

Identificación de los  
parámetros críticos de la  
combustión de biomasa:  
etapa de preparación del  
combustible, proceso de  
combustión y depuración  
de emisiones

M<sup>a</sup> 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

M<sup>a</sup> E. Borjabad García  
I. Mediavilla Ruiz  
R. Ramos Casado  
J. J. Rodríguez Maroto  
D. Sanz Rivera

Publicación disponible en el [Catálogo general de publicaciones oficiales](#).

© CIEMAT, 2019

Depósito Legal: M-26385-2011

ISSN: 1135-9420

NIPO: 693-19-054-8

Maquetación y Publicación:

Editorial CIEMAT

Avda. Complutense, 40 28040-MADRID

Correo: [editorial@ciemat.es](mailto:editorial@ciemat.es)

[Novedades editoriales CIEMAT](#)

El CIEMAT no comparte necesariamente las opiniones y los juicios expuestos en este documento, cuya responsabilidad corresponde únicamente a los autores.

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Queda prohibida la reproducción total o parcial de cualquier parte de este libro por cualquier medio electrónico o mecánico, actual o futuro, sin autorización por escrito de la editorial.

## **IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS CRÍTICOS DE LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA: ETAPA DE PREPARACIÓN DEL COMBUSTIBLE, PROCESO DE COMBUSTIÓN Y DEPURACIÓN DE EMISIONES**

**Borjabad García, M<sup>a</sup> E.; Mediavilla Ruiz, I.; Ramos Casado, R.; Rodríguez Maroto, J. J.; Sanz Rivera, D.**

**37 pp, 17 referencias, 15 figuras, 21 tablas**

**Resumen:** En este informe se identifican los parámetros críticos que pueden influir en la combustión de biomasa, asociados a las distintas etapas del proceso: preparación del combustible, proceso de combustión y depuración de emisiones.

Así, en cuanto a los parámetros asociados a la biomasa y a su preparación, se puede destacar la propia disponibilidad de la biomasa y su caracterización físico-química (composición química, humedad, granulometría y densidad). Desde el punto de vista del proceso de combustión, tienen especial influencia el tipo de horno empleado, los parámetros de diseño y los ajustes realizados en los parámetros de operación. Finalmente, es fundamental la utilización de sistemas de depuración de gases para la eliminación de partículas, siendo los equipos más recomendados por su eficiencia los precipitadores electrostáticos y los filtros de mangas.

En el documento se muestran una serie de casos prácticos donde se puede ver la influencia de estos parámetros sobre las emisiones y la eficiencia del proceso de combustión.

## **IDENTIFICATION OF CRITICAL PARAMETERS OF BIOMASS COMBUSTION: BIOMASS PRETREATMENT, COMBUSTION PROCESS AND EMISSIONS DEPURATION STAGES** **AUTORES**

**37 pp, 17 references, 15 figures, 21 tables**

**Abstract:** Critical parameters with influence in biomass combustion, associated to the different stages of the process: biomass pretreatment, combustion process and emissions depuration, are identified in this report.

Regarding parameters associated to biomass and its pretreatment, biomass availability and physic-chemical characterization (chemical composition, moisture content, particle size distribution and density) could be remarked. From the point of view of the combustion process, the type of furnace, the design parameters and the adjustments of operating parameters could be highlighted. Finally, the utilization of depuration systems in exhaust gases for eliminating particles is essential. The most recommended devices are electrostatic precipitators and bag filters, due to their high efficiency.

In this document, several practical cases are included, where the influence of these parameters on emissions and efficiency of the combustion process is shown.

## AGRADECIMIENTOS



Este documento ha sido realizado en el marco del proyecto CLEANBIOM (“Estrategia integral para predecir, controlar y asegurar la sostenibilidad de la combustión de la biomasa residual, agrícola y forestal. Evaluación del efecto de parámetros relevantes sobre el proceso de combustión de biomasa y el control de emisiones de partículas sólidas y otros contaminantes relacionados”).

El proyecto CLEANBIOM, con referencia CTM 2013-49121-C3, ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los Retos de la Sociedad.



Algunos casos prácticos que se recogen en este documento han sido realizados en el marco del proyecto BIOMASUD PLUS “Desarrollo del mercado sostenible de los biocombustibles sólidos mediterráneos para uso doméstico”), financiado dentro del Programa de Investigación e Innovación H2020 de la Unión Europea, con número de acuerdo de subvención 691763.



Algunos casos prácticos que se recogen en este documento han sido realizados en el marco del proyecto LIFE ENERBIOSCRUB “Sustainable management of shrubs formations for energy purposes”, financiado dentro del Programa LIFE + de la Unión Europea, con número de acuerdo de subvención LIFE13 ENV/ES/000660.

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>PARÁMETROS CRÍTICOS ASOCIADOS A LA BIOMASA Y A SU PREPARACIÓN</b> .....	<b>3</b>
2.1.1	<i>DISPONIBILIDAD DE LA BIOMASA</i> .....	3
2.1.2	<i>CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA</i> .....	7
2.1.3	<i>HUMEDAD</i> .....	2
2.1.4	<i>GRANULOMETRÍA, PRESENCIA DE IMPROPIOS Y PROPORCIÓN DE FINOS</i> .....	4
2.1.5	<i>DENSIDAD</i> .....	5
<b>2.2</b>	<b>PARÁMETROS CRÍTICOS DURANTE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN</b> .....	<b>6</b>
2.2.1	<i>PARÁMETROS DE DISEÑO. TIPOS DE HORNOS</i> .....	8
2.2.2	<i>PARÁMETROS DE OPERACIÓN</i> .....	11
<b>2.3</b>	<b>PARÁMETROS CRÍTICOS EN LA DEPURACIÓN DE GASES</b> .....	<b>13</b>
2.3.1	<i>PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS</i> .....	14
2.3.2	<i>FILTROS DE FÁBRICA O TEXTILES</i> .....	15
<b>3</b>	<b>CASOS PRÁCTICOS</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>ASOCIADOS A LA BIOMASA Y A SU PREPARACIÓN</b> .....	<b>19</b>
3.1.1	<i>INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA</i> .....	19
3.1.2	<i>INFLUENCIA DEL CONTENIDO EN HUMEDAD: COMBUSTIÓN DE ASTILLA DE PINO CON DISTINTAS HUMEDADES</i> .....	20
3.1.3	<i>INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA: COMBUSTIÓN DE ASTILLA DE PINO CON DISTINTO CONTENIDO EN FINOS</i> .....	22
3.1.4	<i>INFLUENCIA DE LA DENSIDAD: COMBUSTIÓN DE ASTILLA DE OLIVO Y DE PÉLETS DE OLIVO</i> .....	23
<b>3.2</b>	<b>ASOCIADOS A LA COMBUSTIÓN</b> .....	<b>24</b>

3.2.1	<i>INFLUENCIA DE LA ALIMENTACIÓN: OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN CALDERA DE PÉLETS.....</i>	24
3.2.2	<i>INFLUENCIA DE LA TECNOLOGÍA ELEGIDA: COMBUSTIÓN DE PÉLETS DE PODA DE OLIVO Y DE HUESO DE ACEITUNA EN UNA CALDERA Y EN UNA ESTUFA.....</i>	28
3.2.3	<i>INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DE AIRE: COMBUSTIÓN DE ASTILLA DE OLIVO CON DISTINTA PROPORCIÓN DE AIRE PRIMARIO Y SECUNDARIO.....</i>	30
3.2.4	<i>INFLUENCIA DEL AJUSTE DE LA EXTRACCIÓN DE HUMOS: OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA EXTRACCIÓN DE HUMOS EN UNA CALDERA DE PÉLETS.....</i>	31
3.3	<b>ASOCIADOS A LA DEPURACIÓN DE GASES.....</b>	<b>34</b>
4	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>36</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Variación de la temperatura adiabática de llama con la humedad del combustible para distintos excesos de aire. (van Loo, S. et al 2010).....	2
Figura 2.	Variación del PCI de una astilla de pino con la humedad. Fuente: CEDER-CIEMAT. Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB).....	4
Figura 3.	Curva TGA para pino con una velocidad de calentamiento de 20°C/min. Fuente: Pérez et al 2014. ....	7
Figura 4.	Tecnologías de combustión principales, según la potencia (Fuente: Procede Biomass BV) .....	9
Figura 5.	Emisiones de CO, en función del exceso de aire para diferentes tecnologías. a) Estufas de madera, b) Calderas a contracorriente, c) Hornos de madera automáticos, d) Hornos de madera automáticos de control avanzado. Fuente: Nussbaumer 2003. ....	12
Figura 6.	Planta de combustión de parrilla móvil de 500 kW <sub>t</sub> en CEDER-CIEMAT. ....	21
Figura 7.	Planta de combustión de lecho fluidizado de 1 MW <sub>t</sub> (izquierda) y línea de depuración del gas (derecha), en CEDER-CIEMAT. ....	23
Figura 8.	O <sub>2</sub> y CO registrado durante los ensayos de combustión de astillas (arriba) y de pélets (abajo) de poda de olivo. ....	25
Figura 9.	Caldera de combustión en parrilla fija de 1 MW <sub>t</sub> en Las Navas del Marqués. ....	26
Figura 10.	Emisiones de CO y O <sub>2</sub> en la caldera de Las Navas del Marqués durante la fase inicial.....	26
Figura 11.	Emisiones de CO y O <sub>2</sub> en la caldera de Las Navas del Marqués durante la operación mejorada .....	27
Figura 12.	Estufa (izquierda) y caldera (derecha) utilizadas en los ensayos. ....	29
Figura 13.	Caldera de biomasa monitorizada en Fabero (León).....	32
Figura 14.	Emisiones de CO y O <sub>2</sub> en la caldera de Fabero durante la fase inicial .....	32
Figura 15.	Emisiones de CO y O <sub>2</sub> en la caldera de Fabero durante la operación mejorada .....	33



# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Estimación de recursos agrícolas y forestales por Comunidades Autónomas (t m.s. <sup>(*)</sup> /año).....	5
Tabla 2.	Estimación de recursos de biomasa residual industrial de origen agrícola y forestal por Comunidades Autónomas (t m.s. <sup>(*)</sup> /año). Fuente: Base de datos BIORAISE (2015).....	6
Tabla 3.	Composición inmediata y elemental de distintas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT, Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB).....	8
Tabla 4.	Poderes caloríficos de distintas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT, Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB).....	9
Tabla 5.	Composición en elementos mayoritarios de distintas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT, Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB).....	10
Tabla 6.	Temperaturas de fusibilidad de cenizas de distintas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT, Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB). ....	1
Tabla 7.	Humedad típica de algunas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT. Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB). ....	2
Tabla 8.	Densidad típica de algunas biomásas .....	6
Tabla 9.	Fibras utilizadas para la confección de mangas filtrantes .....	17
Tabla 10:	Influencia del contenido en nitrógeno de la biomasa sobre las emisiones de NO <sub>x</sub> .....	19
Tabla 11.	Influencia del contenido en azufre de la biomasa sobre las emisiones de SO <sub>2</sub> .....	20
Tabla 12.	Emisiones y eficiencia para cada tipo de astilla, en función de su humedad. ....	21
Tabla 13	Emisiones y eficiencia para cada tipo de astilla, en función de su contenido en finos. ....	22
Tabla 14.	Humedad y cenizas de las astillas y de los pélets de poda de olivo y principales emisiones registradas en los ensayos. ....	24
Tabla 15.	Valores medios de la composición del gas en las instalaciones de Las Navas del Marqués con funcionamiento inicial de alimentación y optimizado.....	28
Tabla 16.	Valores medios de las emisiones registradas en la combustión de hueso de aceituna en la estufa y en la caldera .....	29
Tabla 17.	Valores medios de las emisiones registradas en la combustión de pélets de poda de olivo en la estufa y en la caldera.....	29

Tabla 18.	Valores medios de la composición del gas registrados en los ensayos, operando con baja y con alta proporción de aire secundario. ....	31
Tabla 19.	Valores medios de la composición del gas en las instalaciones de Fabero durante la fase inicial y con la extracción de humos optimizada .....	33
Tabla 20.	Parámetros de funcionamiento del módulo electrofiltro durante los ensayos.....	34
Tabla 21.	Concentración numérica de partículas antes y después de depuración obtenida en los ensayos de combustión de astilla de olivo .....	35

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

El presente documento se ha redactado en el marco del proyecto CLEANBIOM financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación Orientada a los Retos de la Sociedad, modalidad 1, “Retos Investigación”: Proyectos de I+D+I. Está enmarcado dentro del subproyecto SP1 titulado “Evaluación del efecto de parámetros relevantes sobre el proceso de combustión de biomasa y el control de emisiones de partículas sólidas y otros contaminantes relacionados” (PROCOM-BIOM).

Este subproyecto pretendía identificar, determinar y evaluar los parámetros y características que pueden influir sobre la formación de precursores de corrosión y de contaminantes a lo largo del proceso de combustión de biomasa.

Dentro del panorama energético actual, con la elevada dependencia energética existente de los combustibles fósiles, la biomasa tiene un importante papel, por tratarse de un recurso autóctono y limpio. 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 (Vázquez et al 2018). Sin embargo, debido a la problemática asociada a la combustión de la biomasa y a su elevado coste en algunos casos, no se ha producido un desarrollo muy elevado de esta como fuente de energía. Así, la producción de energía eléctrica a partir de la biomasa no está muy implantada y las principales aplicaciones energéticas que se están dando a la biomasa son térmicas en el sector doméstico y en industrias donde se requiere la producción de calor para sus propios procesos de fabricación. Sin embargo, existe un amplio potencial de biomasa que actualmente no se está aprovechando.

La biomasa es un combustible muy diverso, y de orígenes diferentes entre los que se encuentran composiciones y propiedades diferenciales de unas a otras que determinan el comportamiento en el proceso y la formación de contaminantes. La biomasa de madera natural es normalmente el combustible más favorable para la combustión debido a su bajo contenido en cenizas y nitrógeno. Biomasa de origen herbáceo, tales como las pajas, tienen altos contenidos relativos en cenizas, en azufre (S) y en cloro (Cl) lo que da origen a mayores emisiones de SO<sub>2</sub>, HCl y materia particulada (PM), aumentando la corrosión y los depósitos en las superficies de intercambio de calor. De un tipo y otro, existen numerosas biomasa, tanto naturales como de origen residual, que presentan tendencias similares y a su vez, comportamientos diferenciales ante la combustión.

En general, los constituyentes de la biomasa que acompañan a carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), resultan indeseables en la combustión ya que originan diferentes contaminantes, formación de depósitos, corrosión y cenizas. Los componentes más relevantes son el nitrógeno (N) que es fuente de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los elementos que constituyen las cenizas o los precursores de las mismas, ya que forman emisiones de PM que podrán depositarse a lo largo de las partes de una instalación o finalmente emitirse a la atmósfera por la chimenea, arrastrando otros contaminantes a su vez. Los contenidos, comparativamente

altos en metales alcalinos (especialmente potasio, K) así como en cloro (Cl) son también unos de los factores de mayor desventaja en el uso de este tipo de combustibles.

La combustión es la tecnología más madura disponible actualmente para la utilización de la biomasa, no obstante se precisa mayor generación de conocimiento del proceso para obtener mejoras en cuanto a la eficiencia, al impacto ambiental y a los costes, que permitan incrementar su uso.

El objetivo de este documento es la identificación de los parámetros críticos que afectan a la combustión de biomasa, teniendo en cuenta las distintas etapas en que se puede considerar dividido el proceso: tipo de biomasa y su preparación, combustión y depuración de emisiones.

## **2 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS CRÍTICOS**

### **2.1 PARÁMETROS CRÍTICOS ASOCIADOS A LA BIOMASA Y A SU PREPARACIÓN**

Las características y calidad de la biomasa como combustible son muy diversas y dependen principalmente del tipo de biomasa y 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.

Por otra parte, existen diferentes tecnologías de combustión disponibles para distintas calidades de combustible. Además, debido a la denominada “economía de escala”, solo a media y gran escala se queman combustibles más baratos y de menor calidad. Sin embargo, en pequeña escala se requieren mejor calidad y homogeneidad del combustible.

Así, por ejemplo, una biomasa puede alimentarse al combustor con humedades entre 25 y 55% en peso, si se trata de biomasa forestal bruta, o con menos del 10% en peso si se trata de pélets o residuos de proceso, de la misma biomasa forestal. Cuanta menor humedad tenga, mayor será el coste del biocombustible, por el mayor secado.

A continuación, se recogen distintos parámetros críticos asociados a la propia biomasa y a las distintas etapas de preparación llevadas a cabo hasta su aprovechamiento energético.

#### **2.1.1 DISPONIBILIDAD DE LA BIOMASA**

Para plantear el aprovechamiento energético de la biomasa, es necesario tener en consideración la producción y uso actual en cada caso concreto. Esto es, su disponibilidad, para asegurar el abastecimiento de biomasa a largo plazo en la instalación de Tabla 1 aprovechamiento. Así, en la, se muestra la disponibilidad en toneladas de materia seca al año de biomasa residual de origen agrícola y forestal, agrupada por Comunidades Autónomas, según aparece recogido en la base de datos BIORAISE (<http://bioraise.ciemat.es/Bioraise>, 2015). Las biomásas aparecen agrupadas en distintas clases: secano, regadío, paja de arroz, viñedos, frutales, olivar, dehesas, frondosas, coníferas, mezcla de frondosas y coníferas y matorral.

Por otro lado, en la Tabla 2 se muestra la disponibilidad en toneladas de materia seca al año de residuos de industrias agroforestales, agrupada por Comunidades Autónomas, según se recoge también en la base de datos BIORAISE.

Se puede destacar la elevada disponibilidad de biomasa agrícola procedente de cultivos de secano (principalmente trigo y cebada), con un total de  $9,4 \cdot 10^6$  t m.s./año, distribuidas prácticamente por toda la geografía española. Por otro lado, también presenta un elevado

potencial la poda del olivar, con un total de  $2,3 \cdot 10^6$  t m.s./año, en su mayor parte concentradas en Andalucía (84% del total). Además, se puede destacar el potencial energético del viñedo con  $1,1 \cdot 10^6$  t m.s./año (principalmente localizados en regiones mediterráneas, en Castilla León, la Rioja, Aragón y Castilla la Mancha) y de los frutales con  $1,9 \cdot 10^6$  t m.s./año, concentrados estos últimos en las regiones de la cuenca mediterránea y Aragón.

Con respecto a los residuos de industrias agroforestales, se puede destacar la elevada disponibilidad de subproductos de madera no tratada con un total de  $1,4 \cdot 10^6$  t m.s./año, seguido por el hueso de aceituna con 339.000 t m.s./año y la cáscara de almendra con 167.000 t m.s./año. Los subproductos de madera no tratada se encuentran distribuidos por todo el territorio, mientras que tanto el hueso de aceituna como la cáscara de almendra se encuentran fundamentalmente localizados en la mitad Sur de la Península y en Aragón y Cataluña. Por tanto, son unos recursos que también están bastante extendidos en todo el país.

Además de tomar en consideración la cantidad disponible de las distintas biomásas, es fundamental tener en cuenta el uso actual de las mismas, puesto que su utilización como fuente de energía podría tener dos tipos de efecto: por un lado, podría entrar en competencia con otras aplicaciones con el correspondiente incremento de sus costes y; por otro lado, podría evitar un problema medioambiental al hacerse su combustión de forma controlada, en lugar de su quema al aire libre.

En el caso de la biomasa residual procedente de los cultivos de secano, se trata fundamentalmente de paja de trigo y de cebada, que se utiliza también como alimentación y cama de ganado y en champiñoneras. Además de estos usos agro-ganaderos, en la actualidad ya hay algunas plantas de producción de energía eléctrica a partir de este recurso (46 MW<sub>e</sub> instalados en dos plantas que usan exclusivamente paja de cereal y 15 MW<sub>e</sub> en una planta de alimentación mixta: leñosa y herbácea).

En el Sur de la Península los combustibles más habituales son los procedentes del sector olivarero, en concreto en Andalucía en 2017 representaron el 41% del consumo de biomasa para producción eléctrica, en un total de 16 plantas de producción eléctrica con biomasa y 20 plantas de biogás (260 MW<sub>e</sub> instalados) (Agencia Andaluza de la Energía 2018). Tradicionalmente, el uso de la poda del olivar ha estado asociado a calefacciones domésticas de leña. Sin embargo, en los últimos años, ha aumentado el uso de astilla de poda de olivo en instalaciones industriales o en centrales eléctricas. No obstante, el uso actual de esta biomasa supone únicamente el 30% de su potencial (Agencia Andaluza de la Energía 2018).

Los residuos obtenidos de la poda de los viñedos (sarmientos) y de los frutales, en la mayor parte de los casos, terminan quemados al aire libre en rastrojos. Esto significa una pérdida de ingresos para los propietarios y un aumento de la contaminación del aire, porque una combustión de este tipo produce muchos contaminantes que van directamente a la atmósfera, mientras que, si la combustión se hace de forma controlada y con los equipos de eliminación de contaminantes adecuados, puede reducirse la cantidad y peligrosidad de los compuestos generados y emitidos.

	ANDALUCÍA	ARAGÓN	ASTURIAS	BALEARES	CANARIAS	CANTABRIA	CASTILLA LA MANCHA	CASTILLA Y LEÓN	CATALUÑA
<b>Secano</b>	1.548.566	909.759	999	6.132	nd	804	1.503.491	3.521.951	531.344
<b>Regadío</b>	1.263.328	1.114.867	0	7.697	nd	0	737.241	1.502.203	530.022
<b>Arroz (paja)</b>	233.734	14.736	0	0	nd	0	0	0	108.795
<b>Viñedo</b>	94.057	32.760	27	240	nd	0	495.623	26.263	137.565
<b>Frutales</b>	144.284	76.515	1.883	12.854	nd	474	8.138	14.862	259.952
<b>Olivar</b>	1.973.687	8.533	0	302	nd	0	123.795	3.422	44.655
<b>Dehesas con cultivo anual</b>	5.591	9.983	1.150	43.260	nd	0	1.850	5.451	158
<b>Dehesas</b>	77.093	4	1.521	0	nd	13	50.286	111.155	0
<b>Fronchosas</b>	232.155	232.453	186.631	3.942	nd	124.993	214.521	722.103	221.487
<b>Coníferas</b>	268.383	322.970	29.587	3.590	nd	37.684	440.489	496.633	340.675
<b>Mezcla coníferas frondosas</b>	18.730	113.561	22.158	2.556	nd	3.826	53.611	113.874	80.156
<b>Matorral</b>	65.713	247.568	47.297	3.076	nd	6.049	335.081	335.620	132.184
	EXTREMADURA	GALICIA	LA RIOJA	MADRID	MURCIA	NAVARRA	PAÍS VASCO	VALENCIA	TOTAL
<b>Secano</b>	426.422	8.378	182.496	85.571	10.392	468.428	193.292	30.315	9.428.340
<b>Regadío</b>	880.857	0	19.696	142.876	36.232	204.587	3.704	14.317	6.457.627
<b>Arroz (paja)</b>	67.419	0	0	0	55	0	0	96.731	521.470
<b>Viñedo</b>	68.067	38.945	21.296	9.852	57.249	2.418	6.258	147.352	1.137.972
<b>Frutales</b>	43.573	7.080	4.884	1.870	148.590	9.395	1.065	1.162.085	1.897.504
<b>Olivar</b>	148.314	0	529	4.985	1.456	610	46	31.449	2.341.783
<b>Dehesas con cultivo anual</b>	259	72.293	46	0	13.959	0	91	16.953	171.044
<b>Dehesas</b>	147.577	37.898	120	2.508	1	3	22	0	428.201
<b>Fronchosas</b>	212.672	239.111	62.410	12.451	984	211.697	149.160	41.701	2.868.471
<b>Coníferas</b>	34.840	118.128	25.650	25.194	20.540	53.897	236.798	86.081	2.541.139
<b>Mezcla coníferas frondosas</b>	1.133	447.533	14.046	885	1.650	74.187	37.794	20.938	1.006.638
<b>Matorral</b>	59.064	255.768	19.868	21.150	15.011	12.086	15.018	91.602	1.662.155

(\*) toneladas de materia seca. nd: no disponible.

Tabla 1. Estimación de recursos agrícolas y forestales por Comunidades Autónomas (t m.s. (\*)/año).

	ANDALUCÍA	ARAGÓN	ASTURIAS	BALEARES	CANARIAS	CANTABRIA	CASTILLA LA MANCHA	CASTILLA Y LEÓN	CATALUÑA
<b>Industria de la madera (subproductos de madera no tratada químicamente)</b>	61.133	36.837	53.378	23.801	4.605	47.999	49.893	248.084	164.838
<b>Industria de la madera (otros subproductos)</b>	10.623	3.640	1.821	2.943	1.984	1.153	12.172	7.944	15.202
<b>Industria de la madera (Corteza)</b>	5.408	4.362	6.436	2.855	443	5.709	5.568	31.082	18.759
<b>Industria aceite oliva (hueso aceituna)</b>	279.644	1.714	0	0	0	0	19.959	0	17.571
<b>Industria aceite oliva (orujillo)</b>	306.065	0	0	0	0	0	27.169	0	31.661
<b>Destilerías (granilla uva)</b>	0	0	0	0	0	0	45.009	0	6.102
<b>Destilerías (orujo seco)</b>	0	0	0	0	0	0	32.340	0	4.384
<b>Descascaradoras (cáscara piñón)</b>	0	0	0	0	0	0	0	2.935	422
<b>Descascaradoras (cáscara piña)</b>	360	0	0	0	0	0	0	9.078	0
<b>Descascaradoras (cáscara almendra)</b>	35.669	14.999	0	5.374	0	0	15.221	0	43.787
<b>Descascaradoras (cáscara avellana)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	3.900
	EXTREMADURA	GALICIA	LA RIOJA	MADRID	MURCIA	NAVARRA	PAÍS VASCO	VALENCIA	TOTAL
<b>Industria de la madera (subproductos de madera no tratada químicamente)</b>	10.121	313.926	42.961	8.263	73.903	34.116	152.204	65.718	1.391.780
<b>Industria de la madera (otros subproductos)</b>	1.227	10.193	1.310	7.662	3.758	3.013	5.459	15.591	105.695
<b>Industria de la madera (Corteza)</b>	1.099	38.689	5.426	266	9.220	4.025	17.802	4.592	161.741
<b>Industria aceite oliva (hueso aceituna)</b>	14.949	0	0	1.019	1.256	230	0	2.711	339.053
<b>Industria aceite oliva (orujillo)</b>	3.767	0	0	0	0	0	0	0	368.662
<b>Destilerías (granilla uva)</b>	3.789	0	5.913	0	0	0	0	5.238	66.051
<b>Destilerías (orujo seco)</b>	2.722	0	4.249	0	0	0	0	3.764	47.459
<b>Descascaradoras (cáscara piñón)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	3.357
<b>Descascaradoras (cáscara piña)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	9.438
<b>Descascaradoras (cáscara almendra)</b>	804	0	0	1.801	23.200	0	0	25.810	166.665
<b>Descascaradoras (cáscara avellana)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	3.900

(\*) toneladas de materia seca.

Tabla 2. Estimación de recursos de biomasa residual industrial de origen agrícola y forestal por Comunidades Autónomas (t m.s. <sup>(\*)</sup>/año). Fuente: [Base de datos BIORAISE](#) (2015)



En cuanto a la biomasa residual de origen industrial, los subproductos de madera se utilizan normalmente para la fabricación de tableros aglomerados o para la obtención de pélets y briquetas, que son usados como fuente de energía.

La cáscara de almendra es un subproducto procedente del descascarado de la almendra. Tradicionalmente, la cáscara de almendra ha sido usada en hornos de panadería, en la industria cerámica y para las calefacciones de explotaciones ganaderas. Con la creciente preocupación por disminuir la utilización de combustibles fósiles, la cáscara de almendra ha tomado un mayor protagonismo como fuente de energía, ya sea en instalaciones de carácter industrial o de tipo doméstico. En la actualidad, ya hay numerosas empresas que distribuyen cáscara de almendra para aplicaciones térmicas en el sector doméstico.

Otra biomasa de origen industrial muy importante es el hueso de aceituna. En la producción de aceite de oliva, el 70% del orujo se deshuesa tras la molturación, mediante un proceso de separación pulpa-hueso en la almazara o en la extractora, obteniéndose hueso triturado. Tradicionalmente, se ha empleado como combustible en la propia industria del olivar (entamadoras, almazaras y extractoras) y en otros sectores (alimentación, cerámico, agropecuario). Actualmente, cada vez cobra más importancia en aplicaciones térmicas de los sectores residencial y servicios (Agencia Andaluza de la Energía 2018). Asimismo, el combustible ha experimentado una mejora en la calidad gracias a la aparición del estándar UNE 164003 (Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de biocombustibles) y del sello de calidad BIOMASUD.

### **2.1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA BIOMASA**

Como segundo aspecto relevante a evaluar de la biomasa, se plantea su caracterización físico-química, ya que ciertos elementos pueden ser precursores de compuestos relacionados con la corrosión y con la formación de depósitos en las superficies de intercambio de calor. Además, ciertos parámetros químicos pueden determinar el diseño de las instalaciones de combustión y de depuración de gases y la necesidad de su mantenimiento y de los costes asociados a éste.

A continuación, se presentan distintos parámetros físico-químicos de varias biomasa: en la Tabla 3 se muestra la composición inmediata y elemental, en la Tabla 4 el poder calorífico, en la Tabla 5 la composición de elementos mayoritarios de la ceniza y, por último, en la Tabla 6 se incluyen las temperaturas de fusibilidad de las cenizas. En todos los casos, aparecen las biomasa divididas en tres grupos: herbáceas, leñosas y otras.

Se puede destacar que habitualmente las biomasa herbáceas son las que mayor contenido en cenizas tienen, mientras que las de menor son las cáscaras de frutos. Además, las biomasa herbáceas tienen generalmente un mayor contenido en azufre y en cloro (Tabla 3). Todos estos parámetros hacen que la combustión de las biomasa 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.

En cuanto al poder calorífico, las biomasa herbáceas poseen un menor poder calorífico en base seca, si bien no es una diferencia muy elevada que permita la elección justificada de una u otra biomasa para su aprovechamiento energético (Tabla 4).

	HUMEDAD (% b.h.)	CENIZA (% b.s.)	VOLÁTILES (% b.s.)	CARBONO (% b.s.)	HIDRÓGENO (% b.s.)	NITRÓGENO (% b.s.)	AZÚFRE (% b.s.)	CLORO (% b.s.)
<b>BIOMASAS HERBÁCEAS</b>								
<b>PAJA TRIGO</b>	9,50	6,10	76,40	46,00	6,00	0,66	0,12	0,23
<b>BRASSICA CARINAT.</b>	10,10	6,30	75,50	45,60	6,00	1,34	0,31	0,22
<b>BRASSICA NAPUS</b>	10,00	6,70	76,10	47,80	6,50	1,81	0,52	0,59
<b>PAJA SORGO</b>	10,40	10,90	73,00	44,00	5,60	0,84	0,09	0,85
<b>CAÑOTEMAIZ</b>	11,20	13,20	76,20	45,10	5,70	0,43	0,07	0,40
<b>PAJA CEBADA</b>	10,90	6,90	77,00	45,00	6,00	0,37	0,13	0,72
<b>TRITICALE</b>	10,10	8,10	76,20	44,00	5,90	0,86	0,14	0,22
<b>AVENA</b>	9,50	6,30	77,10	44,80	6,10	0,87	0,30	0,69
<b>CARDO</b>	11,80	9,90	72,80	44,20	6,40	0,76	0,12	0,71
<b>PAJA DE ARROZ</b>	10,60	13,40	71,50	41,60	5,40	0,56	0,12	0,65
<b>BIOMASAS LEÑOSAS</b>								
<b>PINO</b>	9,30	4,60	71,70	49,10	5,70	0,40	0,04	0,03
<b>EUCALIPTO</b>	12,20	3,90	79,10	47,90	5,90	0,26	0,03	0,15
<b>CHOPO</b>	11,20	2,30	81,10	48,90	6,00	0,51	0,05	0,03
<b>PAULOWNIA</b>	9,10	1,60	nd	49,40	6,10	0,57	nd	nd
<b>OLIVO</b>	22,70	6,90	78,80	48,30	6,20	1,08	0,07	0,07
<b>SARMIENTO</b>	10,00	3,10	77,90	49,10	6,00	0,68	0,03	0,01
<b>MATORRAL</b>	10,90	2,10	82,10	48,90	6,00	0,45	0,03	0,02
<b>OTRAS BIOMASAS</b>								
<b>CÁSCARA ALMENDRA</b>	12,40	0,70	76,90	47,70	6,00	0,60	0,02	0,01
<b>CÁSCARA PIÑÓN</b>	12,60	1,70	78,40	50,80	6,00	0,31	0,02	0,02
<b>HUESO ACEITUNA</b>	11,80	0,30	83,60	52,30	6,40	0,28	0,03	0,03
<b>PIÑA</b>	9,40	0,80	77,90	50,70	6,10	0,23	0,02	0,06

Tabla 3. Composición inmediata y elemental de distintas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT, Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB).

	PCS <sub>v,0</sub> (MJ/kg)	PCI <sub>p,0</sub> (MJ/kg)		PCS <sub>v,0</sub> (MJ/kg)	PCI <sub>p,0</sub> (MJ/kg)
<b>BIOMASAS HERBÁCEAS</b>			<b>OTRAS BIOMASAS</b>		
<b>PAJA TRIGO</b>	18,51	17,25	<b>CÁSCARA ALMENDRA</b>	19,08	17,77
<b>BRASSICA CARINATA</b>	18,44	17,22	<b>CÁSCARA PIÑÓN</b>	20,60	19,40
<b>BRASSICA NAPUS</b>	19,41	18,00	<b>HUESO ACEITUNA</b>	21,57	20,18
<b>PAJA SORGO</b>	17,49	16,31	<b>PIÑA</b>	20,01	18,68
<b>CAÑOTE MAIZ</b>	17,82	16,58			
<b>PAJA CEBADA</b>	18,11	16,80			
<b>TRITICALE</b>	17,67	16,38			
<b>AVENA</b>	17,98	16,65			
<b>CARDO</b>	17,50	16,10			
<b>PAJA DE ARROZ</b>	16,50	15,32			
<b>BIOMASAS LEÑOSAS</b>					
<b>PINO</b>	19,35	18,10			
<b>EUCALIPTO</b>	18,84	17,55			
<b>CHOPO</b>	19,45	18,31			
<b>PAULOWNIA</b>	19,74	18,41			
<b>OLIVO</b>	19,94	18,66			
<b>SARMIENTO</b>	19,30	18,10			
<b>MATORRAL</b>	19,27	17,96			

PCS<sub>v,0</sub>: poder calorífico superior a humedad 0%. PCI<sub>p,0</sub>: poder calorífico inferior a humedad 0%.

Tabla 4. Poderes caloríficos de distintas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT, Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB)

	Al	Ba	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	S	Si	Sr	Ti	Zn
	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)	(% b.s.)
<b>BIOMASAS HERBÁCEAS</b>														
<b>PAJA TRIGO</b>	0,825	0,075	8.863	0,501	16.217	1.547	0,032	0,392	0,713	1.681	20.290	0,093	0,046	0,025
<b>BRASSICA CARINATA</b>	0,244	0,008	17.808	0,268	21.760	1.395	0,03	0,765	3.104	4.285	2.291	0,061	0,012	0,021
<b>BRASSICA NAPUS</b>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<b>PAJA SORGO</b>	1.740	0,048	4.680	1055	16.273	1.651	0,055	0,266	1.007	1	19.489	0,01	0,096	0,018
<b>CAÑOTE MAIZ</b>	3.400	0,029	2.600	1800	6.400	1.400	0,05	0,42	0,47	0	30.000	0,011	0,18	0,015
<b>PAJA CEBADA</b>	2.100	0,020	13.000	1200	22.000	2.800	0,039	0,4	1.700	1.200	9.100	0,051	0,13	0,022
<b>TRITICALE</b>	1.699	0,029	4.945	0,883	11.036	1.535	0,07	1065	1450	1.935	24.000	0,022	0,133	0,024
<b>AVENA</b>	0,380	0,007	6.100	0,235	22.500	3.075	0,077	3350	2.325	5.550	15.500	0,069	0,019	0,029
<b>CARDO</b>	1.100	0,034	15.000	0,62	8.300	2.300	0,05	6000	1500	1.200	14.000	0,098	0,1	0,01
<b>PAJA DE ARROZ</b>	0,260	0,006	4.300	0,19	7.600	1.600	0,23	1500	0	1	34.000	0,028	0,013	0,017
<b>BIOMASAS LEÑOSAS</b>														
<b>PINO</b>	3.100	0,029	8.700	2200	3.400	3.600	0,16	0,65	1	1	23.000	0,022	0,37	0,025
<b>EUCALIPTO</b>	1.030	0,059	28.500	0,64	4.950	2.525	1290	1210	0,938	1	6.825	0,127	0,071	0,026
<b>CHOPO</b>	0,390	0,081	25.600	0,342	12.000	3.560	0,122	0,37	2.640	1.860	3.000	0,084	0,03	0,08
<b>PAULOWNIA</b>	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
<b>OLIVO</b>	0,972	0,019	29.187	0,551	6.713	2.490	0,067	0,394	1.211	1.127	3.956	0,138	0,051	0,018
<b>SARMIENTO</b>	0,349	0,015	17.867	0,385	17.433	3.618	0,097	0,401	2749	1.121	2.945	0,083	0,014	0,047
<b>MATORRAL</b>	0,300	0,15	29.000	0,27	8.200	3.600	1000	0,15	2.200	1.100	3.300	0,078	0,013	0,052
<b>OTRAS BIOMASAS</b>														
<b>CÁSCARA ALMENDRA</b>	0,027	0,007	8.900	0,096	28.000	2.200	0,03	0,62	0,79	1	1	0,073	<0,002	0,01
<b>CÁSCARA PIÑÓN</b>	0,376	0,004	6.361	0,378	9.962	2.231	0,104	0,616	1.047	1	26.644	0,015	0,013	0,043
<b>HUESO ACEITUNA</b>	0,290	0,003	2.500	0,32	12.000	2.600	0,087	0,73	0,36	1	28.000	0,006	0,004	0,04
<b>PIÑA</b>	1.300	0,003	2.500	0,2	28.000	6.400	0,12	1800	2.500	1.500	4.000	0,006	0,01	0,072

nd: no disponible

Tabla 5. Composición en elementos mayoritarios de distintas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT, Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB)

	<b>TDI</b> (°C)	<b>TE</b> (°C)	<b>TH</b> (°C)	<b>TF</b> (°C)
<b>BIOMASAS HERBÁCEAS</b>				
<b>PAJA TRIGO</b>	800	980	1.080	1.120
<b>BRASSICA CARINATA</b>	740	nd	nd	>1.400
<b>BRASSICA NAPUS</b>	960	nd	nd	>1.400
<b>PAJA SORGO</b>	910	1.070	1.180	1.300
<b>CAÑOTE MAIZ</b>	1.240	1.280	1.370	> 1.400
<b>PAJA CEBADA</b>	830	nd	1.060	1.130
<b>TRITICALE</b>	920	1.020	1.180	1.260
<b>AVENA</b>	820	950	1.040	1.140
<b>CARDO</b>	1.210	1.220	1.230	1.230
<b>PAJA DE ARROZ</b>	920	1.000	1.210	1.270
<b>BIOMASAS LEÑOSAS</b>				
<b>PINO</b>	1.230	nd	1.240	1.270
<b>EUCALIPTO</b>	>1.400	>1.400	>1.400	>1.400
<b>CHOPO</b>	>1.400	>1.400	>1.400	>1.400
<b>PAULOWNIA</b>	nd	nd	nd	nd
<b>OLIVO</b>	1.310	nd	nd	>1.400
<b>SARMIENTO</b>	> 1.400	> 1.400	> 1.400	>1.400
<b>MATORRAL</b>	nd	nd	nd	nd
<b>OTRAS BIOMASAS</b>				
<b>CÁSCARA ALMENDRA</b>	780	ndet	830	> 1.400
<b>CÁSCARA PIÑÓN</b>	830	1.030	1.180	1.310
<b>HUESO ACEITUNA</b>	800	ndet	850	> 1.400
<b>PIÑA</b>	1.340	ndet	1.390	> 1.400

nd: no disponible. ndet: no detectado. TDI: temperatura de deformación inicial. TE: temperatura de esfera. TH: temperatura de hemiesfera. TF: temperatura fluida.

Tabla 6. Temperaturas de fusibilidad de cenizas de distintas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT, Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB).

En cuanto a la composición de la ceniza procedente de la biomasa, en general se puede destacar que las biomásas herbáceas tienen un menor contenido en calcio (Ca) y un mayor contenido en potasio (K) (Tabla 5). Esto hace que presenten unas temperaturas de fusibilidad de cenizas más reducidas (Tabla 6) y que puedan aparecer problemas de formación de escorias y de sinterizados en la combustión de las biomásas herbáceas, con los correspondientes problemas durante la operación de las instalaciones y la mayor necesidad de mantenimiento de las mismas.

Puesto que la composición de la biomasa puede determinar su comportamiento durante la combustión, existen índices capaces de predecir este comportamiento a través de cálculos sencillos, como recogen algunos autores en sus trabajos (Sommersacher et al. 2012, Fernández Llorente y Esteban Carrasco 2005) o bien a través de programas de simulación que emplean cálculos de

equilibrio termodinámico (como por ejemplo FactSage). Sin embargo, estas predicciones no solo dependen de la composición de la biomasa y su aplicabilidad se reduce a condiciones de operación determinadas.

### 2.1.3 HUMEDAD

La humedad de la biomasa bruta varía mucho en función del tipo de biomasa, de su origen, del método de recolección o de la forma de almacenamiento. La Tabla 7 presenta humedades características para distintos tipos de biomasa. La combustión se puede llevar a cabo con biomásas de hasta el 60% de humedad, dependiendo de la tecnología, sin embargo el mayor contenido de agua que se introduce con el combustible va en detrimento de la energía aprovechable en el proceso y de las condiciones del mismo.

BIOMASA	HUMEDAD (%)
Astilla de madera bruta	50
Astilla de madera secada	25
Pélets de madera	10
Paja de cereal	12
Cáscara de almendra	12
Hueso de aceituna	12

Tabla 7. Humedad típica de algunas biomásas. Fuente: CEDER-CIEMAT. Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB).

En la combustión, la humedad contenida en el combustible precisa de la energía necesaria para su evaporación ( $\Delta H=2257$  kJ/kg). Teóricamente, se aprecia que un aumento de la humedad reduce la temperatura máxima a que se puede llevar la combustión o temperatura adiabática de llama (Figura 1) y precisa de mayor tiempo de residencia en el horno para reducir los efectos de una combustión incompleta. En muchos casos puede ser necesario secar la biomasa antes de su combustión para conseguir un proceso estable.

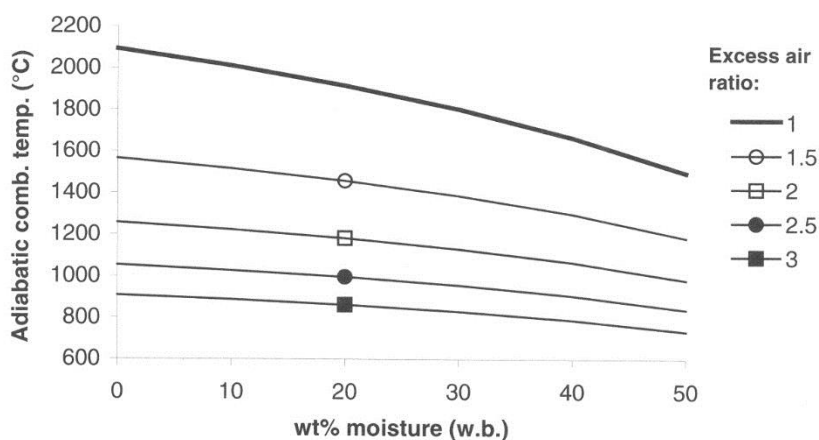


Figura 1. Variación de la temperatura adiabática de llama con la humedad del combustible para distintos excesos de aire. (van Loo, S. et al 2010).

Es precisamente el poder calorífico inferior (PCI) el parámetro que indica la energía disponible en el combustible (MJ/kg de materia húmeda), puesto que considera que el agua formada en la combustión de la biomasa se encuentra en estado vapor, como realmente ocurre (una parte de la energía del combustible se invierte en evaporar esa agua). Mientras que el poder calorífico superior (PCS, MJ/kg de materia seca) expresa la propiedad de la biomasa en función de su composición (C, H, N, S, O y cenizas), estando el agua generada en la combustión de la biomasa en estado líquido. El PCS puede obtenerse mediante una bomba calorimétrica o por medio de fórmulas empíricas a partir de estos datos de composición en porcentaje en peso de materia seca. Un ejemplo de fórmula empírica para la determinación del PCS de la biomasa es el siguiente (van Loo, S. et al 2010):

$$PCS=0.3491 \cdot X_C+1.1783 \cdot X_H+0.1005 \cdot X_S-0.0151 \cdot X_N-0.1034 \cdot X_O-0.0211 \cdot X_{CEN}$$

donde:

PCS: poder calorífico superior a humedad 0%, expresado en MJ/kg m.s.

Xi: contenido en carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S), nitrógeno (N), oxígeno (O) y cenizas (CEN), expresado en % m.s.

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

$$X_O = 100 - (X_C+X_H+X_N+X_{CEN}+X_{Cl}+X_S)$$

donde:

X<sub>S</sub> = contenido en azufre de la biomasa en % base seca.

X<sub>Cl</sub> = contenido en cloro de la biomasa en % base seca.

El poder calorífico inferior (PCI, MJ/kg de materia húmeda) tiene en cuenta la energía que se pierde en la evaporación del agua contenida en el combustible y de la evaporación del agua generada en la combustión (por oxidación del hidrógeno), y se calcula a partir del superior, de la humedad y de la composición del combustible como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$PCI_{p,o} = PCS_{v,o} - 212.2 \cdot X_H - 0.8 \cdot (X_O + X_N)$$

$$PCI_{p,x} = PCI_{p,o} (1-0.01 \cdot X) - 24.43 \cdot X$$

donde:

PCI<sub>p,o</sub>: poder calorífico inferior a presión constante en kJ/kg con humedad cero.

PCI<sub>p,x</sub>: poder calorífico inferior a presión constante en kJ/kg con humedad X.

Por tanto, el PCI se reduce con un aumento de la humedad del combustible, según se muestra en la Figura 2.

El proceso de secado del combustible permite ajustar la humedad de la biomasa, obteniéndose combustibles con más calidad, con lo que se consigue aumentar la eficiencia del proceso de combustión.

El secado se considera natural cuando la biomasa pierde humedad en su almacenamiento por contacto con el ambiente. Deben favorecerse las condiciones de este almacenamiento (techado, apilamiento, volteo periódico,...), de forma que en tiempos razonables se consigan objetivos de humedad sin degradación del material.

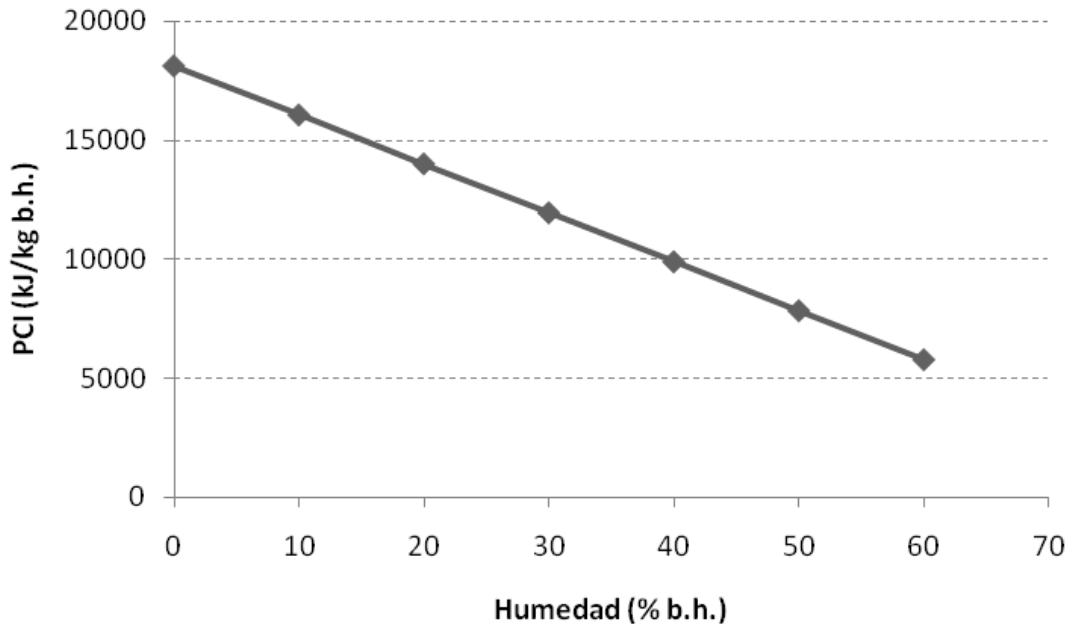


Figura 2. Variación del PCI de una astilla de pino con la humedad. Fuente: CEDER-CIEMAT. Laboratorio de Caracterización de Biomasa (LCB).

El secado forzado implica someter el material a condiciones favorables para la pérdida de humedad en un secadero. El proceso precisa de un aporte energético extra, que debe compensarse en la calidad y precio del combustible obtenido.

#### 2.1.4 GRANULOMETRÍA, PRESENCIA DE IMPROPIOS Y PROPORCIÓN DE FINOS

La reducción del tamaño de partícula del combustible biomásico viene impuesta por los equipos de combustión (quemador de polvo, parrilla, lecho fluidizado, etc.) y marcará las especificaciones para el diseño de los sistemas de transporte de sólidos (cangilones, sinfines, neumático, etc.). En general para operación en continuo se precisa de tamaños reducidos que permitan una dosificación más precisa. Las distintas tecnologías de combustión en función del tamaño que se requiere para el combustible en orden de mayor a menor, son:

- Combustión en lecho fijo, que incluye quemadores de parrillas y de afloración. Estos últimos son ideales para combustibles con bajo contenido en cenizas y sobre todo pequeño tamaño de partícula (no más de 50 mm). Las parrillas son los sistemas que admiten mayor tamaño de partícula del combustible, sin embargo no es conveniente la introducción de finos en la alimentación.
- Combustión en lecho fluidizado, donde la combustión tiene lugar en suspensión gas-sólido, que puede ser de operación burbujeante o circulante dependiendo de la velocidad del aire de fluidización utilizada. Permiten gran flexibilidad en los combustibles utilizados y la introducción de mezclas, no obstante están limitados en cuanto al tamaño del combustible y el contenido en impurezas del mismo. Normalmente se recomienda un tamaño de partícula menor de 40 mm en lechos circulantes y menor de 80 mm en lechos burbujeantes.



- Combustión en polvo o de biomasa pulverizada, que consiste en sistemas de combustión para partículas de diámetro medio menor de 2 mm, y diámetro máximo de 10-20 mm.

Varias ventajas se consiguen simultáneamente con la reducción de tamaño: aumento de densidad a granel del material (costes de transporte y volumen de almacenamiento menores), aumento de la homogeneidad del combustible (deseable para los sistemas de alimentación continua) y aumento de la superficie específica de las partículas (mejora la reactividad del combustible y permite un mejor control del proceso de combustión).

Los inconvenientes asociados a la reducción de tamaño de la biomasa son el alto coste energético de estos procesos y la producción de finos.

La proporción de finos presentes en la biomasa es un parámetro importante, puesto que en ocasiones está directamente relacionada con su contenido en ceniza. Además, cuanto mayor contenido en finos tenga, mayor suciedad se genera en el manejo del combustible, lo que está relacionado con una menor calidad del mismo. De hecho, este parámetro es uno de los que se encuentra regulado a través de distintas normativas UNE e ISO para combustibles en forma de astillas, pélets, cáscaras de frutos y hueso de aceituna, de manera que en cada tipo de combustible se establecen distintas categorías, de cara a su comercialización. Así por ejemplo, en la norma UNE-EN ISO 17225-2:2014 se establece el porcentaje de finos (<3,15mm), expresado en peso, que pueden tener los distintos pélets de biomasa para ser clasificados dentro de cada categoría (pélets para comercialización o uso doméstico: <1,0% para clases A1, A2 y B; pélets para uso industrial: <4,0% para tipo I1, <5,0% para tipo I2, <6,0% para tipo I3).

Además, en ocasiones se precisa de sistemas de separación de los impropios presentes en la biomasa, tales como piedras o metales ya que si se encontraran en una proporción elevada podrían ocasionar problemas en los equipos de combustión. Así, en la combustión en lecho fluidizado, su acumulación en el lecho perturba las condiciones de fluidización, mientras que en la combustión en lecho fijo, la presencia de un alto contenido de impropios en el combustible puede ocasionar problemas de atascos o deterioro de partes móviles.

### **2.1.5 DENSIDAD**

Otra propiedad de la biomasa que resulta negativa de cara a su aprovechamiento energético es la densidad, que, en la mayor parte de los casos, es baja. Esto hace que los costes de transporte y almacenamiento sean elevados y que su manejo sea más complejo. Cada biomasa tiene una densidad, que además es variable en función de su tamaño de partícula (por ejemplo, en función del tamaño de malla usado en su molienda). (Tabla 8)

Así, un aumento en la densidad de la biomasa puede ser muy interesante, si bien el coste del proceso de densificación hace que se produzca un incremento del coste de la biomasa así procesada, que puede hacer que su aprovechamiento energético deje de ser rentable en algunas aplicaciones.

Un proceso de densificación a que se puede someter a la biomasa es el peletizado. La biomasa peletizada presenta muchas ventajas, ya que tiene una elevada densidad, posee muy pocos finos y unas propiedades físico-químicas muy uniformes, lo que permite su dosificación continua en

sistemas de alimentación automática con una operación muy estable. Además, los pélets presentan unas características estandarizadas (UNE-EN ISO 17725-2:2014) que hacen que tengan una calidad muy bien definida y que exista un mercado establecido.

BIOMASA	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )
Astilla de madera secada	130-300 <sup>(1)</sup>
Paja de cereal	40-100 <sup>(2)</sup>
Pélets de madera	600-750 <sup>(3)</sup>
Cáscara de almendra	270-500 <sup>(4)</sup>
Hueso de aceituna	600-700 <sup>(5)</sup>

(1): Para astilla de distintas maderas molida a 50mm. Fuente: CEDER-CIEMAT, LCB.

(2): Para paja de distintos cereales molida a 50mm. Fuente: CEDER-CIEMAT, LCB

(3): Según UNE-EN ISO 17725-2:2014.

(4): Según UNE 164004:2014.

(5): Según UNE 164003:2014.

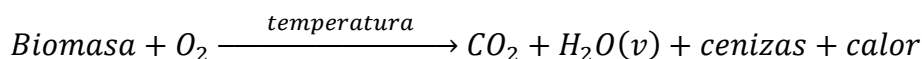
Tabla 8. Densidad típica de algunas biomásas

Habitualmente, los pélets se utilizan sobre todo en el sector doméstico, donde su elevada calidad (pélets tipo A1, A2 y B, según UNE-EN ISO 17725-2:2014) y el bajo requerimiento de limpieza de las instalaciones es muy valorado por la comodidad de los usuarios. Por otro lado, en aplicaciones industriales se utilizan pélets de menor calidad (I1, I2 e I3, según UNE-EN ISO 17725-2:2014) con un mayor contenido en ceniza y en finos y un menor precio, puesto que los requerimientos de limpieza no son tan limitantes, al existir personal en las industrias dedicado al mantenimiento de las mismas.

## 2.2 PARÁMETROS CRÍTICOS DURANTE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Los procesos termoquímicos de conversión de la biomasa en energía implican reacciones químicas irreversibles, homogéneas y heterogéneas, a alta temperatura y con cantidad variable de aire con respecto al estequiométrico: con exceso de aire (combustión), con escasez de aire (gasificación) o con ausencia total de aire (pirólisis).

La combustión es en teoría la oxidación completa de la materia hasta dióxido de carbono y vapor de agua, generando a la vez cenizas como residuo y calor como componente energético útil del proceso:



En este proceso se pueden distinguir tres fases (Figura 3):

- SECADO: evaporación del agua contenida en el combustible (humedad).
- VOLATILIZACIÓN de los compuestos volátiles, que suele suceder a partir de los 200°C.
- COMBUSTIÓN del sólido (char) y de los gases formados.

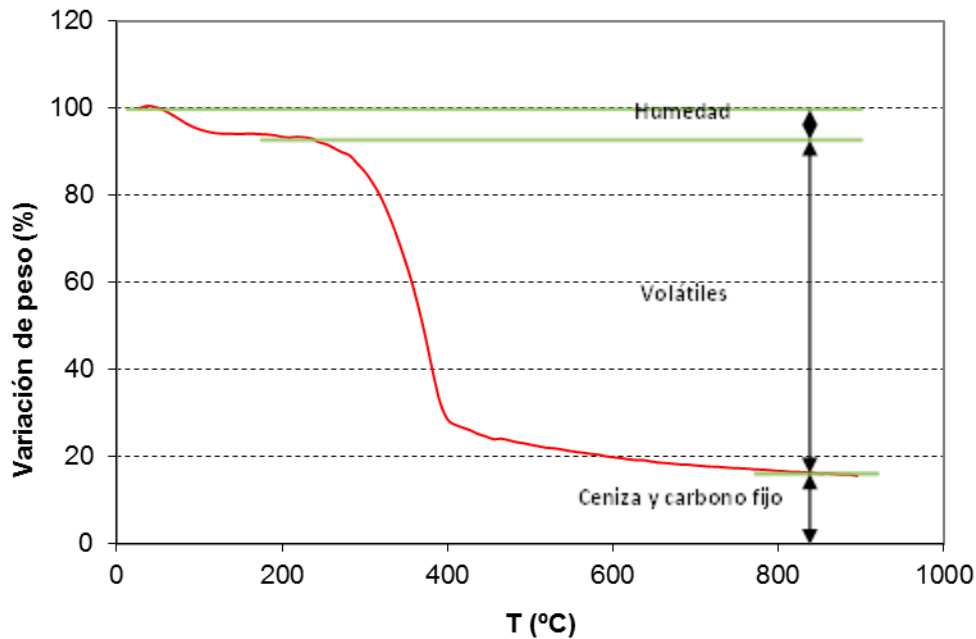


Figura 3. Curva TGA para pino con una velocidad de calentamiento de 20°C/min. Fuente: Pérez et al 2014.

De manera simplificada, podemos calcular el oxígeno necesario para la combustión completa de la biomasa suponiendo la oxidación total de los elementos que la componen, obteniendo así el aire estequiométrico necesario. El parámetro más importante para el control de la combustión es el exceso de aire ( $\lambda$ ), que describe la proporción entre el aire disponible y el aire estequiométrico.

El tiempo utilizado en cada una de las etapas (secado, volatilización, combustión) depende del tamaño y las propiedades del sólido combustible, y de las condiciones de combustión, directamente relacionadas con la tecnología utilizada. Los criterios de diseño a tener en cuenta para alcanzar una combustión completa son temperatura, tiempo y turbulencia (TTT), que se consiguen modificando las condiciones de operación y el diseño del horno.

La combustión de biomasa produce diferentes tipos de compuestos gaseosos y sólidos (materia particulada):

- Productos de la combustión completa: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ).
- Compuestos originados por la combustión incompleta: monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrocarburos ( $\text{C}_x\text{H}_y$ ), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), compuestos orgánicos volátiles (VOCs), inquemados, hollines, alquitranes, hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), cianuro de hidrógeno ( $\text{HCN}$ ), amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).
- Otros compuestos inorgánicos: óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), cloruro de hidrógeno ( $\text{HCl}$ ) y metales trazas ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Cd}$ ,...) y orgánicos, originados en condiciones especiales, como dioxinas y furanos (PCDD/F) y policloro bifenilos (PCBs).

Alcanzar una elevada eficiencia en la combustión reduce mucho las concentraciones alcanzadas para los compuestos del segundo grupo.

Otros están más relacionados con la composición del combustible, como son  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y HCl y deben controlarse por otras condiciones de operación o eliminarse mediante procesos de depuración del gas.

La materia particulada que alcanza la salida de gases de los equipos de combustión es de muy diversa naturaleza, y arrastra numerosos contaminantes por lo que se hace necesaria su disminución para reducir la concentración emitida y su repercusión en la calidad del aire.

Diferenciamos entonces entre medidas primarias de reducción de la contaminación, que son aquéllas que tienen que ver con las condiciones de operación y diseño de los propios sistemas de combustión; y medidas secundarias, que son aquéllas que suponen equipos o sistemas adicionales, con procesos o reacciones químicas a los que se somete la corriente de humos de salida del combustor propiamente dicho.

### **2.2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO. TIPOS DE HORNOS**

Los gases calientes procedentes de la combustión pueden usarse para: aplicaciones térmicas directas en sistemas de combustión de pequeña escala, calentamiento de agua en calderas de calefacción central, producción de vapor en grandes sistemas de generación de electricidad y como fuente de calor en un proceso.

La combustión con fines energéticos se realiza normalmente en sistemas que constan de:

- Horno.
- Equipo de recuperación de calor (intercambiador de calor).
- Sistema de utilización de la energía recuperada (red de agua caliente, red de conducción de vapor, turbogenerador, etc).

Las tecnologías de los hornos para la valorización energética de biomasa o combustibles sólidos residuales varían mucho con las potencias utilizadas (Figura 4) y se diferencia entre lechos fijos, lechos fluidizados y hornos de combustión de polvo. En aplicaciones industriales de mediana potencia (entre 1 y 50  $\text{MW}_t$ ) las dos tecnologías que más se usan son: tecnología de parrillas y tecnología de lecho fluidizado.

#### **2.2.1.1 Tecnología de parrillas**

El principio de funcionamiento se basa en el avance del combustible mediante el arrastre sobre unos elementos que sostienen a la biomasa, insuflándose entre los mismos el aire necesario para la combustión. Según avanza el combustible, se va completando la combustión, de forma que a la salida el contenido de inquemados en los sólidos es bajo.

Las parrillas de las calderas de biomasa pueden ser fijas, móviles, vibrantes, viajeras o sistemas mixtos. En el caso de ser fijas, suelen estar dispuestas en forma inclinada, a fin de facilitar la distribución del combustible y favorecer la evacuación de cenizas al depósito de recogida de cenizas o cenicero.

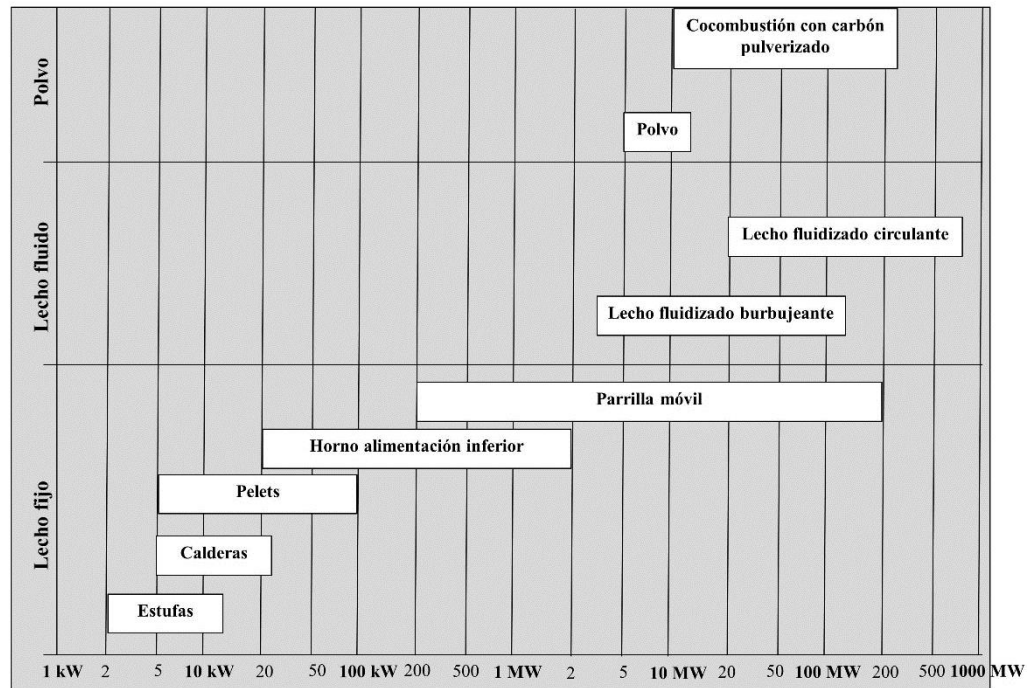


Figura 4. Tecnologías de combustión principales, según la potencia (Fuente: Procede Biomass BV)

La alimentación de aire primario se lleva a cabo mediante soplantes, introduciéndose normalmente el aire a nivel de la cámara de combustión, por debajo de la parrilla.

Asimismo, es imprescindible la introducción de aire secundario en el proceso a efectos de producir una buena combustión de los volátiles desprendidos de la biomasa. En instalaciones de mayor potencia o de tecnología más avanzada, puede existir entrada de aire terciario para favorecer la combustión completa de los volátiles con una estratificación del aire para disminuir además los NO<sub>x</sub> generados en el proceso. Como en el caso del aire primario, el secundario y el terciario, si lo hubiera, se introduce con soplantes, pero por orificios situados en la parte superior de la cámara de combustión.

### 2.2.1.2 Tecnología de lecho fluidizado

La combustión en lecho fluidizado consiste en desarrollar la combustión en el seno de una masa de suspensión de partículas de combustible, cenizas y, un inerte (que suele ser sílice), los cuales son fluidizados por una corriente de aire de combustión ascensional. Entre un 2 y un 3 % del lecho es carbonoso y el resto material inerte, que debido a su capacidad calorífica, amortigua el efecto de las posibles fluctuaciones en el poder calorífico del combustible. A veces se añade caliza al lecho fluido como inerte para lograr un alto grado de retención de azufre en el mismo, si éste es elevado en el combustible.

La velocidad del fluido en el lecho puede calcularse a partir del caudal y el área transversal del lecho por la siguiente relación:

$$Q = v \cdot A$$

donde :

Q: Caudal, en m<sup>3</sup>/s.

A: Área transversal, en m<sup>2</sup>.

v: Velocidad del fluido en el lecho, en m/s.

Los lechos fluidizados se diferencian entre sí, básicamente según la velocidad del fluido.

- **Burbujeante:** Opera con bajas velocidades del aire de fluidización y se caracteriza por permanecer en el lecho la mayor parte de los sólidos y solamente una parte, normalmente inferior al 10%, es arrastrada fuera del lecho y retenida por los sistemas posteriores de eliminación de partículas. Este tipo de fluidización se denomina "en fase densa", caracterizándose porque la superficie libre del lecho permanece definida. Trabaja con velocidades de fluidización comprendidas entre 0,2 y 2 m/s.
- **Circulante:** Con velocidades muy elevadas del aire de fluidización (desde 3 a 6 m/s) se produce el arrastre de gran cantidad de sólidos del lecho, que son recuperados mediante un ciclón o multiciclón, y retornados controladamente a la rama principal de fluidización, a través de válvulas de sólidos refrigeradas.

Desde el punto de vista de la presión de operación del combustor, pueden hacerse dos divisiones de los lechos fluidos: atmosféricos, que operan a la presión atmosférica, y a presión (5-20 kg/cm<sup>2</sup>), que normalmente se utilizan para altas capacidades de producción térmica (superiores a 200 MW<sub>t</sub>), no muy habituales en biomasa.

Aparte de la velocidad del fluido, la porosidad del lecho ( $\epsilon$ ) (fracción de huecos existente en el lecho) y la caída de presión ( $\Delta P$ ) son parámetros característicos de todo proceso en lecho fluidizado.

Como ya se ha visto, la configuración de un horno viene definida por el tipo de tecnología utilizada y cada una encierra en sí misma algunas ventajas y desventajas asociadas a su propio diseño.

Las características que hacen especialmente interesante a la tecnología en lecho fluido, en comparación con otros sistemas de combustión, están relacionadas con las tres "T": temperatura, tiempo de residencia y turbulencia, que son los parámetros fundamentales de diseño de un sistema de combustión. En un lecho fluidizado, como consecuencia del movimiento de los sólidos existe un elevado grado de turbulencia, lo cual facilita la mezcla entre el combustible y el aire, dando lugar a mayores eficacias de combustión. Como consecuencia del grado de turbulencia, el lecho fluidizado se caracteriza por tener una gran uniformidad de la temperatura a lo largo de la cámara de combustión. Dependiendo del diseño del lecho fluidizado y de la velocidad de fluidización con la que se opere, se pueden conseguir tiempos de residencia elevados. Otras ventajas de los lechos fluidos frente a los lechos fijos (Basu 2006) son:

- Operan a temperaturas relativamente bajas: se alcanzan temperaturas de 850°C aproximadamente y temperaturas uniformes con lo que se limita así la formación de óxidos de nitrógeno y la volatilización de las sales de álcalis. Además trabaja por debajo del punto de fusión de las cenizas de muchas biomásas (Tabla 6).
- Flexibilidad en el uso de combustibles. Aquellos biocombustibles con más bajo poder calorífico y/ o mayores contenidos en cenizas se queman en lechos fluidizados sin pérdida de funcionamiento de los equipos.
- Eficacia de la combustión. La eficacia de la combustión en lechos fluidizados burbujeantes se encuentra entre el 90 y 98% y puede llegar al 99,5% en lechos fluidizados circulantes. La agitación permite, junto al tamaño controlado de las partículas, una alta difusividad del aire de combustión y un aumento de la superficie de contacto en las reacciones de combustión. Por otra parte también contribuye a unos altos coeficientes de transferencia de calor y distribución de la temperatura de operación muy uniforme.
- Control de las emisiones. En relación con las emisiones gaseosas y sólidas, los lechos fluidizados generan menores cantidades de CO y NO<sub>x</sub> ya que la combustión se lleva a cabo en condiciones más controladas (por ejemplo temperatura uniforme y constante). Sin embargo, en los sistemas de lecho fijo, principalmente representados por los hornos de parrillas, las emisiones de partículas sólidas son menores que en combustión en polvo y lecho fluidizado.

Otras variables del diseño son independientes de la propia tecnología y están asociadas por ejemplo a los materiales de construcción y el aislamiento de la cámara de combustión. Los materiales utilizados, principalmente su capacidad calorífica, espesor, densidad, efecto aislante y propiedades superficiales tienen influencia sobre la temperatura conseguida en la cámara de combustión.

## **2.2.2 PARÁMETROS DE OPERACIÓN**

### **2.2.2.1 Exceso de aire**

El exceso de oxígeno en el medio de reacción, necesario para asegurar un contacto suficiente entre el aire de entrada y el combustible, varía en función de la tecnología de combustión seleccionada (Figura 5). Por otro lado, tanto mayor exceso de aire será requerido cuanto más deficiente sea el contacto sólido-gas que tiene lugar en el horno. En los lechos fluidizados el menor exceso de aire necesario (hasta 1,2) aumenta la eficacia de la combustión y reduce el flujo de gases de salida.

### **2.2.2.2 Distribución del aire de combustión**

La introducción escalonada de aire permite que existan diferentes excesos de aire a lo largo de la cámara de combustión. Puede introducirse aire en dos o más puntos, el aire primario junto con el combustible y aire secundario, terciario, etc. en otra sección de la cámara de combustión. En ese punto, el aire de combustión alcanza una buena mezcla con los gases procedentes de la volatilización y la gasificación del combustible que han tenido lugar en el lecho, lo que permite trabajar con menor exceso de aire, mejorando la eficacia de la combustión. La introducción de aire

en diferentes puntos se usa también como técnica de medidas primarias para la reducción de  $\text{NO}_x$  en la combustión.

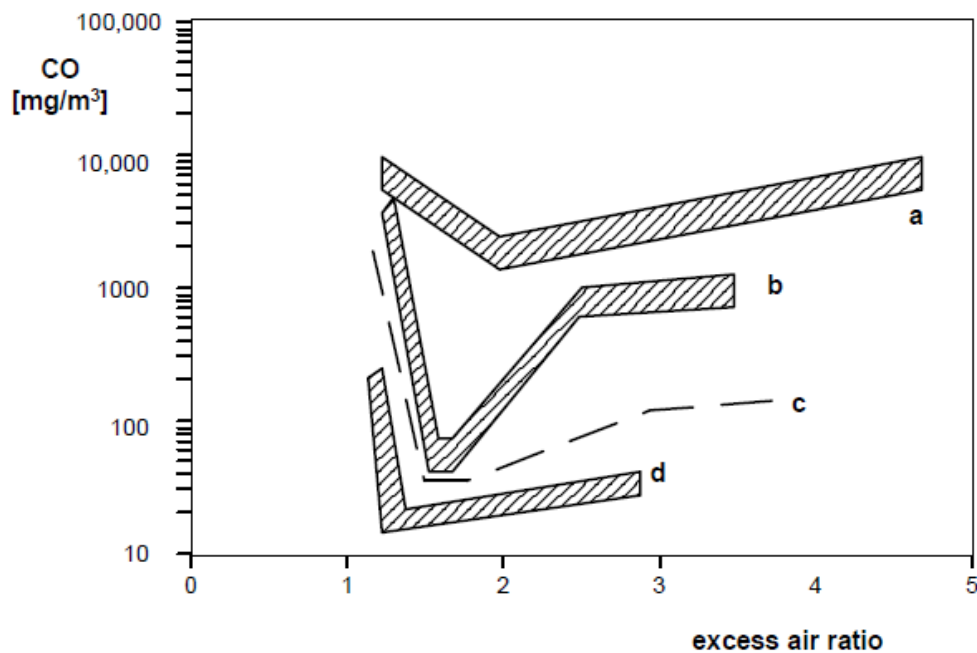


Figura 5. Emisiones de CO, en función del exceso de aire para diferentes tecnologías. a) Estufas de madera, b) Calderas a contracorriente, c) Hornos de madera automáticos, d) Hornos de madera automáticos de control avanzado. Fuente: Nussbaumer 2003.

La distribución entre el aire primario, secundario u otros, es una variable propia de la operación que debe ser estudiada en cada horno y para cada combustible.

### 2.2.2.3 Calentamiento del aire de combustión

La temperatura en la cámara de combustión puede aumentarse significativamente si se introduce aire precalentado. Es práctica habitual en los sistemas de combustión disponer de un intercambiador de calor, denominado precalentador, que aumenta la temperatura del aire de entrada enfriando los gases de salida de la caldera.

### 2.2.2.4 Temperatura

La temperatura de combustión no debe ser baja, ya se ha dicho que la temperatura adiabática de llama disminuye con la humedad, por lo que los gradientes de temperatura del horno son mayores introduciendo combustibles húmedos.

Por otra parte, si se superan las temperaturas de fusión de las cenizas vamos a encontrar la formación de escorias fundidas en el lecho. Frente a los hornos de lecho fijo, en los que se alcanzan temperaturas de más de  $1200^{\circ}\text{C}$  en el lecho de brasas, en los lechos fluidizados se trabaja a temperaturas normalmente por debajo de la fusibilidad de las cenizas. En sistemas de lecho fluidizado, tanto burbujeante como circulante, se alcanzan condiciones casi homogéneas de temperatura y concentraciones, por lo que se consiguen altas eficacias de combustión con bajos



excesos de aire. Eliminando calor en el lecho se permite controlar la temperatura en torno a valores de trabajo típicos de 800-825°C.

### **2.2.2.5 Tiempo de residencia**

El tiempo de residencia es el tiempo que pasan los gases en el horno desde que se generan hasta que salen del mismo. Es un parámetro que depende del caudal (posibilidad de trabajar a distintas cargas) y está directamente relacionado con el diseño del horno, aunque se puede variar al cambiar el régimen de funcionamiento del extractor de gases de combustión y, por tanto, al trabajar a distintos valores de depresión en el horno.

Un tiempo de residencia insuficiente genera muchos inquemados en los humos, en forma de CO y de ciertos hidrocarburos procedentes de la etapa de volatilización del combustible, ya que no tienen tiempo suficiente para completar su oxidación en fase gaseosa hasta CO<sub>2</sub> dentro del horno, donde la temperatura es adecuada. Es por esto que el diseño de los hornos debe realizarse teniendo en cuenta el combustible que se va a utilizar, ya que cada uno tiene una cantidad de volátiles y una composición que determina la cantidad de gases generados y el tiempo de residencia que hay que dar a los gases para llegar a la combustión completa.

## **2.3 PARÁMETROS CRÍTICOS EN LA DEPURACIÓN DE GASES**

Las emisiones generadas en un proceso de combustión de biomasa dependerán, como ya se ha indicado, de la composición y pretratamiento de la biomasa, de la tecnología empleada y de las condiciones de operación.

En este sentido, los contenidos en azufre y cloro de las biomásas son bajos normalmente y no dan lugar a emisiones de SO<sub>x</sub> y HCl que requieran medidas secundarias para cumplir con la normativa. Respecto a los NO<sub>x</sub>, en algunas ocasiones, la biomasa tiene un contenido elevado de nitrógeno y se hace necesaria la implementación de medidas secundarias para reducir la concentración de NO<sub>x</sub> y cumplir con la normativa. Sin embargo, normalmente la aplicación de medidas primarias suele ser suficiente para reducir los niveles de NO<sub>x</sub>. Así pues, la materia particulada (PM) es el principal contaminante que requiere de medidas secundarias para la reducción de sus emisiones en la combustión de biomasa. Otras categorías de contaminantes regulados, como los metales pesados, las dioxinas y furanos (PCDD-F), policloro bifenilos (PCB) o los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), se presentan frecuentemente en fase sólida o asociados a ella, razón por la cual las mismas medidas secundarias implementadas para las partículas resultan relevantes para estos contaminantes.

De todas las tecnologías utilizadas como medidas secundarias para la eliminación de partículas en gases de combustión, cabe destacar la precipitación electrostática (mediante el uso de ESP, por sus siglas del inglés Electrostatic Precipitator Electrofilter), la filtración (mediante filtros textiles) y en menor proporción la separación por lavado (mediante lavadores o scrubbers). Los filtros híbridos formados por la aplicación de las dos primeras acopladas en serie se presentan como la mejor opción, no solo por su alta eficacia en la separación de la PM, sino que también por la reducción de los contaminantes asociados a ella.

### **2.3.1 PRECIPITADORES ELECTROSTÁTICOS**

Los precipitadores electrostáticos (ESP) son unos de los equipos más utilizados para el control de emisiones de PM, especialmente cuando el caudal de gases que hay que tratar es muy alto. De ahí, su elevado grado de implantación en aplicaciones industriales, que data de hace más de un siglo. Por otro lado, también son especialmente adecuados para las pequeñas estufas y chimeneas domésticas, debido a su baja pérdida de carga y sencillez de operación. Si bien, para equipos de combustión de pequeño tamaño no existe un gran número de equipos comerciales disponibles y, por tanto, su aplicación hasta el momento es reducida.

El principio de operación de un ESP consiste en hacer pasar el gas con partículas a través de un campo eléctrico, donde las partículas sólidas adquieren primero cierta carga eléctrica y, simultánea o posteriormente, son desviadas por las fuerzas electrostáticas hacia un electrodo colector donde quedan depositadas. En la mayor parte de los ESP industriales, el proceso de carga y el de recolección de las partículas tienen lugar simultáneamente, o sea, en una sola etapa. Existen, no obstante, equipos que trabajan en dos etapas. En estos equipos un primer campo eléctrico, con una fuente apropiada de iones, es el encargado de impartir carga eléctrica a las partículas, mientras que un segundo campo realiza únicamente el trabajo de recolección. La fuente de iones utilizada es de forma generalizada una descarga de corona alrededor del electrodo denominado emisor.

Los campos eléctricos utilizados son, prácticamente en su totalidad, de corriente continua, con diferencias de potencial entre los electrodos generadores del campo que pueden llegar a ser del orden de 100 kV para control de emisiones.

Para la eliminación de las partículas recogidas sobre los electrodos colectores pueden considerarse dos vías:

- En los precipitadores electrostáticos secos, el material depositado sobre los electrodos colectores se desprende periódicamente mediante golpeo mecánico, cayendo el sólido a las tolvas del equipo. La periodicidad del golpeo, su frecuencia y su intensidad, deben seleccionarse de manera que el material se desprenda en forma de fragmentos suficientemente grandes para caer a las tolvas.
- Además, para algunas aplicaciones, en lugar de la limpieza por golpeo, los electrodos colectores son rociados con agua y el sólido se retira mediante arrastre con una corriente líquida que fluye por su superficie. A este tipo de equipos, se les denomina precipitadores electrostáticos húmedos y el lodo resultante deberá ser tratado convenientemente antes de su vertido final. Para el control de emisiones de combustión de biomasa se pueden encontrar referencias de precipitadores tubulares húmedos (Pretzl 2005).

Entre las ventajas del precipitador electrostático se pueden citar:

- Baja pérdida de presión, generalmente del orden de 1 mbar o menos.
- Posibilidad de diseñar equipos capaces de operar a temperaturas más altas que las que limitan el uso de filtros textiles.

- Eficiencia de retención, casi a la altura de la de los filtros textiles.

Como desventaja se puede mencionar la falta de flexibilidad de esta tecnología para afrontar ciertos cambios en las condiciones de operación, como aumentos de caudal o de concentración de materia particulada en el gas, sin que se resienta la eficacia de retención.

Un conjunto de electrodos energizados desde una misma fuente, mecánicamente solidarios y que comparte un mismo mecanismo de golpeo se denomina un campo. En las aplicaciones industriales es frecuente disponer en un precipitador de varios campos en serie. Esto presenta las ventajas de poder alcanzar altas eficacias, poder ajustar independientemente los parámetros eléctricos de funcionamiento y los parámetros del golpeo de electrodos a la concentración de aerosol presente en cada campo, poder alternar el golpeo de los electrodos de diferentes campos, de forma que el sólido resuspendido de un campo se recolecte en los posteriores. Para eficacias del orden del 99%, en términos de masa, se suelen usar tres campos en serie; para el 99,5% y concentraciones similares a las encontradas en centrales térmicas de carbón, cuatro o más.

En cuanto a la eficacia fraccional por tamaño de partícula, los precipitadores electrostáticos presentan un mínimo de eficacia de recolección situado en tamaños entre 0,2 y 0,8 micrómetros. Esto es debido a una combinación entre los efectos de los diversos mecanismos de adquisición de carga de las partículas (carga por campo y carga por difusión) y los de su interacción con el flujo de gas en su desplazamiento hacia el electrodo colector (diferentes coeficientes de difusión).

La eficacia de un precipitador electrostático depende de una serie de parámetros básicos:

- Caudal de gas tratado (tiempo de residencia o velocidad del gas).
- El potencial eléctrico aplicado.
- Área de colección.
- Velocidad terminal de migración.
  - Campos eléctricos de carga y de colección.
  - Viscosidad del gas.
  - Constante dieléctrica de la partícula.
  - Constante dieléctrica del vacío.
  - Diámetro de la partícula.

### **2.3.2 FILTROS DE FÁBRICA O TEXTILES**

Los filtros textiles se han utilizado para la recolección de polvos finos y de partículas en humos durante más de cien años. A escala industrial, se utilizan cuando las partículas que es necesario retener presentan tamaños muy pequeños, incluso inferiores a 1 micrómetro, y se desea recogerlas en forma de polvo seco.

Los filtros textiles, denominados casi siempre filtros de mangas o de bolsas, son recolectores en los que el polvo se elimina de la corriente de gas, al pasar el gas cargado de polvo a través de una tela que puede ser de tipo tejido, fieltro, membrana porosa, etc. El filtro está dividido por una placa en dos compartimentos. Esta placa cuenta con una serie de penetraciones sobre las que se fijan los extremos abiertos de las mangas filtrantes. El compartimento del filtro en el que se introduce el gas cargado de polvo o humo se denomina “lado sucio”, mientras que el compartimento del que se extrae el gas limpio tras haber atravesado las mangas se denomina “lado limpio”.

Estos dispositivos son filtros de “superficie”, porque el polvo se recolecta en una capa sobre la superficie del medio filtrante y la capa de polvo en sí, se convierte en un medio filtrante eficaz. Los poros del medio (especialmente en las telas tejidas) suelen ser varios diámetros mayores al diámetro de las partículas de polvo. En consecuencia, la eficiencia de recolección es baja, hasta que se han recolectado las partículas suficientes para formar una “precapa” sobre la superficie de la tela. La penetración suele ser sumamente baja, excepto durante el ciclo de limpieza de la tela.

A medida que la capa de polvo retenida sobre la superficie de la tela filtrante aumenta de espesor, la pérdida de carga a través del filtro, aumenta. De este modo, llegaría un momento en el que los equipos de impulsión del gas (generalmente ventiladores) no serían capaces de mantener el caudal de gas a través del filtro. Por ello, periódicamente hay que proceder a la limpieza del filtro, eliminando el polvo retenido y comenzar un nuevo ciclo de filtración. La periodicidad con que es necesario realizar esta operación depende de la aplicación concreta y puede variar entre unos minutos y varias horas.

Los diseños actuales de filtros de mangas son de tres tipos y dependen del método de limpieza utilizado: por sacudidas, por flujo inverso y por pulsos. El filtro limpiado por sacudidas fue el primer diseño en ser desarrollado. Las mangas se sitúan con los extremos abiertos en la parte inferior, fijados a la placa que separa el lado limpio del lado sucio. Los extremos cerrados de las mangas quedan en el extremo superior, colgados de una parrilla que está conectada a un mecanismo vibrador. El gas sucio fluye hacia arriba por el interior de las mangas recolectándose, por tanto, el polvo sobre la superficie interna de estas. Para realizar la limpieza del filtro es necesario detener el flujo del gas, entonces se activa el mecanismo vibrador proporcionando a las mangas un movimiento circular de vaivén. De este modo, el polvo acumulado en las mangas se desprende y cae dentro de la tolva, situada en la parte inferior del filtro. Si el filtro ha de funcionar de forma continua, debe construirse con secciones múltiples para que una sección individual pueda ser aislada y proceder a su limpieza, mientras el gas continúa circulando a través del resto de secciones del filtro.

Los filtros con limpieza por flujo inverso son, casi siempre, de diseño igual al de los de limpieza por sacudidas, salvo que no cuentan con mecanismo vibrador. Para llevar a cabo la limpieza, también hay que interrumpir el paso de gas por el filtro. Una vez hecho esto, se utiliza un ventilador para forzar el paso de gas limpio a través de las mangas filtrantes en sentido contrario al de la circulación del gas sucio durante la filtración. O sea, el gas limpio circula desde el exterior de la manga hacia el interior aplastando parcialmente la manga para desprender el polvo recolectado. Para evitar que las mangas colapsen, se utilizan anillos cosidos a ellas.

Los filtros con limpieza por pulsos tienen un diseño ligeramente diferente a los dos tipos anteriormente descritos. Los extremos abiertos de las mangas se sitúan en la parte superior. El gas circula desde el exterior hacia el interior de las mangas, quedando el polvo retenido en la superficie exterior de las mangas. Para evitar el aplastamiento de las mangas se instala en su interior una jaula de alambre que les sirve de apoyo. Durante la limpieza, un chorro de aire a alta velocidad se hace pasar hacia el interior de cada manga a través de una tobera situada sobre la boca de esta. De este modo se induce el flujo de gas limpio a la entrada de la manga y a través de la tela hacia el lado de gas sucio. El chorro de alta velocidad pasa con pulsos cortos y repentinos, con una duración característica de 0,1 segundo, procedente de una línea de aire comprimido, por medio de una válvula de solenoide. El pulso de aire y gas limpio expande la bolsa y desprende el polvo recolectado. La presión del pulso es suficiente para desprender el polvo sin interrumpir el flujo de gas a través del filtro. Por tanto, la división del filtro en secciones múltiples no es necesaria.

Las telas utilizadas en los filtros de mangas se pueden clasificar según su método de confección y material empleado. Así, según el método de confección, se diferencian: telas tejidas y fieltros. En los filtros con limpieza mediante sacudidas, deben utilizarse telas tejidas, mientras que para los filtros con limpieza mediante pulsos resultan más recomendables los fieltros. Por otro lado, con respecto a los materiales, se emplean fibras naturales, como algodón y lana, o artificiales, como nylon, teflón, fibra de vidrio y otras. La principal limitación en la aplicación de los filtros de tela la imponen los límites de temperatura de las fibras disponibles. Así, el límite superior para las fibras naturales es aproximadamente 90°C, mientras que el uso de telas sintéticas ha ampliado los límites de temperatura hasta aproximadamente 200°C y 500°C (Tabla 9).

FIBRA (NOMBRE COMERCIAL)	COMPOSICIÓN QUÍMICA	Tª MÁX. DE OPERACIÓN	PROPIEDADES DESTACADAS
Algodón	celulosa	90°C	Económico
Nylon 66	poliamida	150°C	Buena resistencia mecánica
Fibra de vidrio	vidrio	260°C	Buena resistencia a la temperatura
Teflón	polifluoroetileno	200°C	Excelente resistencia química
Nomex	poliamida aromática de nylon (aramida)	220°C	Buena resistencia a la temperatura
Nextel	fibra cerámica	500°C	Excelente resistencia a la temperatura

Tabla 9. Fibras utilizadas para la confección de mangas filtrantes

Con respecto a la eficacia de eliminación de partículas, siempre que la instalación de las mangas, el mantenimiento y la operación del filtro sean correctos, la eficacia en la retención de los filtros de mangas es muy alta, superior al 99% en términos de masa. Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que al comenzar la operación con un tejido nuevo, la eficacia de filtración es relativamente baja. Sin embargo, los diferentes mecanismos de deposición de las partículas sobre el medio filtrante (difusión, impactación inercial, intercepción, sedimentación gravitacional, fuerzas electrostáticas, etc... ) hacen que se vayan cerrando los espacios abiertos en el tejido y se forme una torta sobre su superficie. Entonces, la eficacia de filtración va aumentando significativamente, al tiempo que se va incrementando la resistencia al paso del gas.

El diseño apropiado pasa por seleccionar una velocidad de filtración ( $v_f$ ) óptima que equilibre los costes de inversión y los costes de operación. Así, cuanto mayor es la velocidad de filtración, se precisa una menor área total de superficie filtrante ( $A_f$ ) y una menor duración del ciclo de limpieza ( $t_c$ ), pero, en contrapartida, se produce una mayor pérdida de carga en el filtro ( $\Delta P$ ) y el coste de funcionamiento, a igualdad de caudal y concentración de PM se ve incrementado.

La pérdida de carga en un filtro de mangas está determinada fundamentalmente por la suma de tres factores: la pérdida de presión debida al medio textil, la pérdida de presión por la torta de sólido y la debida al flujo del gas por los accidentes de la estructura del filtro (insignificante frente a las dos primeras).

A medida que progresa el proceso de filtración va aumentando el espesor de la torta de sólido. Por tanto, no sólo los parámetros iniciales de diseño influirán en el valor de la velocidad de filtración óptima, también otros relacionados con las características de la materia particulada: concentración y tamaño de partícula, serán determinantes en el proceso de depuración.

Por tanto, los principales parámetros que deben ser tenidos en cuenta durante la operación porque podrían afectar a la pérdida de carga ( $\Delta P$ ), alejando la velocidad de filtración real de la diseño ( $v_f$ ) y que harían variar el arrastre a través del filtro, son:

Previo a la operación

- Espesor y permeabilidad del medio textil.
- Método de limpieza (por sacudidas, por flujo inverso y por pulsos).

Durante la operación

- Espesor y permeabilidad de la torta.
- Características de la materia particulada, a separar.
- Concentración másica y en número de partículas y morfología, tamaño y composición química de las partículas).
- Densidad aparente de la torta de sólido.
- Ciclo de limpieza y presión de aire de limpieza (por flujo inverso o pulsos).
- Características del gas a tratar: caudal, viscosidad, temperatura (el límite superior es el máximo admisible por el medio filtrante y el límite inferior lo determina la aparición de condensaciones) y composición química.

### 3 CASOS PRÁCTICOS

En este apartado se recogen algunos casos prácticos en los que se muestra de forma clara la influencia de los parámetros que se han mencionado en el documento sobre la estabilidad del proceso de combustión, las emisiones generadas y la eficiencia. Se ha estudiado la influencia de aspectos asociados a la preparación de la biomasa, a las condiciones en que se lleva a cabo el proceso de combustión y a la depuración.

#### 3.1 ASOCIADOS A LA BIOMASA Y A SU PREPARACIÓN

A continuación, se muestran varios ejemplos en los que se pone de manifiesto la influencia de distintos parámetros asociados a la composición y a la preparación de la biomasa, sobre las emisiones y la eficiencia registradas durante su combustión.

##### 3.1.1 INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN DE LA BIOMASA

El CIEMAT cuenta con amplia experiencia en combustión de distintos tipos de biomasa, identificando la influencia de su composición sobre la formación de emisiones y sobre el proceso de sinterización de las cenizas. De este modo, aunque el resto de parámetros críticos tratados en este documento, puede determinar el comportamiento de la biomasa durante la combustión conjuntamente con su composición, de forma general, puede decirse que:

- La emisión de  $\text{NO}_x$  viene determinada fundamentalmente por la concentración de nitrógeno en la biomasa. Así, como ejemplo, pueden considerarse los ensayos realizados en dos calderas con biomasa de escoba (*Genista cinerascens*) y de pino que se recogen en Mediavilla et al. (2017), o los ensayos realizados en dos calderas con biomasa de brassica (*Brassica carinata*) y chopo que se recogen en Mediavilla et al. (2009), cuyos resultados se muestran parcialmente en la Tabla 10.

BIOMASA	N (% b.s.)	CALDERA	$\text{NO}_x$ (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>[1] [2]</sup>
Escoba	0,88	A	388
Escoba	0,91	B	335
Pino	0,05	A	140
Pino	0,09	B	126
Brassica	1,80	C	590
Brassica	1,80	B	478
Chopo	0,23	C	377
Chopo	0,23	B	213

b.s: base seca. [1]: Suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresado como NO<sub>2</sub>;  
[2]: Expresado a condiciones del gas: 273,15K, 101,3 kPa y 10% de O<sub>2</sub> de referencia.

Tabla 10: Influencia del contenido en nitrógeno de la biomasa sobre las emisiones de  $\text{NO}_x$ .

- La presencia de una mayor concentración de azufre en la biomasa puede conducir, entre otras cosas, a una mayor emisión de SO<sub>2</sub>. Este hecho puede apreciarse en el trabajo de Mediavilla et al. (2011), en el que, para una mejor peletización del chopo, se incorporó un aditivo que contenía azufre. En la Tabla 11 se muestran algunos resultados de la combustión de esta biomasa.

BIOMASA	S (% b.s.)	SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> ) <sup>[1]</sup>
<b>Chopo</b>	0,06	68,00
<b>Chopo + 1% lignosulfonato</b>	0,08	113,00
<b>Chopo + 5% lignosulfonato</b>	0,28	417,00
<b>Chopo + 7% lignosulfonato</b>	0,35	636,00

b.s: base seca. [1]: Expresado a condiciones del gas: 273,15K, 101,3 kPa y 10% de O<sub>2</sub> de referencia.

Tabla 11. *Influencia del contenido en azufre de la biomasa sobre las emisiones de SO<sub>2</sub>.*

- La sinterización es un fenómeno complejo en el que entran en juego distintos elementos, sus concentraciones relativas y las condiciones de operación durante la combustión. Sin embargo, puede decirse que la formación de sinterizados está fuertemente relacionada con la concentración de ciertos elementos en la biomasa. Así, por ejemplo, el aumento de metales alcalinos, como el potasio, suele conducir a la disminución de la temperatura de fusión de las cenizas y, con ello, al fenómeno de sinterización de las mismas. Por el contrario, el aumento en metales alcalinotérreos, como el calcio, produce el efecto opuesto. En los trabajos realizados por Borjabad et al. (2009) y Fernández et al. (2019) se estudia la influencia de la incorporación de aditivos a la biomasa y de la realización de mezclas entre biombras leñosas y herbáceas sobre la sinterización de las cenizas. Se observa un efecto positivo de reducción de los problemas asociados a la sinterización, con el uso de aditivos en la proporción adecuada y con la co-combustión de las biombras herbáceas con un cierto porcentaje de biombras leñosas.

### **3.1.2 INFLUENCIA DEL CONTENIDO EN HUMEDAD: COMBUSTIÓN DE ASTILLA DE PINO CON DISTINTAS HUMEDADES**

En las instalaciones de la Unidad de Procesos de Conversión Térmica del CEDER-CIEMAT se llevaron a cabo varios ensayos de combustión de astilla de pino con distinta humedad, con el objetivo de ver la influencia de este parámetro del combustible sobre el comportamiento durante su combustión. Así, se realizaron ensayos de combustión con astillas con humedad decreciente: 53%, 44%, 31%, 24% y 21%, expresados en peso y en base húmeda. En el primer caso, la baja temperatura alcanzada en el hogar debido al elevado consumo de energía por la evaporación del agua del combustible, hizo que no fuera posible desarrollar el ensayo en condiciones adecuadas, puesto que el proceso era muy inestable y las emisiones muy elevadas. El resto de ensayos fue realizado sin apreciarse problemas de operación en la caldera utilizada.

Durante los ensayos, se empleó una caldera comercial de parrilla móvil de 500 kW<sub>t</sub> que no dispone de clase según la UNE EN 303-5, con lo que no serían de aplicación los límites de emisiones



establecidos por la misma. Esta caldera dispone de varias tolvas de alimentación, dos entradas de aire independientes (primario y secundario) mediante dos soplantes y un extractor de humos que garantiza la existencia de una cierta depresión en el hogar para evitar la fuga de gases de combustión. A la salida de humos tiene un multiciclón para la eliminación de las partículas de mayor tamaño. La instalación cuenta con extracción de cenizas en continuo mediante un sistema de dos tornillos sinfín y de limpieza en continuo del interior de los tubos del intercambiador mediante soplado con aire comprimido (Figura 6).



Figura 6. Planta de combustión de parrilla móvil de 500 kW, en CEDER-CIEMAT.

En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos para la eficiencia (calculada como energía térmica transferida al agua entre la energía introducida con el combustible) y las principales emisiones de gases y partículas en la combustión de astillas de distintas humedades.

COMBUSTIBLE (Hu) UNIDAD	CLASE <sup>[1]</sup>	O <sub>2</sub> % vol	CO mg/Nm <sup>3</sup> <sup>[4]</sup>	COT <sup>[2]</sup> mg/Nm <sup>3</sup> <sup>[4]</sup>	SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> <sup>[4]</sup>	NO <sub>x</sub> <sup>[3]</sup> mg/Nm <sup>3</sup> <sup>[4]</sup>	PARTÍCULAS mg/Nm <sup>3</sup> <sup>[4]</sup>	EFICIENCIA %
Astillas (44%)	B	10,40	1.504	62	21	134	82	85,1
Astillas (31%)	A2	10,10	1.798	121	30	113	41	85,5
Astillas (24%)	A2	9,80	1.524	97	24	108	41	87,7
Astillas (21%)	A2	10,40	1.552	53	32	98	35	86,1

Hu: contenido en humedad, expresado en % en peso en base húmeda; [1]: Clasificación de calidad según UNE-EN ISO 17225-4;

[2]: Compuestos orgánicos totales, expresados como C; [3]: Suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresado como NO<sub>2</sub>;

[4]: Expresado a condiciones del gas: 273,15K, 101,3 kPa y 10% de O<sub>2</sub> de referencia.

Tabla 12. Emisiones y eficiencia para cada tipo de astilla, en función de su humedad.

A medida que disminuye la humedad de las astillas, puede verse cómo se produce un descenso en la concentración de partículas emitidas por chimenea (desde 82 a 35 mg/Nm<sup>3</sup>) y un aumento en la

eficiencia del proceso de combustión. Con esto, se aprecia un claro efecto de la humedad del combustible sobre el proceso de combustión y sobre la eficiencia del mismo.

### 3.1.3 INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA: COMBUSTIÓN DE ASTILLA DE PINO CON DISTINTO CONTENIDO EN FINOS

Para analizar la influencia del contenido en finos de la biomasa sobre las emisiones obtenidas durante su combustión, se llevaron a cabo dos ensayos con astillas de pino con la misma humedad (próxima al 24% en peso, en base húmeda) pero con dos contenidos en finos diferentes. El contenido en finos de la biomasa en muchas ocasiones está relacionado con la presencia de áridos que se arrastran con la biomasa durante su manejo y, por tanto un mayor contenido en finos, suele estar relacionado con un mayor contenido en cenizas que, a su vez, deben ser extraídas de los equipos de combustión. Además, es muy frecuente que estos áridos, por su reducido tamaño, sean arrastrados por el propio aire de combustión hacia la chimenea en forma de partículas. De ahí surge el interés de reducir el contenido en partículas finas de la biomasa, en la medida de lo posible.

Para los ensayos, se partió de una astilla de pino de clase A2, según la norma UNE-EN-ISO 17225-4, con un 20% en peso de partículas por debajo de 3,15 mm y un contenido en cenizas de 1.3% (en base seca, b.s.). Esta astilla fue cribada en las instalaciones de pretratamiento que la Unidad de Biomasa tiene en el CEDER-CIEMAT, obteniéndose una astilla de clase A1, según la misma norma, con un 6% en peso de partículas por debajo de 3,15 mm y un contenido en cenizas del 0,6% (b.s.).

Los ensayos de combustión se llevaron a cabo en la instalación comercial de parrilla móvil de 500 kW<sub>t</sub> descrita en el apartado 4.1.1 (Figura 6), sin registrarse ningún problema de funcionamiento durante las pruebas.

En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos para la eficiencia (calculada como energía térmica transferida al agua entre la energía introducida con el combustible) y las principales emisiones de gases y partículas en la combustión de las dos astillas con distinto contenido en finos.

COMBUSTIBLE (Hu) UNIDAD	CLASE <sup>[1]</sup>	O <sub>2</sub> % vol	CO mg/Nm <sup>3</sup> [4]	COT <sup>[1]</sup> mg/Nm <sup>3</sup> [4]	SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> [4]	NO <sub>x</sub> <sup>[3]</sup> mg/Nm <sup>3</sup> [4]	PARTÍCULAS mg/Nm <sup>3</sup> [4]	EFICIENCIA %
Astillas (24%)	A2	9,80	1.524	97	24	108	41	87,7
Astillas cribadas (24,8%)	A1	10,10	1.074	59	29	97	29	92,3

Hu: contenido en humedad, expresado en % en peso en base húmeda;

[1]: Clasificación de calidad según UNE-EN ISO 17225-4;

[2]: Compuestos orgánicos totales, expresados como C;

[3]: Suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresado como NO<sub>2</sub>;

[4]: Expresado a condiciones del gas: 273,15K, 101,3 kPa y 10% de O<sub>2</sub> de referencia.

Tabla 13 Emisiones y eficiencia para cada tipo de astilla, en función de su contenido en finos.

Al cribar las astillas y reducir su contenido en partículas finas, se produce un descenso en la concentración de partículas emitidas por chimenea (desde 41 a 29 mg/Nm<sup>3</sup>), al mismo tiempo que la eficiencia experimenta un incremento notable (desde 87.7 a 92.3%). Además, se observa un

descenso de las emisiones de CO y de COT (compuestos orgánicos totales) como consecuencia de una mejora en el proceso de combustión.

Así pues, se puede concluir que se observa un claro efecto positivo en las emisiones y en la eficiencia al reducir el contenido en finos de la biomasa, tras cribar la biomasa.

### **3.1.4 INFLUENCIA DE LA DENSIDAD: COMBUSTIÓN DE ASTILLA DE OLIVO Y DE PÉLETS DE OLIVO**

En el marco del proyecto CLEANBIOM se llevaron a cabo ensayos de combustión de astillas de poda de olivo y de pélets obtenidos a partir de estas, con el fin de evaluar la influencia de la densidad del combustible sobre el proceso de combustión. Cabe destacar que los pélets, además de poseer una mayor densidad, son mucho más uniformes en propiedades químicas y más homogéneos en tamaño, siendo además más sencilla y continua su alimentación.

Los ensayos tuvieron lugar en la misma instalación y en las mismas condiciones de operación, con el fin de obtener datos comparables.

Se utilizó una planta piloto de combustión en lecho fluidizado burbujeante de  $1\text{MW}_t$  de potencia térmica, ubicada en las instalaciones del CEDER-CIEMAT. La planta dispone de varias tolvas de alimentación para combustibles de distinta densidad y tamaño de partícula. Por otro lado, una soplante se encarga de introducir el aire de fluidización (que actúa además como aire primario) y el aire secundario de combustión que garantiza la oxidación completa de los compuestos volátiles. En la salida del horno, existe un intercambiador de calor que disminuye la temperatura de los humos antes de ser introducidos en un electrofiltro y un filtro de mangas para la eliminación de las partículas formadas durante el proceso de combustión. En la Figura 7 se puede ver una imagen de la planta piloto utilizada en los ensayos.

Durante los ensayos no se observó ningún problema destacable de operación, si bien, la alimentación de las astillas al interior del horno, presentó una cierta discontinuidad a consecuencia de su mayor heterogeneidad en el tamaño de partícula.



*Figura 7. Planta de combustión de lecho fluidizado de  $1\text{MW}_t$  (izquierda) y línea de depuración del gas (derecha), en CEDER-CIEMAT.*

En la Tabla 14 se recogen la humedad y las cenizas de los dos combustibles (astillas y pélets obtenidos a partir de ellas), así como las principales emisiones gaseosas registradas durante el estado estacionario.

COMBUSTIBLE UNIDAD	HUMEDAD % peso, b.h.	CENIZAS % peso, b.s.	O <sub>2</sub> % vol	CO mg/Nm <sup>3</sup> [3]	COT <sup>[1]</sup> mg/Nm <sup>3</sup> [3]	SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> [3]	NO <sub>x</sub> <sup>[2]</sup> mg/Nm <sup>3</sup> [3]
Astillas de poda de olivo	9	9,20	8	6.158	66	0,00	142
Pélets de astilla de poda de olivo	8	6,50	7	532	0	0,00	202

[1]: Compuestos orgánicos totales, expresados como C; [2]: Suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresado como NO<sub>2</sub>;

[3]: Expresado a condiciones del gas: 273,15K, 101,3 kPa y 10% de O<sub>2</sub> de referencia.

Tabla 14. Humedad y cenizas de las astillas y de los pélets de poda de olivo y principales emisiones registradas en los ensayos.

Se puede observar que, durante la combustión de los pélets de poda de olivo, las emisiones de CO y de COT, ambos compuestos derivados de la combustión incompleta, son muy inferiores a las registradas durante la combustión de las astillas. Así, el CO medio pasó de 6158 a 532 mg/Nm<sup>3</sup> y los COT de 66 a 0,1 mg/Nm<sup>3</sup> (todos ellos expresados al 10% de O<sub>2</sub> de referencia), al utilizar la misma biomasa peletizada.

En la Figura 8 se muestra la evolución de la concentración de O<sub>2</sub> y de CO durante los dos ensayos (ambos en base seca, estando el CO expresado al O<sub>2</sub> real). Además del distinto nivel de emisiones registrado, se puede observar una estabilidad muy superior en las emisiones durante la combustión de los pélets, asociado a una mayor homogeneidad y densidad del combustible.

Por tanto, se puede concluir que se observa un efecto claro de la densidad y homogeneidad del combustible sobre las emisiones producidas durante su combustión.

## 3.2 ASOCIADOS A LA COMBUSTIÓN

A continuación, se muestran varios ejemplos en los que se puede ver la influencia de distintos parámetros de la combustión, sobre las emisiones registradas.

### 3.2.1 INFLUENCIA DE LA ALIMENTACIÓN: OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN CALDERA DE PÉLETS

Una de las etapas más importantes para garantizar una operación homogénea y unas emisiones reducidas durante la combustión de biomasa, es la alimentación del combustible. Así pues, es muy importante garantizar una alimentación continua y uniforme para que la combustión sea adecuada.

En el marco del proyecto LIFE ENERBIOSCRUB, el personal del CEDER-CIEMAT se encargó de la medición de emisiones de gases y partículas en una caldera de 1 MW<sub>t</sub> de combustión en parrilla fija situada en Las Navas del Marqués (Ávila), que abastece de calefacción y agua caliente sanitaria a varios edificios públicos municipales. A la salida de la caldera, la instalación está dotada con un multiciclón para la eliminación de las partículas más gruesas de los gases de combustión. Además, la caldera dispone de un sistema de limpieza automática de los tubos del intercambiador, mediante

aire comprimido y extracción automática de cenizas de parrilla y de multiciclón. En la Figura 9 se muestra una foto de la caldera monitorizada en estos ensayos, realizada desde el silo de combustible.

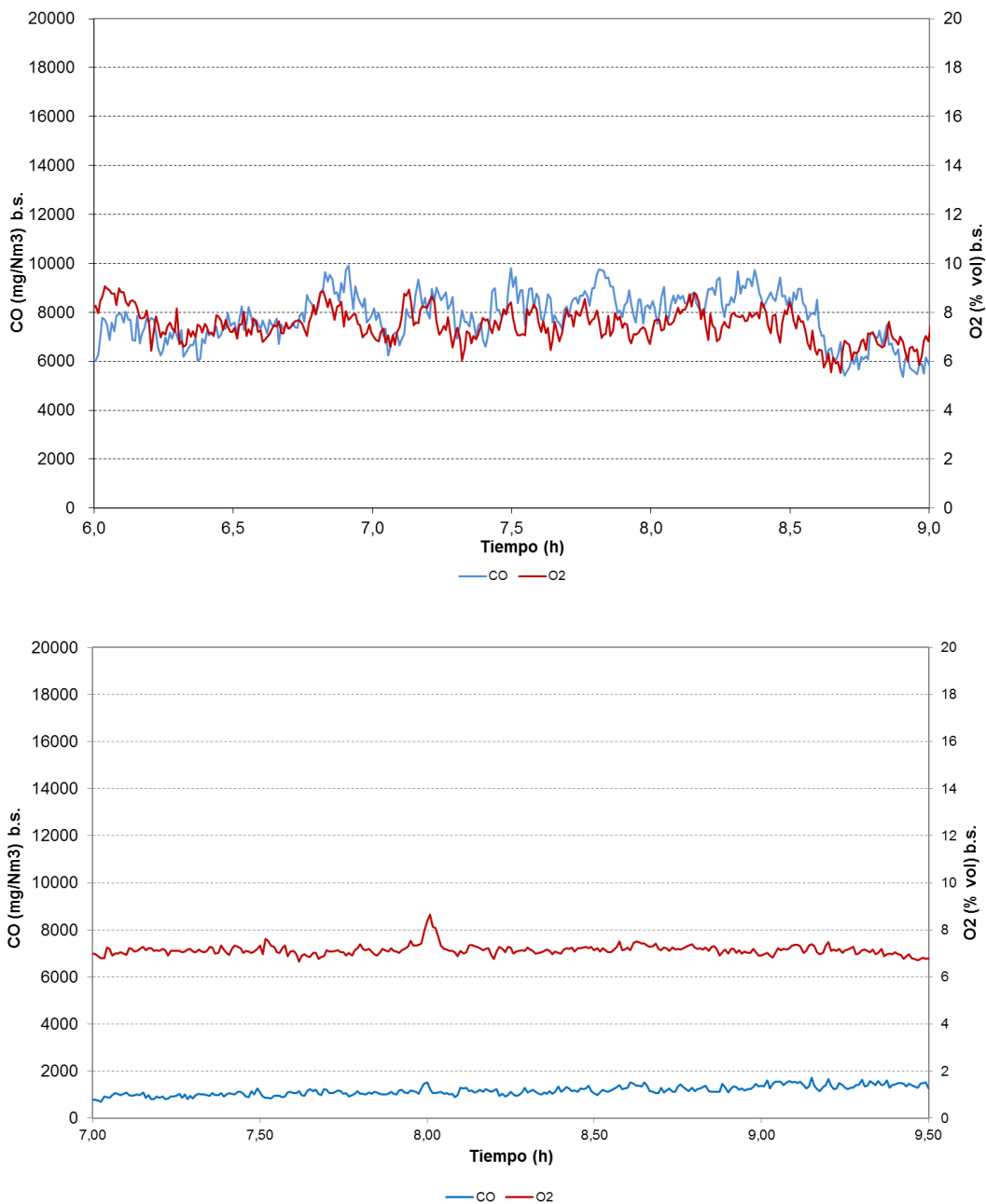


Figura 8. O<sub>2</sub> y CO registrado durante los ensayos de combustión de astillas (arriba) y de pélets (abajo) de poda de olivo.

En la Figura 10 se muestra la representación gráfica de las emisiones de CO y O<sub>2</sub> registradas durante la monitorización inicial de esta instalación mientras se quemaban pélets de escoba (*Genista cinerascens*).



Se puede ver una elevada fluctuación en las emisiones, asociada con ciclos de funcionamiento con alimentación del combustible durante 15 minutos, seguidos de una ausencia de alimentación durante 45 minutos. Además, las emisiones de CO se situaron en unos niveles muy elevados.



Figura 9. Caldera de combustión en parrilla fija de 1 MW<sub>t</sub> en Las Navas del Marqués.

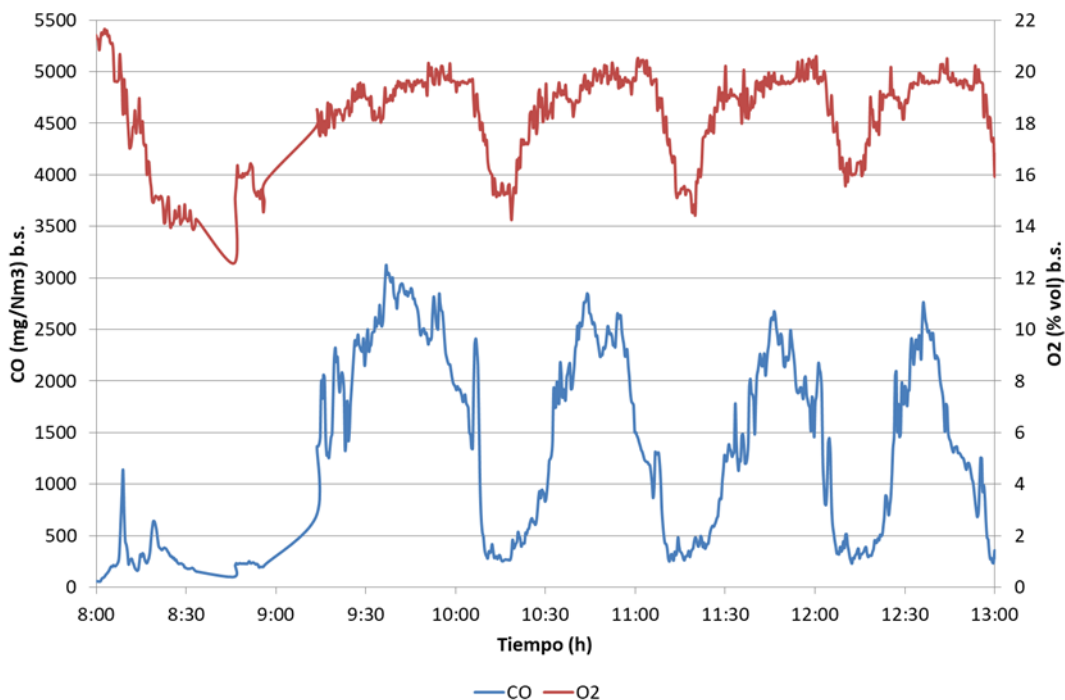


Figura 10. Emisiones de CO y O<sub>2</sub> en la caldera de Las Navas del Marqués durante la fase inicial

Durante el tiempo en el que se estuvieron midiendo las emisiones, se observó que los sinfines de alimentación a la caldera (un sinfín que divide la alimentación a otros dos) y las válvulas rotativas funcionaban de forma continua, mientras que el sinfín que salía del silo lo hacía en función de la demanda térmica con un variador de frecuencia. De este modo, los sinfines que introducían el material a la caldera y las válvulas rotativas funcionaban gran parte del tiempo en vacío y cuando la instalación demandaba calor, el tiempo de respuesta era demasiado largo puesto que, en primer

lugar, los sinfines tenían que llenarse de material. Además, cuando existía demanda térmica, mientras los citados sinfines se estaban llenando de biomasa, el lazo de control cada vez demandaba más biomasa al sinfín de salida del silo, con lo que cuando finalmente llegaba la biomasa al quemador lo hacía en cantidad elevada. En consecuencia, para evitar que la caldera se “ahogara” las clapetas manuales que regulaban los aires primario y secundario se encontraban totalmente abiertas, con lo que el oxígeno en humos era muy elevado la mayor parte del tiempo.

A la vista del funcionamiento de la instalación, se aconsejaron algunos cambios. La empresa gestora efectuó una reparación del silo de pélets y colocó dos sinfines de salida del silo. Una vez realizados estos cambios, se llevaron a cabo nuevas medidas de emisiones mientras se quemaban pélets de matorral. En la Figura 11, puede verse cómo, al controlar la alimentación del combustible, se consiguió una mayor estabilidad en las emisiones y unos niveles inferiores de CO. Cabe mencionar que los picos de CO registrados, se corresponden con etapas de limpieza del quemador, momentos en los que entraba en funcionamiento el empujador de cenizas, provocando una elevación temporal de las emisiones de CO y un descenso en la concentración de O<sub>2</sub>.

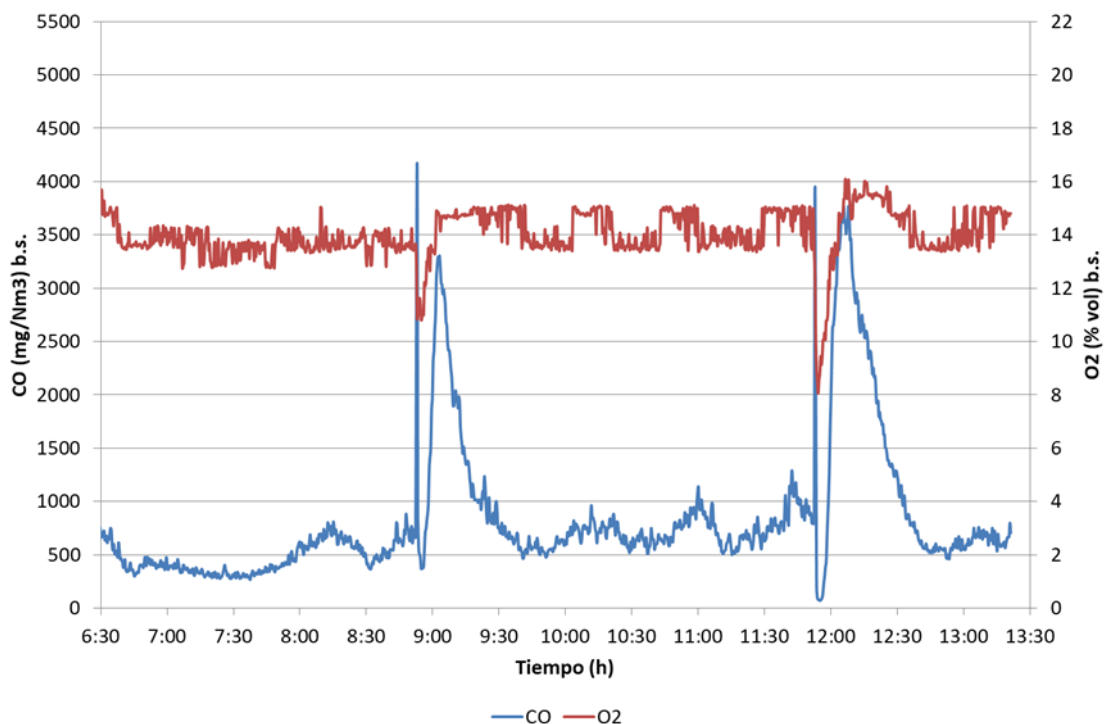


Figura 11. Emisiones de CO y O<sub>2</sub> en la caldera de Las Navas del Marqués durante la operación mejorada

En la Tabla 15 se recogen los valores medios de las emisiones registradas tanto en la operación inicial de la instalación, como tras realizar la optimización del funcionamiento de la alimentación. Puede verse que el cambio en las emisiones ha sido notable al garantizar la continuidad en la alimentación de biomasa a la caldera, sobre todo en lo que se refiere al CO y las partículas.

PARÁMETRO	UNIDAD	ESTUFA	CALDERA
O <sub>2</sub>	%, b.s.	18,40	15
CO <sub>2</sub>	%, b.s.	1,90	5
CO	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	9.139,00	1.312
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1][2]</sup>	346,00	428
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	n.d.	7
HCl	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	1,20	2
COT	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1][3]</sup>	73,00	16
Partículas	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	453,00	166

COT: compuestos orgánicos totales; b.s.: base seca; n.d.: no disponible; [1]: referido al 10% de O<sub>2</sub>; [2]: suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresados como NO<sub>2</sub>; [3]: expresados como C

Tabla 15. Valores medios de la composición del gas en las instalaciones de Las Navas del Marqués con funcionamiento inicial de alimentación y optimizado

### 3.2.2 INFLUENCIA DE LA TECNOLOGÍA ELEGIDA: COMBUSTIÓN DE PÉLETS DE PODA DE OLIVO Y DE HUESO DE ACEITUNA EN UNA CALDERA Y EN UNA ESTUFA

Uno de los aspectos que más influencia tiene sobre las emisiones producidas durante la combustión de biomasa es la tecnología del equipo utilizado.

En este sentido, en el marco del proyecto BIOMASUD PLUS, se llevaron a cabo ensayos de combustión de pélets de poda de olivo y de hueso de aceituna en dos equipos diferentes: una estufa y una caldera, ambas del sector doméstico.

La estufa es de 10,4 kW<sub>t</sub> de potencia nominal con alimentación superior, limpieza del quemador automática y limpieza manual de los tubos y permite calentar varias estancias de forma simultánea, mediante la canalización del aire caliente. Está diseñada para la utilización de pélets A1 o A2, según estándar UNE-EN-ISO 17225-2 y hueso de aceituna A1 o A2, según estándar UNE 164003, cambiando los ajustes de funcionamiento.

Por otro lado, la caldera utilizada es de 25 kW<sub>t</sub> de potencia nominal y está diseñada para la utilización de pélets A1, según estándar UNE-EN-ISO 17225-2. Posee un quemador de afloración y un intercambiador de calor de un altísimo rendimiento, debido a su diseño en espiral. Dispone de limpieza del quemador automática mediante un sistema patentado y limpieza automática de los tubos, mediante agua.

Los dos equipos se muestran en la Figura 12.

En la Tabla 16 se muestran los valores medios de las emisiones registradas durante la combustión de pélets de poda de olivo en ambos equipos. Además, en la Tabla 17 se recogen los resultados de las emisiones obtenidas durante la combustión de hueso de aceituna en ambos equipos.





Figura 12. Estufa (izquierda) y caldera (derecha) utilizadas en los ensayos.

PARÁMETRO	UNIDAD	ESTUFA	CALDERA
O <sub>2</sub>	%, b.s.	13,90	7
CO <sub>2</sub>	%, b.s.	6,70	13
CO	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	1.326,88	138
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1][2]</sup>	273,63	271
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	0,22	12
HCl	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	0,00	1
COT	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1][3]</sup>	14,03	2
Partículas	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	87,11	15

COT: compuestos orgánicos totales; b.s.: base seca; [1]: referido al 10% de O<sub>2</sub>; [2]: suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresados como NO<sub>2</sub>; [3]: expresados como C

Tabla 16. Valores medios de las emisiones registradas en la combustión de hueso de aceituna en la estufa y en la caldera

PARÁMETRO	UNIDAD	ESTUFA	CALDERA
O <sub>2</sub>	%, b.s.	16,50	7
CO <sub>2</sub>	%, b.s.	3,80	13
CO	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	2.605,63	1.455
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1][2]</sup>	591,25	528
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	1,13	3
HCl	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	0,00	1
COT	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1][3]</sup>	51,70	11
Partículas	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	405,63	111

COT: compuestos orgánicos totales; b.s.: base seca; [1]: referido al 10% de O<sub>2</sub>; [2]: suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresados como NO<sub>2</sub>; [3]: expresados como C

Tabla 17. Valores medios de las emisiones registradas en la combustión de pélets de poda de olivo en la estufa y en la caldera

En ambos casos puede verse que las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y HCl dependen fundamentalmente de la composición del combustible y, por tanto, alcanzan valores muy similares en la estufa y en la caldera para un mismo combustible.

Sin embargo, se observa que los valores obtenidos para CO y COT, que son productos de la combustión incompleta, son muy diferentes en las dos tecnologías utilizadas. Así, se puede ver que, en el caso del hueso de aceituna el CO es 10 veces superior y los COT son 7 veces más altos, en la estufa que en la caldera. Esta misma tendencia se observa en la combustión de pélets de poda de olivo, siendo el CO el doble y los COT 5 veces más altos en la estufa que en la caldera. En cuanto a las partículas, se observan también unos valores muy superiores en el caso de la estufa, que son 6 veces más altas en el hueso y 4 veces más altas en los pélets de olivo.

Esto nos indica que el tiempo de residencia de los gases es insuficiente en el caso de la estufa, de manera que no se completa la combustión en fase gaseosa y se obtienen mayores concentraciones de CO y COT a la salida. En cuanto a las partículas, la estufa trabaja con un mayor exceso de aire de combustión (mayor porcentaje de O<sub>2</sub> en humos), que provoca un mayor arrastre de partículas hacia la chimenea.

Con estos resultados queda claramente de manifiesto la gran influencia que tiene la tecnología utilizada y el diseño de los equipos de combustión sobre las emisiones.

### ***3.2.3 INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DE AIRE: COMBUSTIÓN DE ASTILLA DE OLIVO CON DISTINTA PROPORCIÓN DE AIRE PRIMARIO Y SECUNDARIO***

En general, la biomasa se caracteriza por tener un alto contenido en volátiles, que arden en fase gaseosa al desprenderse del residuo sólido durante la combustión. Por este motivo, es necesario tener una distribución adecuada del aire entre las distintas partes de la cámara de combustión para alcanzar así un buen rendimiento y lograr unas emisiones de contaminantes bajas. De este modo, el aire primario es aquel que entra en contacto con el combustible sólido en primer lugar favoreciendo su combustión. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, es necesaria la introducción de un aire secundario con el fin de garantizar la combustión de los gases producidos y lograr así una reducción de la emisión de compuestos gaseosos derivados de la combustión incompleta.

Por este motivo, un parámetro de funcionamiento que es necesario optimizar durante el proceso de combustión de biomasa es la relación de aire primario y secundario que se introduce en el combustor. Para ver la influencia de este parámetro, se llevaron a cabo algunos ensayos en la planta piloto de combustión en lecho fluidizado burbujeante de 1 MW<sub>t</sub> ubicada en el CEDER-CIEMAT y que aparece descrita en el apartado 4.2.3, en el marco del proyecto CLEANBIOM.

Para realizar este estudio, se utilizaron pélets de olivo como combustible y se trabajó en las mismas condiciones de operación en la planta (potencia y flujo y temperatura del aire de combustión) en ambos casos, excepto en lo que respecta a la proporción de aire secundario introducido. De este modo, se utilizó la misma cantidad de combustible y de aire de combustión, pero se varió la proporción de aire primario y secundario.

En la Tabla 18 se muestran los valores medios de las emisiones registradas durante el período estacionario, junto con la proporción de aire secundario utilizada en cada caso.

Se puede ver cómo al utilizar una proporción de aire secundario mayor (69% frente a 46% del aire total), se produce un descenso significativo en las emisiones de CO y COT desde 2379 a 532 mg/Nm<sup>3</sup> y desde 6,8 a 0 mg/Nm<sup>3</sup> (todos ellos al 10% de O<sub>2</sub> de referencia), respectivamente. Ambos compuestos gaseosos se generan como consecuencia de una combustión incompleta de los gases generados durante la volatilización de la biomasa. A la vista de los resultados de la Tabla 18 se aprecia que efectivamente al utilizar una mayor proporción de aire secundario esta combustión llega a completarse en mayor medida, mejorando el comportamiento durante el proceso y, por tanto, las emisiones generadas.

UNIDAD	Aire 2º/Aire total %	O <sub>2</sub> % vol	CO mg/Nm <sup>3</sup> [3]	COT <sup>[1]</sup> mg/Nm <sup>3</sup> [3]	SO <sub>2</sub> mg/Nm <sup>3</sup> [3]	NO <sub>x</sub> <sup>[2]</sup> mg/Nm <sup>3</sup> [3]
Bajo aire 2º	46	5,8	2.379	6,8	3,1	137
Alto aire 2º	69	6,7	532	0,13	0,0	202

[1]: Compuestos orgánicos totales, expresados como C; [2]: Suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresado como NO<sub>2</sub>; [3]: Expresado a condiciones del gas: 273,15K, 101,3 kPa y 10% de O<sub>2</sub> de referencia.

Tabla 18. Valores medios de la composición del gas registrados en los ensayos, operando con baja y con alta proporción de aire secundario.

### 3.2.4 INFLUENCIA DEL AJUSTE DE LA EXTRACCIÓN DE HUMOS: OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA EXTRACCIÓN DE HUMOS EN UNA CALDERA DE PÉLETS

La extracción de humos, además de regular la presión en el interior del hogar, permite controlar la introducción de aire en la cámara de combustión y el tiempo de residencia de los humos tanto dentro de la cámara como en el intercambiador de calor. De este modo, la extracción de humos influye tanto sobre las emisiones de la combustión como sobre el intercambio de calor entre los humos y el agua (en el caso de las calderas).

En el marco del proyecto LIFE ENERBIOSCRUB, el personal del CEDER-CIEMAT se encargó de la medición de emisiones de gases y partículas en una caldera de afloración con una potencia térmica de 400 kW<sub>t</sub> situada en Fabero (León). Esta instalación, que se utiliza para proporcionar calefacción a distintos edificios públicos, se encuentra conectada a un depósito de inercia y cuenta con un ciclón para la eliminación de partículas. Su combustible habitual son los pélets de madera y durante la monitorización de la instalación se emplearon pélets de brezo (*Erica arbórea*). En la Figura 13 puede verse una fotografía de la sala de calderas.

Durante la monitorización inicial de la instalación, se obtuvieron elevadas emisiones que pueden verse tanto en la Figura 14 como en la Tabla 19. Además, son destacables tanto los cortos ciclos de funcionamiento como el alto contenido de oxígeno en humos. En esta etapa de medida, en la cual se operó la instalación bajo la demanda habitual del horario de mañana, se observó que el extractor de humos no funcionaba de forma permanente regulándose sus revoluciones con un lazo de control, sino que se ponía en marcha intermitentemente, empezando con altas revoluciones, con lo que se generaba un importante arrastre de partículas hacia la chimenea. Además, el elevado porcentaje de

oxígeno en humos hacía pensar que la sonda de oxígeno de la caldera no estaba funcionando correctamente o no actuaba de forma apropiada sobre ningún lazo de control.



Figura 13. Caldera de biomasa monitorizada en Fabero (León)

Habiéndose puesto en conocimiento del gestor de la instalación estas observaciones y tras la confirmación del ajuste del lazo de control correspondiente a la extracción de humos, se procedió a medir nuevamente las emisiones durante la operación bajo demanda habitual de calefacción, observándose una operación más estable y con menores emisiones que en la fase inicial, como puede verse en la Figura 15 y en la Tabla 19.

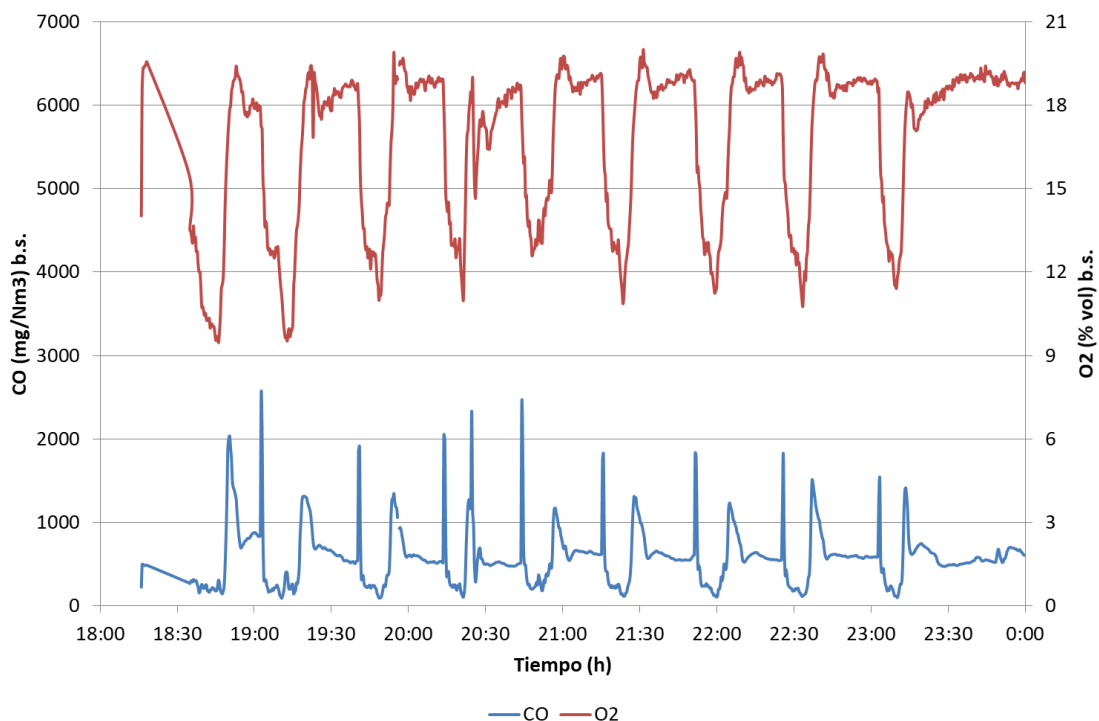


Figura 14. Emisiones de CO y O<sub>2</sub> en la caldera de Fabero durante la fase inicial

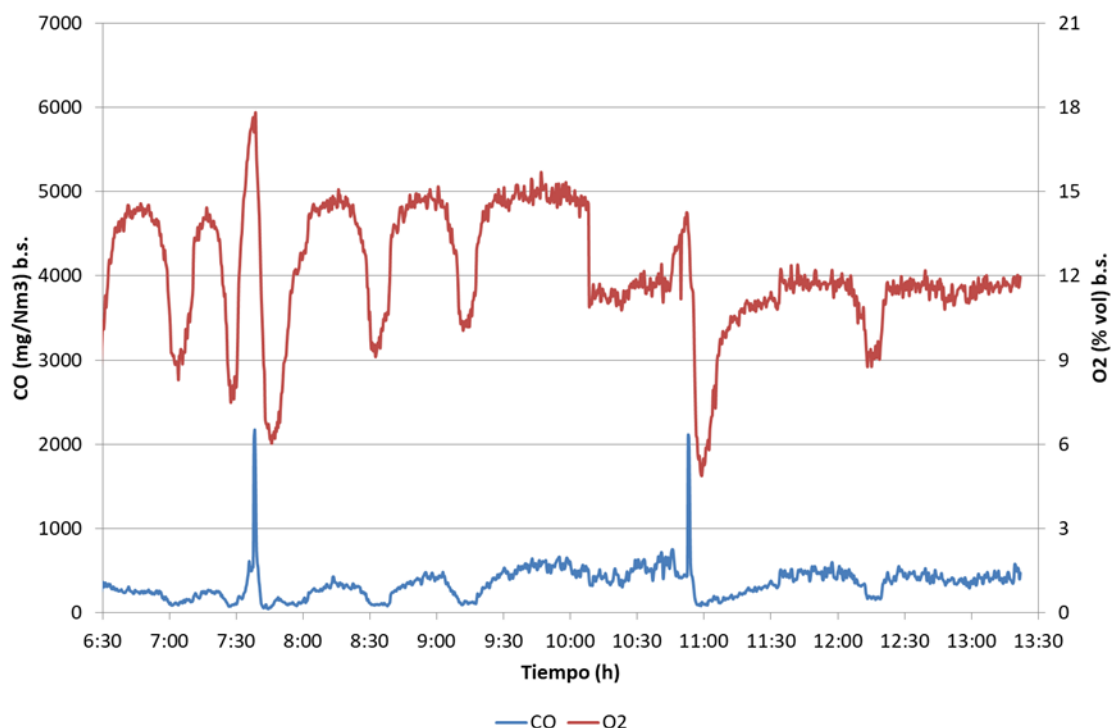


Figura 15. Emisiones de CO y O<sub>2</sub> en la caldera de Fabero durante la operación mejorada

PARÁMETRO	UNIDAD	INICIAL	OPTIMIZADO
O <sub>2</sub>	%, b.s.	17	14,90
CO <sub>2</sub>	%, b.s.	3,8	1,80
CO	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	2.437	1645,00
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1][2]</sup>	240	169,00
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	49	22,00
HCl	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	3,6	25,00
COT	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1][3]</sup>	139	417,00
Partículas	mg/Nm <sup>3</sup> , b.s. <sup>[1]</sup>	489	48,00

COT: compuestos orgánicos totales; b.s.: base seca; [1]: referido al 10% de O<sub>2</sub>; [2]: suma de NO y NO<sub>2</sub>, expresados como NO<sub>2</sub>; [3]: expresados como C

Tabla 19. Valores medios de la composición del gas en las instalaciones de Fabero durante la fase inicial y con la extracción de humos optimizada

Si se comparan las medidas realizadas en la etapa inicial con aquellas en las que existió una demanda de calefacción similar (esto es, en el horario de mañana), puede apreciarse que la mejora en el lazo de control de la extracción de humos condujo a unas emisiones más estables y con menos picos, como puede verse al comparar la Figura 14 con la Figura 15. Además, las emisiones de CO y partículas se redujeron de forma considerable (Tabla 19).

Por tanto, es necesario un régimen regular de presiones en la cámara de combustión para conseguir un funcionamiento estable con bajas emisiones.

### 3.3 ASOCIADOS A LA DEPURACIÓN DE GASES

En el marco del proyecto CLEANBIOM, CIEMAT llevó a cabo varios ensayos de combustión en la planta piloto de lecho fluidizado burbujeante descrita en el apartado 4.2.3 y que se muestra en la Figura 7.

La finalidad de estos ensayos era evaluar la concentración de las partículas generadas en los gases de combustión antes y después del sistema de depuración, formado por un filtro híbrido, constituido por un módulo electrofiltro y un módulo filtro de mangas, al operar en varias condiciones diferentes.

El módulo electrofiltro está formado por un campo eléctrico y dos campos mecánicos en serie, con una superficie de precipitación de 33,6 m<sup>2</sup> y una longitud efectiva de electrodos de emisión de 67,2 m. La limpieza de los electrodos se realiza por golpeteo con martillos, recogiendo las partículas en cuatro tolvas.

A la salida del módulo electrofiltro, se encuentra instalado un filtro textil cuya limpieza se hace por pulsos de aire comprimido y es de fácil acceso para la sustitución y mantenimiento de las telas filtrantes, que en este caso fueron filtros de poliéster. Dispone de una superficie de filtración de 30 m<sup>2</sup> y puede trabajar a una temperatura de hasta 200°C.

Ambos equipos están calorifugados y traceados eléctricamente para evitar que se produzca una bajada drástica de la temperatura del gas y, como consecuencia de ella, condensaciones en el interior de los equipos.

Durante los ensayos, el filtro híbrido trabajó a una temperatura entre 150 y 200°C, situándose el voltaje aplicado al módulo electrofiltro entre 23 y 25 kW (Tabla 20). La limpieza de los campos de precipitación electrostática se realizó cada 90 minutos en el primero y cada 60 minutos en el segundo.

En la Tabla 20 se muestra el voltaje medio aplicado durante cada ensayo, la superficie específica de colección calculada para el caudal medio de gases durante el ensayo y la velocidad de migración efectiva.

	<b>VOLTAJE MEDIO</b> kV	<b>SUPERFICIE ESPECÍFICA DE</b> <b>COLECCIÓN</b> m <sup>2</sup> /(m <sup>3</sup> /h)	<b>VELOCIDAD DE MIGACIÓN</b> <b>EFFECTIVA</b>
<b>Ensayo 1</b>	23,28	0,01387	0,37
<b>Ensayo 2</b>	24,25	0,01383	0,44
<b>Ensayo 3</b>	24,28	0,01326	0,48
<b>Ensayo 4</b>	24,69	0,01476	0,60

Tabla 20. *Parámetros de funcionamiento del módulo electrofiltro durante los ensayos*

En el módulo de filtro textil, la limpieza de cada uno de los ocho grupos de bolsas se realizó secuencialmente con un intervalo de 999 segundos entre cada módulo. La presión de los pulsos de limpieza fue de 5 barg. Debido a que la gran mayoría de la ceniza de captó en el módulo

electrofiltro, la pérdida de carga en el módulo de filtro textil se mantuvo muy baja, siempre inferior a 5 mbar.

En la Tabla 21 se muestra la concentración numérica de partículas antes y después de los sistemas de depuración de gases para los distintos ensayos realizados.

Se puede observar un descenso muy significativo en la concentración numérica de las partículas tras ser tratado el gas en los equipos de depuración, lo que demuestra la alta eficacia de los filtros híbridos.

	<b>PARTÍCULAS ANTES DE DEPURACIÓN</b> número/cm <sup>3</sup>	<b>PARTÍCULAS DESPUÉS DE DEPURACIÓN</b> número/cm <sup>3</sup>	<b>EFICACIA</b> %
<b>Ensayo 1</b>	43.100	205	99,52%
<b>Ensayo 2</b>	380.000	810	99,79%
<b>Ensayo 3</b>	430.000	827	99,81%
<b>Ensayo 4</b>	144.000	310	99,78%

*Tabla 21. Concentración numérica de partículas antes y después de depuración obtenida en los ensayos de combustión de astilla de olivo*

La mayor parte de la ceniza volante retenida en el filtro híbrido, lo fue en el módulo electrostático, siendo superior al 80% del total, expresada en masa, en prácticamente todos los ensayos. La eficacia fraccional del filtro híbrido, aun siendo siempre muy alta, presentó un mínimo para un tamaño de partícula de alrededor de 0,4 µm.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Agencia Andaluza de la Energía. 2018. La bioenergía en Andalucía.
- [2] Borjabad, E., Mediavilla, I., Fernández, M.J., Barro, R., Ramos, R., Esteban L., Carrasco, J. Utilization of limestone to reduce slagging and fouling in combustion of herbaceous biomass pellets. Proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition (209) 1422-1428.
- [3] Basu, P. 2006. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. CRC Press. Taylor and Francis Group. ISBN 0849333962.
- [4] Fernández Llorente M.J., Carrasco García J.E. Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion. Fuel 84 (2005) 1893-1900.
- [5] Fernández, M.J., Mediavilla, I., Barro, R., Borjabad E., Ramos R., Carrasco, J.E. Sintering reduction of herbaceous biomass when blended with woody biomass: predictive and combustion tests. Fuel 239 (2019) 115-1124.
- [6] Mediavilla, I., Borjabad, E., Fernández, M.J., Ramos, R., Esteban, L.S., Carrasco, J.E. Combustion of Spanish energy crops pellets in two boilers of the household sector. Proceedings of the 17th European Biomass Conference and Exhibition (2009) 1382-1388.
- [7] Mediavilla, I., Alfaro, N., Esteban, L.S., Carrasco J.E. Influence of lignosulphonate addition on poplar pelletisation and combustion. Proceedings of the 19th European Biomass Conference and Exhibition (2011) 1271-1276.
- [8] Mediavilla, I., Borjabad, E., Fernández, M.J., Ramos R., Pérez, P., Bados, R., Carrasco, J.E., Esteban, L.S. Biofuels from broom clearings: Production and combustion in commercial boilers. Energy 141 (2017) 1845-1856.
- [9] Nussbaumer, T. 2003. Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies and primary measures for emission reduction. Energy & Fuels 17, 1510-1521.
- [10] Pérez, V, Arenales, J., Murillo, J.M., Pascual, A., Ramos, R., Sánchez, J.M. 2014. Thermal degradation of pine, poplar and brassica using TGA. Proceedings of 5th International Symposium on Energy from Biomass and Waste. 17-20 noviembre 2014. Venice (Italia).
- [11] Pretzl, R. 2005. Möglichkeiten der partikelabscheidung und energie-kostenoptimierung durch wärmerückgewinnungsverfahren. Mitteleuropäische Biomassekonferenz 2005. 26-29 enero Graz (Austria).
- [12] Sommersacher P., Brunner T., Obernberger I. Fuel indexes: a novel method for the evaluation of relevant combustion properties of new biomass fuels. Energy & Fuels 26 (2012) 380-390.
- [13] UNE 164003:2014. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de biocombustibles. Huesos de aceituna.



- [14] UNE 164004:2014. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de biocombustibles. Cáscaras de frutos.
- [15] UNE-EN ISO/FDIS 17725-2:2014. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera.
- [16] Van Loo, S. y Koppejan, J. 2010. The handbook of biomass combustion & co-firing. Earthscan.
- [17] 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.

