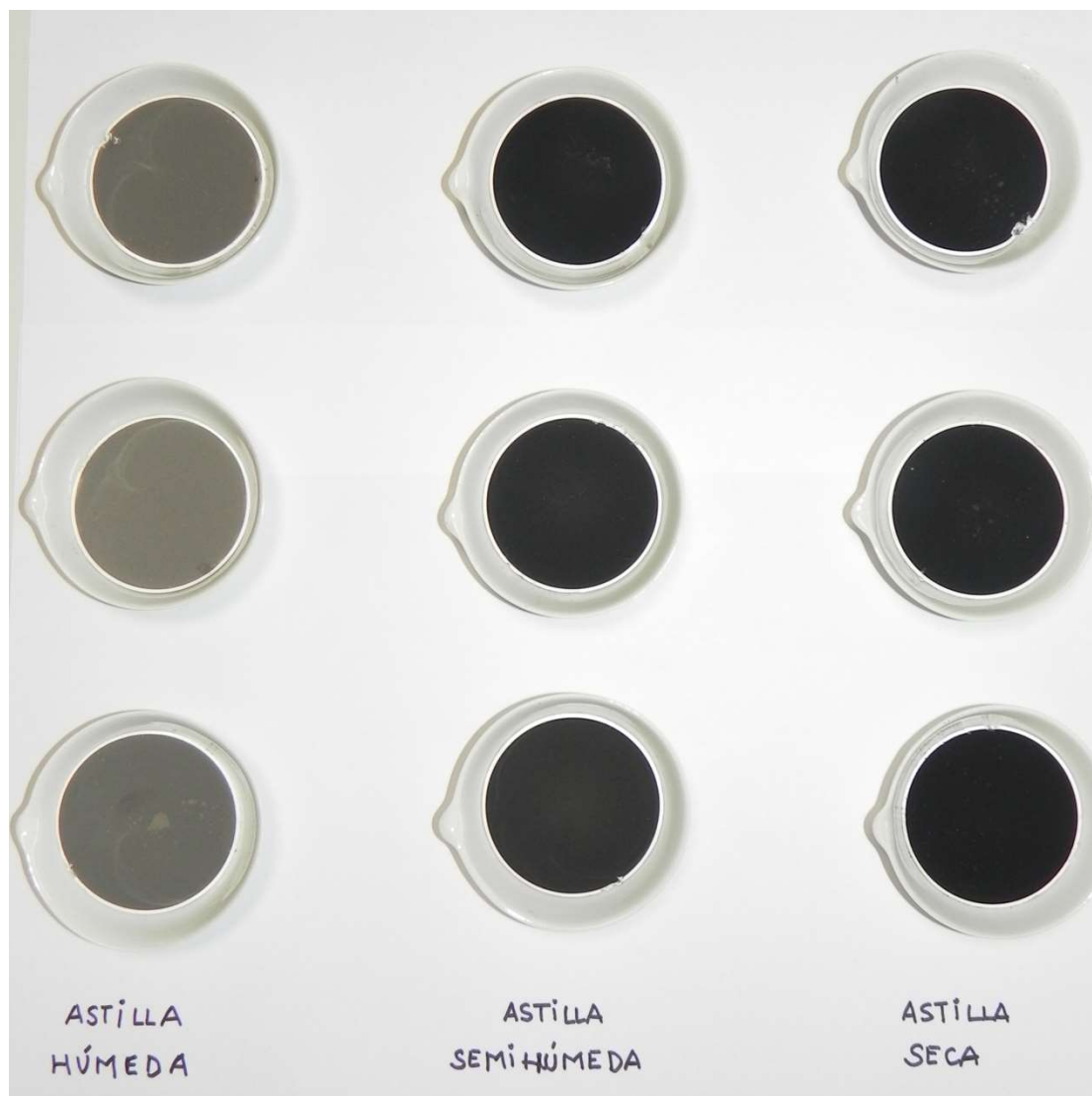


Figura 11: Imagen de los filtros de los muestreos discontinuos de partículas durante los ensayos de combustión de la primera fase.

6.1.3 EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

Se presenta en la

Tabla 11 la eficiencia de la combustión, calculada según el apartado 3.2 en cada uno de los tramos separados en cada ensayo. En el estado estacionario resulta un valor promediado no tan comparable, y ya se presentaba en la tabla resumen de los ensayos de cada fase.

ASTILLA	TRAMO	POTENCIA (kW)	EFICIENCIA (%)
SECA	Tramo 1	354,7	86,1
SECA	Tramo2	399,6	89,9
SEMIHÚMEDA	Tramo 1	334,4	85,5
SEMIHÚMEDA	Tramo2	380,9	87,3
SEMIHÚMEDA	Tramo 3	384,7	92,7
HÚMEDA 2	Tramo 1	314,5	85,1
HÚMEDA 2	Tramo2	355,4	86,7

Tabla 11: Valores de eficiencia durante los ensayos de combustión de la primera fase (por tramos).

6.1.4 ESTUDIO DE CENIZAS

Tras finalizar los ensayos de combustión de la primera fase, se procedió a la limpieza de la caldera y al muestreo de ceniza de las distintas partes de la instalación, tal como se describe en el apartado 4.1.2.

En una primera evaluación visual, se puede destacar la escasa aglomeración de la ceniza sobre la parrilla, el reducido ensuciamiento de los tubos y la ausencia de sinterización de las partículas del interior de los tubos. Además, no se aprecia una elevada cantidad de ceniza en ninguna ubicación.

Se ha determinado la humedad y el contenido en inquemados de las muestras de ceniza recogida en la parrilla, en la zona de intercambio de calor y en el ciclón. En la Tabla 12 se muestran los valores obtenidos.

LOCALIZACIÓN	HUMEDAD (%)	INQUEMADOS (%)
PARRILLA	0,1	6,3
INTERCAMBIADOR	0,8	23,8
CICLÓN	15	20,3

Tabla 12: Contenido en humedad e inquemados de la ceniza tras la primera fase de ensayos.

Los porcentajes de humedad presentes en las muestras de ceniza del interior de la caldera son prácticamente nulos, debido a la elevada temperatura que se registra en dichas ubicaciones. Sin embargo, la humedad en la muestra de ciclón es superior, como consecuencia de que el contenedor de dicha ceniza no se encuentra aislado y se producen condensaciones de la humedad de los humos en su pared interior.

Por otro lado, el contenido en inquemados encontrado en la muestra de parrilla es reducido (6,3%), lo que muestra que la astilla se ha quemado de forma adecuada. Si bien en las otras muestras

(intercambiador y ciclón) es superior. Esto se debe a que hay partículas que son arrastradas desde la parrilla hasta estas ubicaciones sin terminarse de quemar.

La cuantificación de la cantidad de ceniza depositada en cada punto de la instalación al finalizar todos los ensayos de la primera fase se muestra en la

Tabla 13. En esta tabla se presenta la cantidad de ceniza libre de humedad y de inquemados, teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 12.

De las cenizas recogidas, se encuentra que el 75,86% se quedan en la parrilla, el 7,03% son cenizas depositadas en la zona de intercambio de calor (suma de las cenizas de paso 1, paso 2, paso 3 y cajas de humos) y el 13,36% quedan retenidas en el ciclón. Las cenizas emitidas por chimenea, se han determinado a partir de los resultados de PST (Tabla 10) y constituyen el 3,75% del total.

LOCALIZACIÓN	CENIZA (kg y % respecto al total recogido)	CENIZA (g ceniza/ kg biomasa b.s.)
Parrilla	24,9 kg (75,9%)	13,06
Intercambiador	2,3 kg (7,0%)	1,21
Ciclón	4,4 kg (13,4%)	2,30
Chimenea	1,2 kg (3,7%)	0,65
TOTAL	32,8 kg (100%)	17,2

Tabla 13: Distribución de la ceniza recogida tras la primera fase de ensayos.

6.2 EFECTO DEL CONTENIDO EN FINOS DEL COMBUSTIBLE

Siguiendo el procedimiento incluido en el apartado 4.1.1 y utilizando la astilla seca con finos y cribada, recibida para la segunda fase, se han llevado a cabo los siguientes ensayos:

- Ensayo de combustión de astilla seca con finos.
- Ensayo de combustión de astilla seca cribada.

6.2.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

En la Tabla 14 se muestran las condiciones de operación en que se llevaron a cabo los ensayos de combustión de la segunda fase.

A continuación, se muestra la evolución de las temperaturas en la caldera durante los dos ensayos de la segunda fase (Figura 12 y Figura 13). En estos gráficos se muestran delimitados los tramos de trabajo en los que el O₂ medio ha sido diferente, con condiciones de operación.

PARÁMETRO	SECA CON FINOS	SECA CRIBADA
Humedad de la biomasa (% b.h.)	23,80	24,80
Duración total (h)	8,10	8,30
Período estacionario (h)	7,00	6,10
Flujo másico de combustible (kg/h)	102,70	98,20
Flujo de aire (Nm ³ /h)	645,00	656,00
Relación aire primario/secundario	46,80	47,10
Exceso aire de la combustión (%)	83,00	91,00
Potencia térmica salida (kW)	335,00	342,00
Eficiencia (%)	82,80	90,20
T ambiente (°C)	10,80	12,60
P ambiente (mbar)	0,86	0,86

Tabla 14: Condiciones de operación del estado estacionario de los ensayos de la segunda fase.

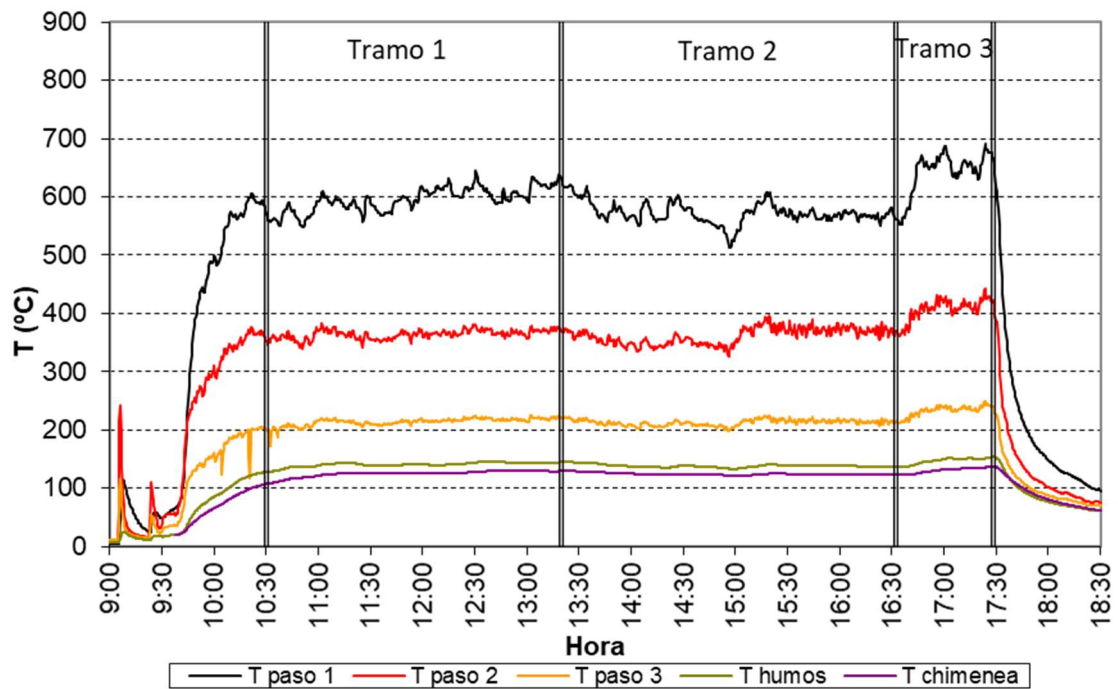


Figura 12: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino seca con finos de la segunda fase.

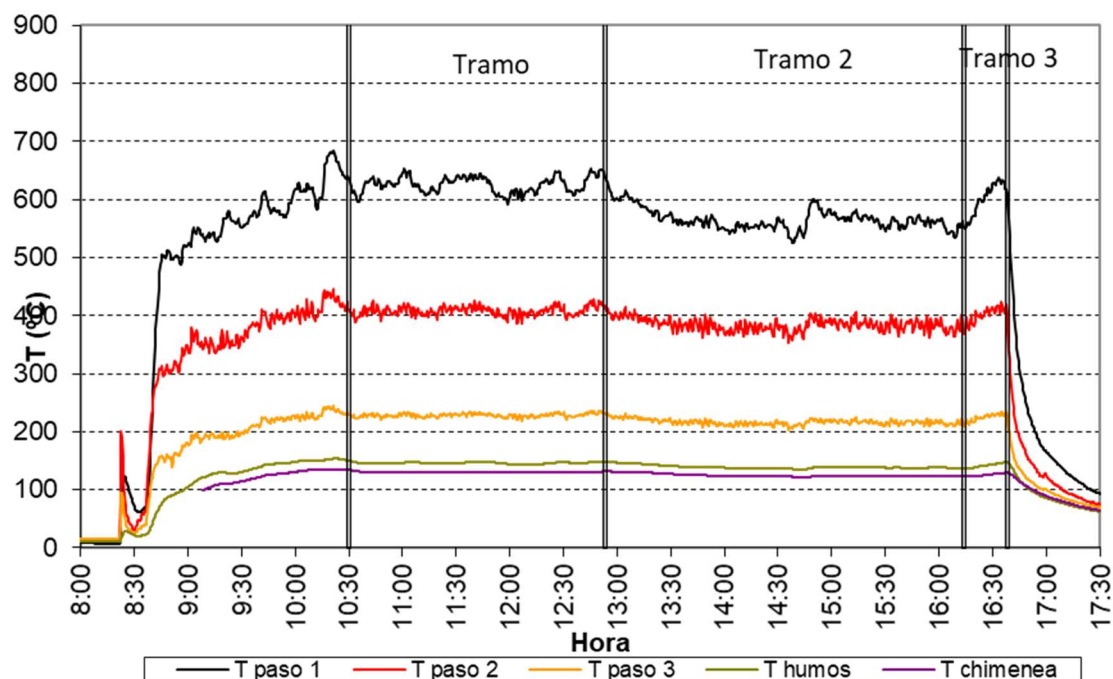


Figura 13: Temperaturas registradas en la caldera durante el ensayo de astilla de pino seca cribada de la segunda fase.

En general, las temperaturas son bastante estables, con mayores fluctuaciones en la entrada del paso 1, porque en este punto el movimiento de la parrilla tiene una gran influencia, como se ha indicado anteriormente.

En la Tabla 15 se muestra la media de las temperaturas de mayor relevancia durante los dos ensayos, incluyendo la media del estado estacionario y de cada tramo considerado. Se observa que las temperaturas son prácticamente iguales en ambos casos.

ASTILLA	TRAMO	T _{paso 1}	T _{paso2}	T _{paso3}	T _{humos}	T _{chimenea}	T _{amb}
SECA CON FINOS	Tramo 1	596	364	214	141	125	8,9
SECA CON FINOS	Tramo 2	573	362	213	138	124	11,9
SECA CON FINOS	Tramo 3	641	407	233	147	130	13,0
SECA CON FINOS	Estacionario	591	369	216	140	125	10,8
SECA CRIBADA	Tramo 1	626	408	228	146	130	10,7
SECA CRIBADA	Tramo 2	566	384	217	139	125	13,7
SECA CRIBADA	Tramo 3	601	402	225	142	125	14,6
SECA CRIBADA	Estacionario	592	385	222	142	127	12,6

Tabla 15: Valores medios de las temperaturas más importantes durante los ensayos de combustión de la segunda fase (estado estacionario y por tramos) (°C).

6.2.2 EMISIONES A LA ATMÓSFERA

En la Tabla 16 se muestran las concentraciones de H₂O, O₂, CO₂, CO, NO_x, SO₂, COT (compuestos orgánicos totales) y PST (partículas sólidas totales) emitidos, expresados como media global de todo

el estado estacionario y de los tramos con distintas condiciones de operación. Se han expresado las emisiones como mg/Nm³, respectivamente en estas tablas, con el fin de obtener un valor de las emisiones en la unidad regulada en la normativa y, por otro lado, para tener en cuenta el contenido energético del combustible, para poder comparar con los resultados de la primera fase (distintas humedades del combustible).

ASTILLA	TRAMO	H ₂ O (%), b.h.	O ₂ (%), b.s.	CO ₂ (%), b.s.	CO (1)	NO _x (1) (2)	SO ₂ ⁽¹⁾	COT (1) (3)	TSP ⁽¹⁾
SECA CON FINOS	Tramo 1	14,2	9,4	10,7	1.838	111	25	73	nd
SECA CON FINOS	Tramo 2	12,0	10,6	9,6	1.299	108	23	29	41
SECA CON FINOS	Tramo 3	13,9	8,7	11,3	1.348	103	25	78	nd
SECA CON FINOS	Estacionario	13,2	9,8	10,3	1.524	108	24	53	nd
SECA CRIBADA	Tramo 1	13,7	9,3	10,9	1.227	98	31	77	nd
SECA CRIBADA	Tramo 2	11,6	10,7	9,6	960	96	29	45	29
SECA CRIBADA	Tramo 3	12,5	9,8	10,4	1.121	95	27	65	nd
SECA CRIBADA	Estacionario	12,5	10,1	10,1	1.074	97	29	59	nd

Tabla 16: Valores medios de las emisiones durante los ensayos de combustión de la segunda fase (estado estacionario y por tramos) (en % y mg/Nm³).

b.h.: expresados en base húmeda.

b.s.: expresados en base seca.

⁽¹⁾: expresados en mg/Nm³ en b.s. referido al 10% de O₂ de referencia.

⁽²⁾: suma de NO y NO₂, expresado como NO₂.

⁽³⁾: expresados como C.

nd: no disponible dado que no se han podido hacer muestreos isocinéticos en todos los tramos.

En los dos ensayos se ha trabajado con un O₂ próximo a 10% de media del estado estacionario, al igual que en la primera fase de ensayos.

En cuanto a las emisiones de NO_x, SO₂ y COT son muy similares en los dos ensayos de la segunda fase e iguales a su vez a los obtenidos para la astilla seca durante la primera fase (Tabla 10 y Tabla 16).

Por otro lado, se observa que el valor de CO emitido durante la combustión de la astilla con finos es idéntico al CO obtenido en la combustión de la astilla seca de la primera fase (1.524 y 1.552 mg/Nm³, respectivamente) (esta astilla también tenía finos, dado que no había sido sometida a cribado). Sin embargo, se observa un claro descenso del CO, gas producto de la combustión incompleta, cuando se quema la astilla seca cribada (1.074 mg/Nm³).

Por último, en el caso de las partículas se observa un valor muy similar entre la astilla seca con finos de la segunda fase y las astillas seca y semihúmeda de la primera fase (41, 35 y 41 mg/Nm³, respectivamente). Sin embargo, al cribar la astilla se produce un claro descenso de las partículas emitidas, alcanzando un valor de 29 mg/Nm³ al 10% de O₂ de referencia.

En la Figura 14 se pueden ver los filtros de los muestreos discontinuos de partículas de los dos ensayos, característicos de la combustión de astilla seca.



Figura 14: Imagen de los filtros de los muestreos discontinuos de partículas durante los ensayos de combustión de la segunda fase.

6.2.3 EFICIENCIA DE LA COMBUSTIÓN

Se presenta en

Tabla 17 la eficiencia de la combustión, calculada según el apartado 4.2 en cada uno de los tramos separados en cada ensayo. En el estado estacionario resulta un valor promediado no tan comparable, y ya se presentaba en la tabla resumen de los ensayos de cada fase.

ASTILLA	TRAMO	POTENCIA (kW)	EFICIENCIA (%)
CON FINOS	Tramo 1	338,4	80,2
CON FINOS	Tramo 2	327,6	87,7
CON FINOS	Tramo 3	351,1	76,3
CRIBADA	Tramo 1	365,9	90,8
CRIBADA	Tramo 2	329,7	92,3

Tabla 17: Valores de eficiencia durante los ensayos de combustión de la segunda fase (por tramos).

6.2.4 ESTUDIO DE CENIZAS

Tras finalizar los ensayos de combustión de la segunda fase, se procedió a la limpieza de la caldera y al muestreo de ceniza de las distintas partes de la instalación, tal como se describe en el apartado 4.1.2.

En una primera evaluación visual, se puede destacar la escasa aglomeración de la ceniza sobre la parrilla, el reducido ensuciamiento de los tubos y la ausencia de sinterización de las partículas del interior de los tubos. Además, no se aprecia una elevada cantidad de ceniza en ninguna ubicación.

Se ha determinado la humedad y el contenido en inquemados de las muestras de ceniza recogida en la parrilla y en la zona de intercambio de calor. En la Tabla 18 se muestran los valores obtenidos.

LOCALIZACIÓN	HUMEDAD (%)	INQUEMADOS (%)
Parrilla	0,4	7,0
Intercambiador	0,9	35,5
Ciclón	34,0	26,1

Tabla 18: Contenido en humedad e inquemados de la ceniza tras la segunda fase de ensayos.

Los porcentajes de humedad presentes en las muestras de cenizas del interior de la caldera son casi nulos, debido a la temperatura registrada en las ubicaciones donde se recogen. Sin embargo, al igual que en la primera fase, la humedad de la ceniza del ciclón es mayor, como consecuencia de la condensación sobre la pared interior del depósito donde se recoge la cenizas. En esta ocasión (34%) es superior a la humedad de la primera fase (15%), seguramente debido a la menor temperatura ambiente registrada en el banco de ensayo (Tabla 9 y Tabla 15).

Por otro lado, el contenido en inquemados de la muestra de parrilla es reducido (7%), lo que muestra que la astilla se ha quemado de forma adecuada. Sin embargo, en las muestras de cenizas volantes (intercambiador y ciclón) este valor es mayor, lo que podría deberse al arrastre de partículas desde la parrilla hasta estas ubicaciones, sin terminarse de quemar.

La cuantificación de la cantidad de ceniza depositada en cada punto de la instalación al finalizar todos los ensayos de la primera fase se muestra en la Tabla 19. En esta tabla se presenta la cantidad de ceniza libre de humedad y de inquemados, teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 18.

LOCALIZACIÓN	CENIZA (kg y % respecto al total recogido)	CENIZA (g ceniza/kg biomasa b.s.)
Parrilla	8,2 kg (77,0%)	6,66
Intercambiador	0,6 kg (5,2%)	0,45
Ciclón	1,5 kg (13,8%)	1,20
Chimenea	0,42 kg (3,9%)	0,34
TOTAL	10,7 kg (100%)	8,65

Tabla 19: Distribución de la ceniza recogida tras la segunda fase de ensayos.

De las cenizas recogidas se encuentra que el 77,0% se quedaron en la parrilla, el 5,2% son cenizas depositadas en la zona de intercambio de calor (suma de las cenizas de paso 1, paso 2, paso 3 y cajas de humos) y el 13,8% son retenidas en el ciclón. Las cenizas emitidas por chimenea, determinadas a partir de los resultados de PST constituyen el 3,9% del total.

Atendiendo al total de biomasa quemada (1.635 kg, en base húmeda) y a los porcentajes de humedad y de cenizas de cada tipo de astilla (

Tabla 5), el total de ceniza introducido en el horno con la biomasa durante el ensayo ha sido de 11,5 kg. El total de ceniza recogida asciende a 10,7 kg, lo que representa el 96% respecto del total de ceniza introducida en la caldera durante el ensayo.

6.3 FACTORES DE EMISIÓN

Siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 5.3, se han calculado los factores de emisión para los diferentes contaminantes gaseosos analizados en cada uno de los ensayos. En la

Tabla 20 se muestran los valores obtenidos en cada caso, junto con los valores encontrados en la bibliografía [2] [6].

FE (g/GJ) (Calculados)						
CO	NO _x	SO ₂	COT	PM 2,5	PM 10	PST
ASTILLA SECA						
969	61	20	61	-	-	29
ASTILLA SEMIHÚMEDA						
1.212	76	20	82	-	-	34
ASTILLA HÚMEDA 2						
1.052	94	15	43	-	-	71
ASTILLA SECA CON FINOS						
892	63	14	31	-	-	22
ASTILLA SECA CRIBADA						
620	56	17	34	-	-	16
FE (g/GJ) (Bibliográficos)						
CO	NO _x	SO ₂	COT	PM 2,5	PM 10	PST
435-576	91	11	-	98,5-160	100,5-163	105-170

Tabla 20: Factores de emisión de la combustión de las distintas astillas

7 SÍNTESIS DEL TRABAJO DESARROLLADO

- En cuanto a la calidad de los combustibles ensayados, en base a las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014, las astillas secas cribadas se clasifican en la máxima calidad, clase A1. Las astillas secas con finos y las astillas semihúmedas se clasifican con calidad A2. Las astillas húmedas sólo pueden clasificarse en la calidad B.
- Los lotes de astillas de pino han sido utilizados en los ensayos de combustión en una caldera de parrilla móvil para la que presentan propiedades adecuadas. El comportamiento durante los ensayos ha sido satisfactorio, alcanzando un régimen de combustión bueno. Solamente con las astillas húmedas 1 (con 53% de humedad) no ha sido posible llevar a cabo la combustión.
- Los niveles de emisión encontrados (Tabla 21) son acordes al tipo de caldera utilizada (posiblemente una clase inferior a 3 según la norma EN 303-5:2012, aunque el fabricante no indica su clasificación por estar fabricada anteriormente a 2012). Se detectan valores algo más elevados que los límites establecidos para la clase 3 en la norma EN 303-5 de las concentraciones de CO (1.200 mg/Nm³ en (1): límites de emisión estacional, expresados como mg/Nm³ a 10% O₂; (2): OGC, tal como recoge la norma, corresponde a las siglas inglesas de COT en español.

Tabla 26) y COT (80 mg/Nm³ en (1): límites de emisión estacional, expresados como mg/Nm³ a 10% O₂; (2): OGC, tal como recoge la norma, corresponde a las siglas inglesas de COT en español.

- Tabla 26), sin embargo las concentraciones de partículas son siempre inferiores al límite (150 mg/Nm³) por la presencia de un sistema multiciclónico en la salida de humos de la instalación. Se concluye que en esta caldera la calidad del combustible permite entrar en niveles de emisión de la clase 3, que se alcanzan con las astillas de mayor calidad A1.

FASE	COMBUSTIBLE	H ₂ O (%), b.h.	O ₂ (%), b.s.	CO ₂ (%), b.s.	CO (mg/Nm ³), b.s. (1)	NO _x (2) (mg/Nm ³), b.s. (1)	SO ₂ (mg/Nm ³), b.s. (1)	COT (3) (mg/Nm ³), b.s. (1)	PST (mg/Nm ³), b.s. (1)
1	Astilla húmeda	16,3	10,4	9,7	1.504	134	21	62	82
1	Astilla semihúmeda	13,6	10,1	10,0	1.798	113	30	121	41
1	Astilla seca	10,7	10,4	9,7	1.552	98	32	97	35
2	Astilla seca con finos	13,2	9,8	10,3	1.524	108	24	53	41
2	Astilla seca cribadas	12,5	10,1	10,1	1.074	97	29	59	29

Tabla 21: Emisiones medias en el periodo estacionario de los ensayos.

b.h.: expresados en base húmeda; b.s.: expresados en base seca. (1): referido a 10% de O₂ de referencia; (2): suma de NO y NO₂, expresado como NO₂; (3): expresado como C.

- La emisión de partículas (PST) se ve claramente influenciada por la calidad de las astillas: La humedad influye negativamente en la concentración de partículas emitidas, de forma

que las astillas húmedas de calidad más inferior (B) emiten más del doble que el resto de muestras (clasificadas en el grupo de propiedad A). La diferencia de la emisión entre astillas de humedades inferiores (M25 y M35) no es significativa.

- El cribado de las astillas permite alcanzar niveles de emisión de partículas (Tabla 21) acordes a los requisitos de Diseño Ecológico, aplicable a equipos de combustión de sólidos de potencia hasta 50 kW_t a partir de 2020. Sólo las astillas secas y cribadas, de calidad A1, han producido una emisión de partículas claramente inferior al de 40 mg/Nm³ establecido en las directrices de ecodiseño (Tabla 27).
- En sistemas de características similares a éste, se encuentra la necesidad de disponer de un sistema de retención de partículas, al menos un sistema ciclónico, para que las emisiones de partículas se encuentren en valores bajos como exigen las normativas más actuales.
- La concentración de NO_x encontrada en la emisión en todos los ensayos llevados a cabo es inferior a los límites establecidos en los requisitos de diseño ecológico. En general, no es un problema el control de las emisiones de óxidos de nitrógeno generadas en la combustión de astillas de madera natural como las ensayadas.
- Los factores de emisión encontrados para las emisiones gaseosas del combustible de calidad A1 (astillas secas y cribadas) son todos del mismo orden de magnitud que las encontradas en bibliografía. En compuestos como CO y COT, que dependen mucho de las condiciones de operación, el factor de emisión sube mucho utilizando combustibles de baja calidad.
- El Factor de emisión de partículas (PST) es, para cualquiera de los combustibles, siempre menor que los encontrados en bibliografía, teniendo en cuenta el uso de multiciclón como sistema secundario de retención de partículas.
- No han aparecido fenómenos asociados a la escorificación de cenizas en ningún caso, y el ensuciamiento del intercambiador de la caldera ha sido normal; no se ha detectado sinterización de cenizas en los tubos en los tiempos de operación llevados a cabo. En este sentido no se prevén problemas de operación asociados a las cenizas en la combustión.
- Las proporciones de cenizas encontradas en cada parte de la instalación en ambas fases es similar. Podemos decir que con estos combustibles aproximadamente el 75% de la ceniza producida se recoge en la parrilla y un 25% sale de la cámara de combustión para depositarse en las zonas frías de la caldera (intercambiadores, tubos, cajas de humos,...), sistemas de limpieza del gas (ciclón, multiciclón,..) o escapar por chimenea. El sistema de retención de partículas disponible ha atrapado en torno al 13% de la ceniza producida.

LOCALIZACIÓN	CANTIDAD DE CENIZA	
	1ª FASE	2ª FASE
PARRILLA	24,9 kg (75,3%)	8,2 kg (74,1%)
INTERCAMBIADOR	2,3 kg (7,0%)	0,6 kg (5,0%)
CICLÓN	4,4 kg (13,3%)	1,5 kg (13,3%)
CHIMENEA	1,5 kg (4,4%)	0,8 kg (7,6%)

Tabla 22: Cantidades de ceniza recogida al final de los ensayos de cada fase en las distintas partes de la instalación.

- A la vista de los filtros de partículas recogidas en la chimenea (Figura 11 y Figura 14), la formación de hollines es importante. Según los datos en cenizas, las volantes (de intercambiador, ciclón y chimenea) contienen hasta un 30% de inquemados, lo que tienen una incidencia en pérdida de eficiencia del sistema.
- Las eficiencias de la combustión calculadas muestran que también sobre la eficiencia es posible encontrar mejoras en base a la mejora de calidad de los combustibles. Así la mejor eficiencia corresponde a las astillas de calidad A1 (92,3%), seguida de la eficiencia alcanzada con las astillas de calidad A2 (85-88%).

FASE	COMBUSTIBLE	EFICIENCIA (%)
1	Astilla húmeda	85,1
1	Astilla semihúmeda	85,5
1	Astilla seca	86,1
2	Astilla seca con finos	87,7
2	Astilla seca cribada	92,3

Tabla 23: Eficiencia de la combustión para los diferentes combustibles usados en cada fase en tramos equivalentes del ensayo

8 ANEXO

Se recoge la normalización que permite seguir algunas explicaciones y conclusiones de este estudio. Se refieren a diferentes ámbitos:

1.- CALIDAD DEL COMBUSTIBLE

Con respecto a la calidad de biocombustibles sólidos en España es de aplicación la norma UNE-EN ISO 17225 Biocombustibles sólidos: Especificaciones y clases de combustibles. El objetivo de esta normalización es proporcionar principios claros e inequívocos de clasificación para los combustibles sólidos, que sirva de herramienta para permitir el comercio eficiente de los biocombustibles. Publicada por el comité internacional de normalización, dispone de 7 partes, algunas ya publicadas y otras que se encuentran en elaboración. En concreto la Parte 4 se refiere a clases de astillas de madera que provengan de las siguientes materias primas: (i) biomasa leñosa procedente del monte, plantación u otra madera virgen; (ii) subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera; (iii) madera usada, químicamente no tratada.

PROPIEDAD / MÉTODO DE ANÁLISIS	UNIDADES	A (1)	A (2)	B (1)	B (2)
Tamaño de partícula, P / ISO 17827-1	mm	Ver dimensiones en tabla siguiente	Ver dimensiones en tabla siguiente	Ver dimensiones en tabla siguiente	Ver dimensiones en tabla siguiente
Humedad, M / ISO 18134	% (m/m), según se recibe	M10≤10 M25≤25	M35≤35	A declarar el valor máximo	A declarar el valor máximo
Cenizas, A / ISO 18122	% (m/m), en base seca	A1,0≤1,0	A1,5≤1,5	A3,0≤3,0	A3,0≤3,1
Densidad a granel, DU / ISO 17831-1	Kg/m ³ , según se recibe	BD150≥150 BD200≥200 BD250≥250	BD150≥150 BD200≥200 BD250≥250 BD300≥300	A declarar el valor mínimo	A declarar el valor mínimo
Nitrógeno, N / ISO 16948	% (m/m), en base seca	No aplica	No aplica	N1,0≤1,0	N1,0≤1,1
Azufre, S / ISO 16994	% (m/m), en base seca	No aplica	No aplica	S0,1≤0,1	-
Cloro, Cl / ISO 16994	% (m/m), en base seca	No aplica	No aplica	Cl0,05≤0,05	-
Poder calorífico Q / ISO 18125	MJ/kg o kWh/kg, según se recibe	A declarar el valor mínimo	-	A declarar el valor mínimo	-

Tabla 24: Resumen de especificaciones de astillas de madera clasificadas dentro de la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014. Extraído de tabla 2 de la norma.

DIMENSIONES (mm), ISO 17827-1					
Fracción principal (mínimo 60%(m/m)), mm	Fracción principal (mínimo 60%(m/m)), mm	Fracción de finos ($\leq 3,15$ mm), %(m/m)	Fracción gruesa, %(m/m) (longitud de partícula en mm)	Longitud máxima de partículas, mm	Superficie máxima de la sección transversal, cm ²
P16S	3,15 mm < P < 16m m	<15%	<15% (>31,5 mm)	<45 mm	<2 cm ²
P31S	3,15	<10%	<15% (>45)	<150 mm	<4 cm ²
P45S	3,15 mm < P < 45m m	<10%	<15% (>63 mm)	<200 mm	<6 cm ²

Tabla 25: Resumen de dimensiones de astillas de madera clasificadas dentro de la norma UNE-EN ISO 17225-4:2014. Extraído de tabla 1 de la norma.

2.- EQUIPOS DE COMBUSTIÓN

Norma UNE-EN 303-5:2012 de calderas de calefacción. Parte 5: Calderas especiales para combustibles sólidos, de carga manual y automática y potencial útil nominal hasta 500 kW. Terminología, requisitos, ensayos y marcado. La tabla de emisiones contiene el requisito que debe satisfacer con la caldera funcionando a la potencia útil nominal y a la potencia mínima con el combustible seleccionado. Se indican las clases de la caldera en función de la concentración de cada compuesto en gases.

POTENCIA NOMINAL ÚTIL (kW)	CO ⁽¹⁾			OGC ⁽¹⁾⁽²⁾			Partículas ⁽¹⁾		
	3	4	5	3	4	5	3	4	5
≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	150	60	40
$>50 \leq 150$	2500	1000	500	80	30	20	150	60	40
$>150 \leq 500$	1200	1000	500	80	30	20	150	60	40

(1): límites de emisión estacional, expresados como mg/Nm³ a 10% O₂; (2): OGC, tal como recoge la norma, corresponde a las siglas inglesas de COT en español.

Tabla 26: Límites de emisión según UNE-EN 303-5:2012, para calderas automáticas que usan combustible biogénico en función de la clase de la caldera (3, 4, 5).

La versión anterior de la norma europea EN303-5:1999, establecía otras clases inferiores de aparatos (clases 1, 2), permitiéndose valores menos restrictivos en los límites de emisiones, que en la norma actual no se contemplan. Así la clase 2 en equipos de potencia útil nominal entre 150 y

300 kW de carga automática y con un combustible biogénico tenía establecidos límites de CO hasta 2.000 mg/Nm³, de OGC hasta 150 mg/Nm³ y de partículas hasta 180 mg/Nm³.

Reglamento (UE) 2015/1189 de la Comisión por el que se desarrolla la Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en relación con los requisitos de ecodiseño aplicables a las calderas de combustible sólido. En él se establecen los requisitos de diseño ecológico para comercializar y poner en funcionamiento calderas que utilizan combustible sólido con una potencia calorífica nominal igual o inferior a 500 kW; y que será de aplicación en toda la UE a partir del 1 de enero de 2020.

En este Reglamento se habla de variables estacionales, entendidas como tal aquellas calculadas como una media ponderada de los valores encontrados en la caldera a la potencia nominal de funcionamiento y a la potencia mínima, en base a las horas de funcionamiento de este tipo de instalaciones en cada potencia a lo largo del año. No obstante, en el estudio que nos ocupa solo han sido realizados ensayos a una potencia y cuando se comparan valores de emisiones de este Reglamento no se tiene en cuenta la definición estacional.

POTENCIA NOMINAL ÚTIL (kW)	EFICIENCIA ESTACIONAL (%)	CO ⁽¹⁾	OGC ⁽¹⁾⁽²⁾	PARTÍCULAS ⁽¹⁾	NOx ⁽¹⁾
< 20	75	500	20	40	200
>20	77	500	20	40	200

(1): límites de emisión estacional, expresados como mg/Nm³ a 10% O₂; (2): OGC, tal como recoge el Reglamento, corresponde a las siglas inglesas de COT en español.

Tabla 27: Límites estacionales de emisión según Reglamento de Ecodiseño, para calderas automáticas que usan biomasa sólida.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agencia Andaluza de la Energía. 2018. La bioenergía en Andalucía.
- [2] Darío R. Gómez, John D. Watterson, Branca B. Americano, Chia Ha, Gregg Marland, Emmanuel Matsika, Lemmy Nenge Namayanga, Balgis Osman-Elasha, John D. Kalenga Saka, Karen Treanton, Roberta Quadrelli. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006. Volumen 2. Capítulo 2.
- [3] De Lucas, A.I; del Peso, Carlos; Rodríguez, E; Prieto, P. Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. 2012.
- [4] E. Borjabad García, I. Mediavilla Ruiz, R. Ramos Casado, J.J. Rodríguez Maroto, D. Sanz Rivera. Identificación de los parámetros críticos de la combustión de biomasa: etapa de preparación del combustible, proceso de combustión y depuración de emisiones. 2019. Publisher: CIEMAT. ISSN: 1135-9420
- [5] Irish Bioenergy association. The role of Bioenergy in a Programme for Economic. Recovery through Sustainable Development. April 2020.
- [6] Jeroen Kuenen, Carlo Trozzi, Ole-Kenneth Nielsen, Marlene S. Plejdrup, Chris Dore, Malene Nielsen, Krystyna Kubica, Bostjan Paradiz, Panagiota Dilara, Zbigniew Klimont, Sergey Kakareka, B.Debsk, Mike Woodfield, Robert Stewart, Robert Whiting, Antoon Visschedijk. European Monitoring and evaluation programme (EMEP) / European Environment Agency (EEA). Air pollutant emission inventory guidebook 2019. Capítulo 1.A.4 Small combustion.
- [7] Margarita de Gregorio. Estudios sobre la economía española 2020/2021. Biomasa en España. Generación de valor añadido y análisis prospectivo.
- [8] Mediavilla I., Barro R., Borjabad E., Peña D., Fernández M.J. Quality of olive Stone as a fuel: Influence of oil content on combustion process. Renewable Energy. Vol. 160 (2020). Págs. 374-384.
- [9] Mediavilla I., Fernández M.J., Barro R., Borjabad E., Bados R., Esteban L.E. Effect of mechanical harvesting on the chemical composition and combustion behaviour of shrub biomass. Energy. Vol. 1204 (2020). Págs. 1-10.
- [10] Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030
- [11] Ramos, R; Borjabad, E; Mediavilla, I; Rodríguez-Maroto, J; Sanz, D; Rojas, E. Control de emisiones de partículas en equipos de combustión de biomasa. CIEMAT. Noviembre/ Diciembre 2015.
- [12] REGLAMENTO 2015/1189: Requisitos de ecodiseño para calderas.

- [13] Sanz, D; Rojas, E; Borjabad, E; Ramos, R; Escalada, R; Pascual, A; García, S; Rodríguez, J; García, S; Aragón, G; Gutiérrez-Cañas, C; Ibarra, I; Gómez, I; González, J; Gomar, S; Celades, I; Sanfélix, V. Informe de caracterización de las emisiones de contaminantes primarios. CLEANBIOM. Septiembre, 2017.
- [14] UNE-EN 13284-1:2018. Emisiones de fuentes estacionarias. Determinación de la concentración másica de partículas a bajo rango. Parte 2: Garantía de calidad de sistemas automáticos de medida.
- [15] UNE-ISO 9096:2005. Emisión de fuentes estacionarias. Determinación manual de la concentración másica de partículas.
- [16] UNE-EN ISO 17225-4:2014. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 4: Clases de astillas de madera.
- [17] UNE-EN 303-5:2013. Calderas de calefacción. Parte 5: Calderas especiales para combustibles sólidos, de carga manual y automática y potencial útil nominal hasta 500 kW. Terminología, requisitos, ensayos y marcado.
- [18] Vázquez, M., Hallack, M., Andreao, G., Tomelin, A., Botelho, F., Perez, Y., di Castelnuovo, M. 2018. Financiamiento de la transición a energía renovable en la Unión Europea, América Latina y el Caribe. Fundación EU-LAC.
- [19] <http://www.cesefor.com/noticias/espana-es-la-tercera-superficie-forestal-europea-pero-la-octava-en-aprovechamiento-de-la>