



Control de emisiones de partículas en equipos de combustión de biomasa

Raquel Ramos, Elena Borjabad, Irene Mediavilla, Jesús Rodríguez-Maroto, David Sanz, Enrique Rojas

CIEMAT | www.ciemat.es



En una sociedad comprometida con un desarrollo sostenible, el uso de biomasa para producción de calor y electricidad constituye una importante fuente de energía renovable. Su creciente utilización en sustitución de combustibles fósiles puede reducir significativamente las emisiones de CO₂. No obstante, durante los últimos años se habla de

sostenibilidad de la biomasa, y han de tenerse en cuenta las implicaciones medioambientales que conlleva su utilización [1]. En particular, las emisiones de partículas están recibiendo especial atención. En algunas zonas, notablemente en Centroeuropa y Escandinavia, donde la biomasa goza de gran implantación en el sector doméstico y de pequeña potencia, se han identificado

sus emisiones como un factor relevante del deterioro de la calidad del aire [2]. Este hecho ha motivado un impulso a la actividad en investigación, tanto de caracterización de emisiones como de desarrollo de equipos de control, y en promulgación de legislación a nivel nacional y europeo. Para el cumplimiento de estas nuevas regulaciones se estima precisa la utilización de equipos de



control de emisiones de partículas. En este artículo se hace una somera presentación de dichos equipos aplicados a la combustión de biomasa.

EMISIONES DE PARTÍCULAS EN COMBUSTIÓN DE BIOMASA

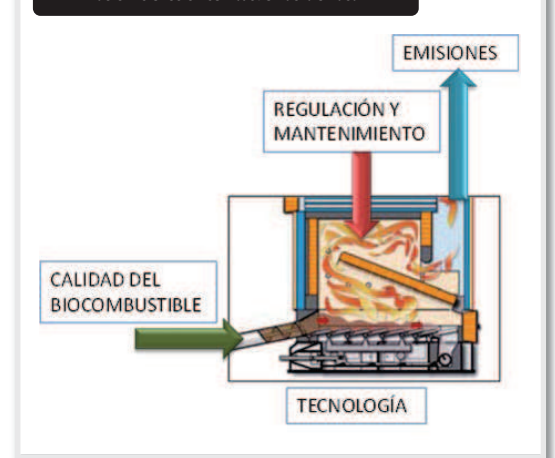
De forma general, la materia particulada (PM, del inglés particulate matter) procedente de procesos industriales se emite como partículas sólidas o gotas líquidas (figura 1). Las partículas que son emitidas al aire directamente se denominan “partículas primarias”, y las formadas posteriormente a la emisión a partir de reacciones químicas de los gases emitidos y también con partículas primarias son “partículas secundarias”. En ingeniería ambiental, se denomina aerosol a un coloide de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas, de ahí que muchas veces se hable también de aerosoles primarios y secundarios.

En combustión de biomasa estas partículas, se componen de agua, ácidos, amoníaco, black carbon (o “carbono elemental”), compuestos orgánicos (COV, PAHs, etc.) e inorgánicos (“cristal”), y elementos metálicos (alcalinos, alcalinotérreos y trazas de metales pesados). Las emisiones de partículas pueden clasificarse de acuerdo con su tamaño (diámetro aerodinámico), estableciéndose las siguientes categorías: partículas totales, diámetro menor que $10\ \mu\text{m}$ (PM10), diámetro menor que $2.5\ \mu\text{m}$ (PM2.5) o partículas finas, diámetro menor que $1\ \mu\text{m}$ (PM1) y diámetro menor que $0.1\ \mu\text{m}$ (PM0.1) o partículas ultrafinas. Las partículas finas (PM2.5) emitidas durante la combustión de biomasa pueden dividirse en tres grupos, basándose en la composición química y morfología de las mismas: partículas esféricas de carbono orgánico, partículas formadas por agregados de hollín y partículas de ceniza inorgánica. Teniéndose en cuenta las condiciones de operación, puede decirse que las parti-

culas esféricas de carbono orgánico son producto de la combustión incompleta cuando hay bajas temperaturas, mientras que las partículas de hollín también proceden de la combustión incompleta, pero se emiten generalmente a temperaturas más elevadas. Por último, las partículas de ceniza volante de naturaleza inorgánica, o también llamada a veces salina, originadas por el contenido de materia inorgánica presente en la biomasa, se generan en casos de combustión completa a temperaturas elevadas [3]. Su naturaleza química es de óxido de calcio, cloruro potásico y otros compuestos inorgánicos. Además, estos tres tipos básicos de partículas pueden interaccionar entre sí y con otras especies gaseosas presentes en el gas de combustión tanto en el horno como a lo largo de los conductos de evacuación.

Aunque la formación de las partículas y por tanto sus características físico-químicas, depende en primer término del tipo y características del combustible, tecnología de combustión, así como de las condiciones de operación (figura 2), el factor de su

Figura 2. Esquema de medidas primarias para el control de emisiones en combustión de biomasa



emisión a la atmósfera está condicionada fundamentalmente a las tecnologías de depuración que se dispongan. Los factores de emisión en combustión de biomasa de uso residencial abarcan un amplio rango, mientras que los factores de emisión para instalaciones de media y gran potencia dependen fuertemente del equipo de retención de partículas instalado [4].

LEGISLACIÓN ENTRANTE

En el año 2015, se ha publicado nueva legislación europea que involucra las emisiones a la atmósfera de la com-



Figura 1. Chimenea de una caldera de combustión de biomasa



bustión de sólidos, tal como la biomasa, en equipos e instalaciones, y que hace gran incidencia en las emisiones de partículas.

La Directiva Europea 2009/125/CE insta un marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía. La trasposición nacional de esta normativa es el Real Decreto 187/2011, de 18 de febrero. Esta directiva se encuentra desarrollada en Reglamentos, que son de aplicación directa e íntegra en todos los Estados Miembros de la Unión Europea (sin necesidad de trasposición en los países), relativos a numerosos productos. En concreto, durante el año 2015 se publicó el Reglamento 2015/1185 de 24 de abril, que recoge los requisitos de diseño ecológico aplicables a los aparatos de calefacción local de combustible sólido con una potencia calorífica nominal inferior o igual a 50 kW; y el Reglamento 2015/1189 de 28 de abril, en relación con las calderas de combustible sólido de potencia calorífica nominal inferior o igual a 500 kW. Los aspectos medioambientales que se consideran importantes en esta reglamentación son el consumo de energía y las emisiones generadas de partículas (PM), compuestos orgánicos gaseosos (OGC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx) en la fase de utilización de estos equipos. Así, se establecen requisitos de eficiencia energética entre las prestaciones de los aparatos, y límites a las emisiones en el funcionamiento de los mismos, tal como recogen las tablas 1 y 2.

Mientras que las emisiones de las grandes instalaciones (> 50 MW de potencia térmica nominal), para los diferentes combustibles, han estado ya antes reguladas, y actualmente con la Directiva 2010/75/CE sobre emisiones industriales; venía existiendo en la Unión Europea un vacío de legislación para instalaciones de mediana potencia.

Tabla 1. Requisitos de ecodiseño para estufas

Reglamento 2015/1185 –APARATOS CALEFACCIÓN LOCAL DE COMBUSTIBLE SÓLIDO
(obligado cumplimiento 01/01/2022)

Límites de emisión			Eficiencia energética	
Contaminante	Tipo de aparato	mg/Nm ³ *	Tipo de aparato	%
PM	Hogar abierto	50	Hogar abierto	30
	Hogar cerrado	40[**] ó 20[***]		
OGC	Hogar abierto	120	Hogar cerrado de madera no comprimida	65
	Hogar cerrado	60		
CO	Hogar abierto	2000 ó 1500[**]	Hogar cerrado de pélet	79
	Hogar cerrado	300		
NOx	Biomasa	200	Cocinas	65
	Combustibles fósiles	300		

*A condiciones del gas de 273.15K, 101.3 kPa y 13% contenido en O₂.
[**] Para cocinas. [***] Para pélets

Tabla 2. Requisitos de ecodiseño para calderas

Reglamento 2015/1189 –CALDERAS DE COMBUSTIBLE SÓLIDO
(obligado cumplimiento 01/01/2020)

Emisiones estacionales**			Eficiencia energética	
Contaminante	Tipo de aparato	mg/Nm ³ *	Tipo de aparato	%
PM	Automático	40	Calderas de potencia ≤ 20 kW	75
	Manual	60		
OGC	Automático	20		
	Manual	30		
CO	Automático	500	Calderas de potencia > 20 kW	77
	Manual	700		
NOx	Biomasa	200		
	Combustibles fósiles	350		

* A condiciones del gas de 273.15K, 101.3 kPa y 10% contenido en O₂.
**En aparatos automáticos media ponderada de emisión a potencia calorífica nominal y emisión al 30% de la potencia calorífica nominal. Y en aparatos manuales media ponderada de la emisión a potencia calorífica nominal y emisión al 50% de la potencia calorífica nominal, o emisión a potencia calorífica nominal si no son capaces de funcionar en continuo a 50% de la potencia calorífica nominal.

Por primera vez, el pasado mes de Noviembre, el Consejo Europeo ha adoptado una nueva directiva sobre la limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de instalaciones de combustión medianas (> 1 MW y < 50 MW de potencia térmica nominal), pendiente de publicación. Esta iniciativa culmina la idea propuesta por la Co-

misión Europea ante el Consejo y el Parlamento en Diciembre de 2013 como parte del programa 'Clean Air Programme for Europe'. Se fijan los límites de emisión específicos para plantas de mediana potencia en cuanto a dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas (PM) recogidos en la tabla 3, y se establecen las reglas para monitorización del CO. Las instalacio-



Tabla 3. Requisitos de emisión en potencias medianas

Directiva UE 2015/... –INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN MEDIANA VALORES LÍMITE DE EMISIÓN - BIOMASA SÓLIDA				
	Plantas existentes		Nuevas plantas	
	> 1MW y < 5MW	> 5MW	> 1MW y < 5MW	> 5MW
Contaminante	mg/Nm ³ *	mg/Nm ³ *	mg/Nm ³ *	mg/Nm ³ *
SO ₂	200	200	200	200
NO _x	650	650	500	300
Partículas	50	30 y 50**	50	20 y 30**

* A condiciones del gas de 273.15K, 101.3 kPa y 6% contenido en O₂.
** En plantas con potencia térmica > 5MW y < 20MW

nes de mediana potencia tienen un amplio espectro de usos, incluyendo calefacción doméstica, producción de vapor en procesos industriales y generación eléctrica. El número actual de plantas de combustión de mediana potencia en la Unión Europea es aproximadamente 140000 y con la nueva legislación se insta al registro de instalaciones.

EQUIPOS DE COMBUSTIÓN DE BIOMASA DE PEQUEÑA POTENCIA

De acuerdo a ETP-RHC (Plataforma Tecnológica Europea sobre Calor y Frío Renovable), actualmente en Europa están instaladas alrededor de 8 millones de calderas de biomasa de pequeña potencia, y aproximadamente se instalan 300000 nuevos sistemas cada año. La combustión de biomasa en el sector residencial contribuye de forma notable a la emisión de partículas a la atmósfera, estando las características físico-químicas de estas partículas especialmente condicionadas por la calidad de la biomasa utilizada, las condiciones de operación durante la combustión y el tipo de equipo de combustión empleado (figura 3). Así, por ejemplo, en un estudio realizado con diferentes equipos, la concentración de partículas fue 180 veces superior para

una caldera de leña cuando se comparó con una caldera de pélets [5].

Con objeto de reducir la cantidad de partículas emitidas a la atmósfera debido a la combustión incompleta de la biomasa, se han ido introduciendo modificaciones en los equipos de combustión en los últimos años. De este modo, por ejemplo, se ha hecho especial hincapié en la modulación de los equipos para adaptarse a la demanda térmica, se han empleado sondas lambda para asegurar el control del ratio combustible-aire más adecuado en función de las condiciones de operación y se ha introducido aire secundario y terciario en distintos puntos de los equipos.

Sin embargo, los límites de emisión permitidos son cada vez más restrictivos, por lo que se hace necesaria la utilización de equipos que puedan acoplarse a las estufas y calderas de biomasa con la finalidad de reducir la emisión de partículas. Para que la introducción de estos equipos en el sector residencial resulte factible, deberían darse varias circunstancias, tales como, un precio no demasiado elevado, fácil acoplamiento a las calderas y estufas existentes, fácil mantenimiento y seguridad en el manejo. De este modo, se está investigando en distintas tecnologías, que se adapten al sector residencial. A continuación se muestran de forma resumida algunos de los resultados obtenidos [6]:

- **Introducción de aditivos con la biomasa:** se han llevado a cabo experiencias en las que se ha introducido hidróxido de calcio, caliza o caolín. No obstante, los resultados obtenidos no son concluyentes y se precisa una mayor investigación.
- **Filtros catalíticos:** teniéndose en cuenta las experiencias realizadas con catalizadores de paladio y platino, aunque los resultados de eliminación de partículas sí resultan atractivos, ha de



Figura 3. Imagen del interior del hogar en una caldera de combustión de biomasa



ponerse especial atención en el aumento en la emisión de clorofenoles y

estos equipos a nivel doméstico, sería

intervalos de mantenimiento o el coste.

• **Precipitadores electrostáticos:** se está realizando una importante investigación en torno a la utilización de estos equipos en el sector doméstico, hecho que hasta el momento no ha resultado factible por el elevado coste de inversión de los mismos. Puede destacarse la investigación realizada dentro del proyecto BioMaxEff, en la que se ha acoplado un precipitador electrostático a una caldera de 26 kW térmicos. En este proyecto se ha estudiado tanto la longitud como la forma de los electrodos, su periodo de limpieza y su interacción con los arranques y paradas de la caldera. Al finalizar el proyecto en el año 2014, la eficacia de precipitación era elevada aunque todavía eran necesarias algunas mejoras en los precipitadores, siendo uno de los participantes en el proyecto responsable de realizarlas y del lanzamiento del producto al mercado.



Figura 4. Filtro de mangas en una instalación de combustión de biomasa

Tabla 4. Características comparadas de las diferentes tecnologías de eliminación de partículas							
Tecnología	Eficiencia de eliminación				Otros parámetros de operación		Parámetros críticos
	< 1µm	2 µm	5 µm	>10 µm	Parámetro	Valor	
	85-90%. El diámetro más pequeño de partícula que atrapa es 5 a 10 µm						Tamaño de las partículas
Precipitador Electrostático (ESP)	>96,5	>98,3	>99,95	>99,95	Temperatura	80 a 220°C	Resistividad de las cenizas
					Pérdida de carga	Muy baja	
Filtro de mangas (BF)	>99,6	>99,6	>99,9	>99,95	Temperatura	150 a 250°C (función de la fibra)	Temperatura del gas
					Pérdida de carga	5-20 (102 Pa)	
Elaboración propia, basado en Best Available Techniques Reference Document for the Large Combustion Plants (BREF) [8]							

Tecnologías disponibles

La implantación de sistemas de control de emisión de partículas en equipos de esta escala se encuentra aún en una etapa muy incipiente, pendiente de la paulatina introducción de regulaciones en algunos países. En años recientes, se han llevado a cabo trabajos de investigación para estudiar la viabilidad de la aplicación de estos sistemas, y de los límites de emisión que razonablemente pudieran imponerse. Se advierte en general una tendencia a la aplicación de la precipitación electrostática, debido a su muy baja pérdida de carga y relativa facilidad de integración en las chimeneas. La no necesidad de ventiladores adicionales para la impulsión de gases es un factor cuasi decisivo a esta escala.

INSTALACIONES DE COMBUSTIÓN DE MEDIANA POTENCIA

Tecnologías disponibles

Las tecnologías disponibles son las conocidas para control de emisiones de partículas, la mayoría de ellas ya maduras. Se trata de los ciclones, los filtros de mangas y los electrofiltros (figura 4). A su vez, los electrofiltros pueden ser de tipo seco o húmedo. Las

distintas tecnologías confían en diferentes fuerzas externas (gravedad, inercia, fuerzas eléctricas) o bien en la combinación de éstas con la difusión browniana para la separación de las partículas en suspensión del gas [7].

El diseño clásico del ciclón consiste en un cuerpo vertical cilíndrico, donde se introduce tangencialmente el gas a depurar, el cual se extrae axialmente por un conducto en la parte superior que penetra el cuerpo del ciclón. De este modo, se genera un vórtice donde las partículas en suspensión se depositan por inercia en la pared del ciclón, recogándose en tolva inferior por una combinación de gravedad e inercia (figura 5). Los ciclones pueden resultar útiles como preseparadores para partículas de tamaño superior a 10 µm de diámetro aerodinámico. Dada la distribución granulométrica de las partículas de ceniza volante de combustión de biomasa (ver figura 6), los métodos basados en la gravedad y la inercia presentan una eficacia de retención limitada. En cuanto a implantación, ciclones o multiciclones fueron la primera solución adoptada e, incluso si se opta por el uso de una alternativa de mayor eficacia, puede ser aún recomendable o necesario utilizar el ciclón como una primera etapa de depuración o salvaguardia de otros equipos aguas abajo.



En los precipitadores electrostáticos, las partículas se separan mediante fuerzas eléctricas (figura 7). Para ello se satura a las partículas de carga eléctrica, exponiéndolas a una atmósfera altamente ionizada generada mediante descarga de corona en el electrodo emisor. El campo eléctrico establecido entre dicho electrodo emisor y otro electrodo, denominado colector, impulsa las partículas cargadas hacia éste último. Del electrodo colector se desprende la torta de polvo mediante vibraciones, en el caso de electrofiltros secos, o por lavado con una corriente continua de líquido, en el caso del electrofiltro húmedo. Los electrodos colectores pueden ser placas paralelas que configuran calles, por las que fluye el gas, a lo largo de cuyo centro se disponen los electrodos emisores, o bien pueden ser tubos, en cuyo eje se dispone el electrodo emisor. En cuanto a eficacia, los electrofiltros presentan típicamente eficacias superiores al 98% en masa en sus aplicaciones clásicas (tabla 4). No obstante, la eficacia es dependiente del tamaño de partícula, presentando un mínimo entre 0.1 y 0.5 μm .

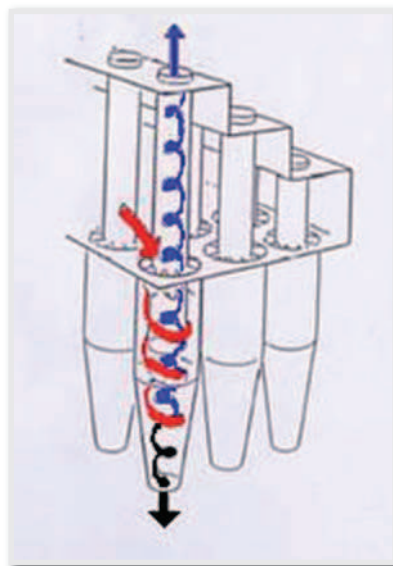
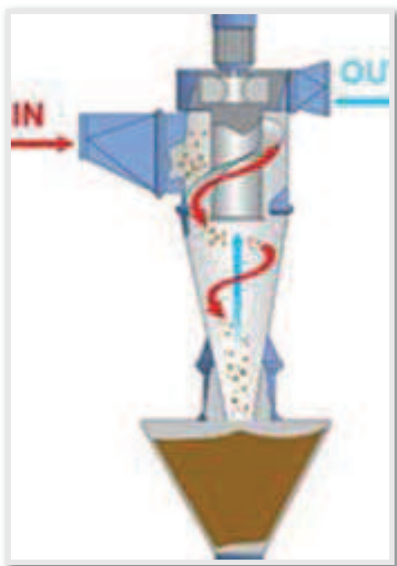


Figura 5. Diagrama de flujo de un ciclón (izquierda) y multiciclón (derecha) para la retención de partículas en una corriente de gas

Tabla 5. Emisiones reales en planta de mediana potencia del CIEMAT

Emisiones encontradas (planta lecho fluidizado burbujeante 1MW-CIEMAT)			
Contaminante	Combustible [Hu-%]		
	Astilla poda del olivar [8,9]	Pélets de astilla poda del olivar [7,1]	Astilla de eucalipto [15,7]
	mg/Nm ³ *	mg/Nm ³ *	mg/Nm ³ *
SO ₂	43,7	22	6,6
NO _x	218	292	290
Partículas	0,09 - 1,80	1,2 - 3,6	0,23 - 0,33

* A condiciones del gas 273.15K, 101.3 kPa y 6% contenido en O₂.
 ** NO_x significa (NO+NO₂) expresado como dióxido de nitrógeno (NO₂).

Los filtros de mangas (figura 8) presentan una eficacia aún mayor que los precipitadores electrostáticos, y menos dependiente del tamaño de partícula. Las partículas se recogen sobre la torta del filtro mediante una combinación de mecanismos inerciales y de difusión. El desprendimiento de la torta se realiza generalmente mediante pulsos de aire comprimido, si bien hace tiempo no era infrecuente la limpieza mediante sacudidas mecánicas de las mangas. Un factor crítico en la aplicación de los filtros de mangas es evitar la formación de condensaciones, que pueden gene-

rar problemas de corrosión y de colmatación del filtro. Esto es particularmente importante en la combustión de biomasa, dado el relativamente alto contenido en vapor de agua del gas.

En España, la tecnología de filtro de mangas goza de una implantación muy mayoritaria. Se aplican las tendencias más recientes en este tipo de filtros, limpieza por pulsos de aire comprimido, tejidos con membrana superficial. No obstante, a nivel internacional sí hay una presencia mayor de precipitadores electrostáticos en esta aplicación. En las escalas mayores, se aplican precipitadores con la clásica geometría de placas paralelas, mientras que a escalas intermedias se observa una tendencia a precipitadores multitubulares, secos o húmedos.

Finalmente, se han ensayado combinaciones de varias de estas tecnologías, como los electrociclones, o los filtros híbridos constituidos por un campo de precipitación electrostática y otro de filtro de mangas en serie. Este último tipo de filtro híbrido ha sido objeto de ensayo en el proyecto FHIB-CAT desarrollado en CIEMAT [9]. El proyecto CLEANBIOM, de financiación nacional, que se encuentra actualmente en ejecución, pretende desarrollar una estrategia integral de control y minimización de emisiones en instalaciones de mediana potencia, con evalua-

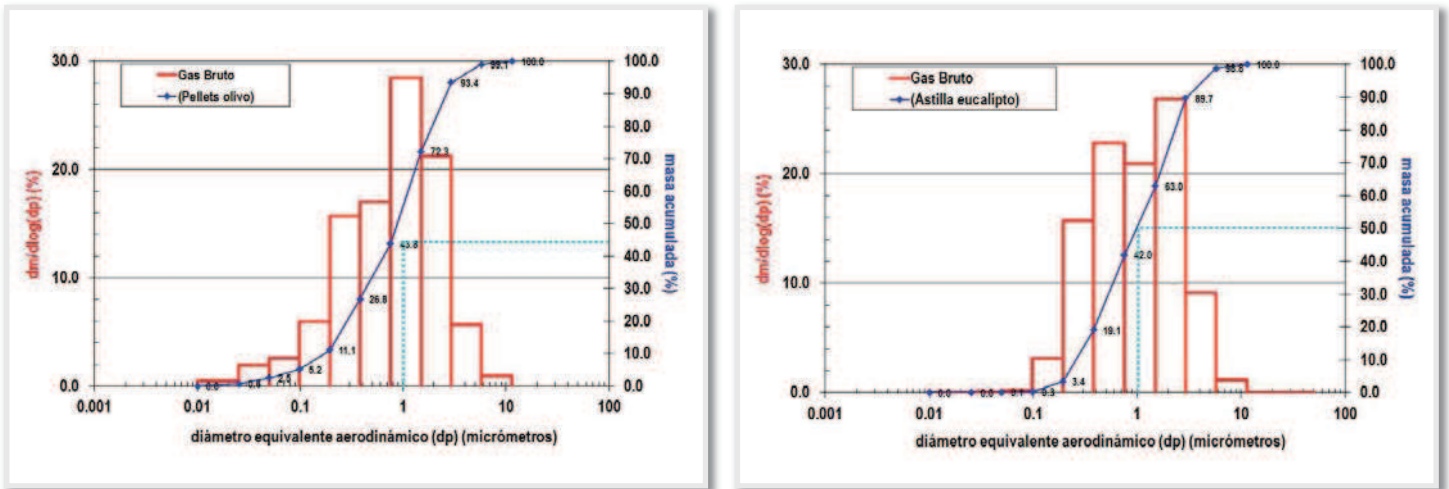


Figura 6. Concentración de partículas por tamaños (en micrómetros) encontradas en el gas bruto de combustión de biomasa en una planta de lecho fluidizado burbujeante. Fuente: CIEMAT

ción experimental de sistemas de retención de partículas. En la tabla 5, se muestran emisiones encontradas en la planta piloto de combustión de biomasa (de 1 MW de potencia térmica nominal) con diferentes combustibles y utilizando el sistema híbrido de filtración (figura 9).

Costes indicativos

Para la estimación de costes de equipos de control de emisiones, hay que conjugar entre los costes de inversión, necesarios para la adquisición e instalación del equipo, y los costes de operación derivados de su funcionamiento. De las tecnologías expuestas,

la menos costosa son los ciclones. Si bien también es la menos eficaz e insuficiente para alcanzar los objetivos fijados en la legislación actual y futura. Así pues, en la práctica la cuestión se reduce a una comparación entre los precipitadores electrostáticos y los filtros de mangas.

Algunos estudios centrados en calderas de biomasa de mediana escala, realizados mediante solicitud de ofertas a varios fabricantes, situaron los costes de inversión en 16% adicional al coste de la caldera en el caso de un filtro de mangas y 25% en el caso de un electrofiltro [10]. En términos comparativos, se encuentra que los electrofiltros presentan costes de inversión

mayores y costes de operación inferiores a los filtros de mangas. La disponibilidad de fabricantes locales puede ser un factor importante para decidirse por una tecnología o por otra. Dado el diferente perfil costes de inversión/operación que presentan, la operación a tiempo completo o tiempo parcial puede ser un factor importante. Por tanto, en aplicaciones de calefacción de algunas de estas instalaciones, la climatología de cada zona podría inclinar la balanza hacia una u otra tecnología de control.

En el caso de los filtros de mangas, el coste de las mangas puede ser significativo. Además, el coste es muy dependiente del material de las mismas.

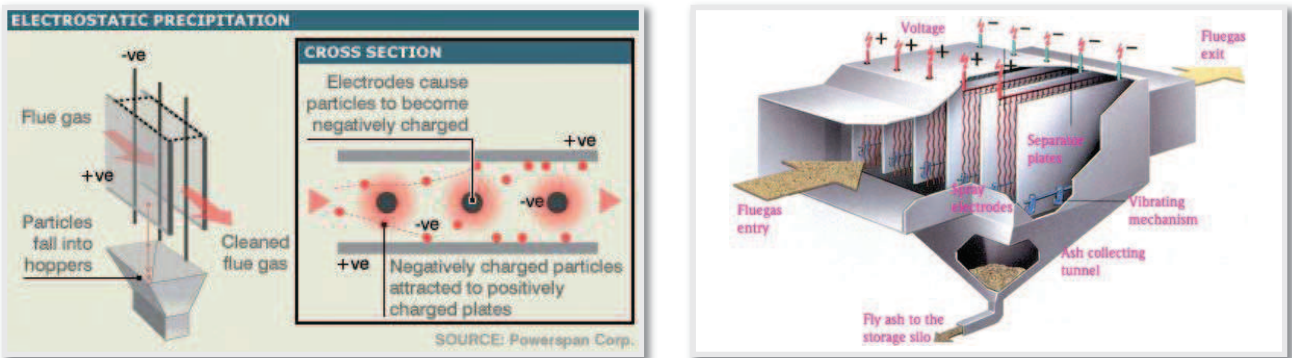


Figura 7. Esquema de funcionamiento de un precipitador electrostático para retención de partículas en una corriente de gas

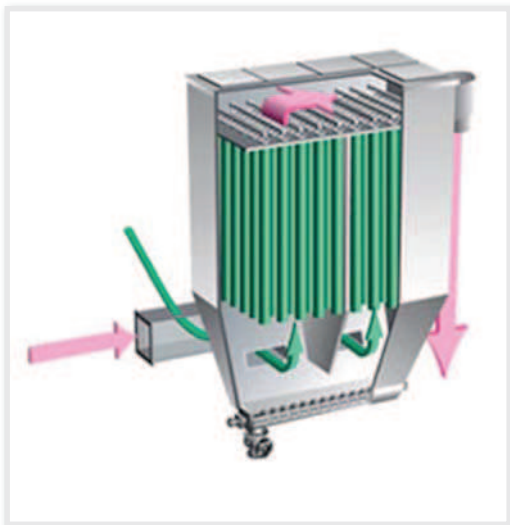


Figura 8. Izquierda: Diagrama de flujo de un filtro de mangas para la retención de partículas en una corriente de gas. Derecha: Caldera de lecho fluidizado de 3,5 MWt con filtro de mangas en CEDER-CIEMAT, Soria.

Así, mangas de Nomex pueden costar el doble que otras de material acrílico y filtros de teflón hasta diez veces más. Por tanto, una elección correcta del material y evitar un desgaste prematuro son cuestiones críticas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. A. Willians, J.M. Jones, L. Ma., M. Pourkashanian. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 113-137 (2012).

[2] Evaluation of the emissions and uncertainties of PM_{2.5} originated from vehicular traffic and domestic wood combustion in Finland. Karvosenoja et al. *Boreal Environmental Research* 13, 465-474, (2008).

[3] Health effects of residential wood smoke particles: the importance of combustion conditions and physicochemical particle properties. A.K. Bolling, J. Pagels, K.E. Yttri, L. Barregard, G. Sallsten, P. E. Schwarze, C. Boman. *Particle and fiber toxicology*, 6:29 (2009).

[4] Survey on measurements and emission factors on particulate from biomass combustion in IEA countries. T. Nussbaumer, N.K. Klippel, L.S. Johansson. 16th European Biomass Conference - Exhibition, 1415-1428 Valencia (Spain), 2008.

[5] Emission characteristics of modern

and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. L. S. Johansson, B. Leckner, L. Gustavsson, D. Cooper, C. Tullin, A. Potter. *Atm Environ*, 38:4183-4195 (2004).

[6] Technologies for measurement and mitigation of particulate emissions from domestic combustion of biomass: A review. M. T. Lim, A. Phan, D. Roddy, A. Harvey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 49: 574-584 (2015).

[7] A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. R. Singh, A. Shukla. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29:854-864 (2014).

[8] Best Available Techniques Reference Document for the Large Combustion Plants (BREF) disponible en <http://eippcb.jcr.ec.europa.eu>.

[9] Enhanced control of fine particle emissions from waste biomass combustion using hybrid filter. G. Aragón, C. Gutiérrez-Canas, M. Larrión, I. Múgica, J. Rodríguez-Maroto, D. Sanz, R. Ramos, R. Escalada, E. Borjabad. *Energy & Fuels*, vol 29 (4), 2358-2371 (2015).

[10] Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emissions Levels of Particulate Matter. Nussbaumer, T. prepared by Verenum for Swiss Federal Office of the Environment in Swiss Federal Office for the Environment (FOEN) as a contribution to the

Expert Group on Techno-Economic Issues (EGTEI) under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), 2010.

PROYECTOS

El CIEMAT agradece la financiación recibida en los siguientes proyectos:

“Filtro híbrido catalítico para control de emisiones gaseosas de contaminantes tóxicos COPS, PM₁₀ y metales pesados: diseño, estudio paramétrico, construcción a escala real, puesta en marcha y validación (FHIBCAT).” Ministerio de Medio Ambiente, 220/PC8 (2008-2011).

“Cost efficient biomass boiler systems with maximum annual efficiency and lowest emissions (BIOMAXEFF)”. UE, 7th Framework Programme, Call FP7-Energy-2012-2, Project 268217 (2011-2014).

“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 (CLEANBIOM)”. Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los Retos de la Sociedad, CTM 2013-49121-C3. (2014-2016).