

Diseño de experimentos aplicado a la combustión de biomasa. Análisis de impactos ambientales de las emisiones

Autores:

Salvador Gomar, Irina Celades, Alberto Escrig (Instituto de Tecnología Cerámica);
Raquel Ramos, Elena Borjabad, Ricardo Escalante, (CEDER-CIEMAT);
Jesús Rodríguez, David Sanz, Enrique Rojas, (CIEMAT);
Cristina Gutiérrez-Cañas, Imara Ibarra, Gaizka Aragón. (Dpto. de Ing. Quím. y del Medio Ambiente. Universidad del País Vasco).

Palabras clave: Biomasa, combustión, aerosol, PM, emisiones, contaminantes, calidad de aire, emisiones difusas, dispositivos de control, simulación de procesos, COVs, PAHs, ESP, depósitos, filtración.

Resumen:

En el uso de biomasa en procesos de combustión deben considerarse una serie de factores que están relacionados con su sostenibilidad técnica, económica y ambiental. Estos aspectos y su grado de incidencia, van a depender entre otros, del tamaño de la instalación utilizada, el origen y naturaleza de la biomasa.

En el marco del proyecto CLEANBIOM se ha estudiado el uso de biomasa residual agrícola y forestal en unidades de media escala (<http://projects.ciemat.es/web/cleanbiom>). Estas plantas, por su tamaño, sirven como instrumento de gestión territorial y se caracterizan por su flexibilidad frente a suministros locales anuales.

Concretamente, se han evaluado los impactos de las emisiones generadas durante la combustión en condiciones compatibles con la operación de dichas plantas – es decir, a bajo coste y sin requerimientos especiales de mantenimiento - con el fin de suministrar criterios objetivos de limitación de las mismas, evitando episodios de corrosión y ofreciendo una herramienta de gestión adecuada para este tipo de plantas.

La parte experimental se ha realizado en un combustor de lecho fluidizado de hasta 1 MWt de potencia. La planta cuenta con un filtro híbrido, compuesto por un precipitador electrostático y un filtro de mangadas, para el control de las emisiones de material particulado (PM). Las biomásas seleccionadas son habituales en el territorio nacional (olivo y paja).

La caracterización de las emisiones se ha realizado mediante un diseño de experimentos factorial fraccionado de dos niveles, con tres factores, previamente seleccionados como las variables de mayor influencia sobre las emisiones: tipo de combustible, distribución de aire y temperatura del aire secundario.

Los contaminantes estudiados han sido: gases de combustión, COVs, PM (incluyendo composición química, HAPs, entre otros). Además, también se ha incluido el estudio de la emisión de cloro (expresado como HCl) en la corriente gaseosa, por su papel fundamental en la formación de partículas finas en atmósferas ricas en álcalis y metales, además de ser un precursor de las dioxinas y furanos. En todos los casos, se han realizado determinaciones de cada uno de los contaminantes antes y después del sistema de depuración

El análisis estadístico del diseño factorial utilizado se ha realizado mediante Minitab®. Dicho análisis ha permitido identificar como factores significativos el tipo de combustible y

la temperatura del aire para los siguientes contaminantes: la concentración másica de partículas determinada antes del sistema de depuración que tiene un grado de significación relacionado con el primer factor, mientras que el número de partículas determinadas después del sistema híbrido depende de forma significativa de la temperatura del aire secundario.

1. Introducción

La biomasa, puede contribuir en la consecución del objetivo de la Directiva 2009/28/CE referente a alcanzar una cuota mínima del 20% de energía, procedente de fuentes renovables, en el consumo final bruto de energía de la Unión Europea para el año 2020. En España, el potencial de biomasa disponible, bajo hipótesis conservadoras, se sitúa en torno a 88 MM t de biomasa primaria en verde, incluyendo restos de masas forestales, agrícolas, masas existentes sin explotar y cultivos energéticos a implantar (PER 2011-2020 [1]). A este potencial, se suman unos 12 MM t de biomasa secundaria seca obtenida de residuos de industrias agroforestales. En el año 2010, el conjunto de biomasa, biogás y residuos representaba el 4,2% del consumo final bruto de energía, con un 1,4 % en el caso de biomasa sólida, estando previsto en el PER para el año 2020 un 2,2% del consumo final bruto de energía para la biomasa sólida. En la actualidad, la mayor parte de los 3.655 ktep de consumo térmico final de biomasa en España, proviene del sector forestal, utilizándose en sector doméstico y en industrias forestales para consumo térmico o cogeneración. Por otro lado, existe una potencia instalada de 533 MW abastecida con residuos de industrias agroforestales y restos de cultivos agrícolas, principalmente.

El impacto ambiental asociado a la utilización de biomasa como combustible ha sido incluido por el gobierno español a modo de objetivo específico en el Plan Aire 2013 [2], el cual también incluye medidas a implantar, directamente relacionadas con la producción y uso de biomasa para fines energéticos.

En el ámbito industrial, destaca la Directiva (UE) 2015/2193, sobre la limitación de las emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de las instalaciones de combustión medianas. Estas instalaciones, no controladas hasta el momento, deben cumplir los valores límite de emisión de SO₂, NO_x y partículas.

En el sector residencial, sin embargo, el objetivo es la regulación de las emisiones de las instalaciones térmicas, con medidas como la regulación de las mismas cuando se utilizan combustibles sólidos y la regulación de la biomasa a emplear como combustible en las calderas de este sector.

A nivel de investigación, las líneas de actuación en I+D+i dan prioridad al aumento de conocimientos relacionados con los contaminantes atmosféricos, sus causas y su dinámica, así como a las metodologías de evaluación. Entre las líneas de trabajo señaladas están:

- Partículas: Caracterización experimental de las emisiones producidas por sectores industriales no suficientemente controlados con gran potencial contaminador.
- Modelización: Mejora de modelos para simulación de contaminantes fotoquímicos, incluye aerosoles secundarios.
- Desarrollo de técnicas de combinación de mediciones y modelos.

En este contexto se desarrolla el proyecto CLEANBIOM, que tiene como objetivo general desarrollar una estrategia integral, para la predicción, control y minimización de los contaminantes generados en el proceso de combustión de biomásas residuales

características de la cuenca mediterránea. Así, se permite visualizar la situación objetiva de la valorización de biomásas residuales específicas de la cuenca mediterránea, que han mostrado ser un sector potencialmente importante en la generación energética nacional.

Este proyecto abarca, de manera integrada, el análisis de tecnologías, monitorización y control del proceso y la predicción de impactos, basándose en la caracterización intensiva de la operación de la planta piloto (CEDER-CIEMAT) de dimensión y prestaciones extrapolables al sector industrial objetivo.

Concretamente, la presente comunicación recoge la metodología seguida en la planificación de las diferentes campañas experimentales llevadas a cabo en el marco del proyecto CLEANBIOM y, el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos en una de dichas campañas.

2. Métodos

2.1. Planta piloto

Todas las campañas experimentales se han llevado a cabo en una planta piloto de combustión de lecho fluidizado burbujeante de hasta 1 MWt que el CIEMAT dispone en el CEDER, en Soria . En la *Figura 1* y la *Figura 2*, se observa un diagrama de la planta de combustión con todos sus equipos auxiliares. La salida de los gases de combustión se realiza a través de una tubería de acero inoxidable traceada eléctricamente, que conduce hasta los sistemas de depuración. En este caso, se ha utilizado filtro híbrido que consiste en un electrofiltro y un filtro de mangas conectados en serie.

La línea de depuración presenta tres puntos para toma de muestras aguas arriba del filtro híbrido. A la salida del filtro híbrido, la línea vuelve sobre el mismo recorrido, presentando otros tres puntos para la toma de muestras aguas abajo del filtro antes de ser evacuados a través de una chimenea. Entre los puntos de toma de muestra se mantiene una distancia suficiente para evitar interferencias.

A lo largo de la línea de depuración existen una serie de instrumentos que permiten la medida de las variables de proceso como la temperatura, la presión, el caudal y el contenido de humedad. Todos los instrumentos están conectados al sistema de control centralizado de la planta piloto de CEDER-CIEMAT, de manera que el control y la adquisición de datos puede realizarse de manera automática.

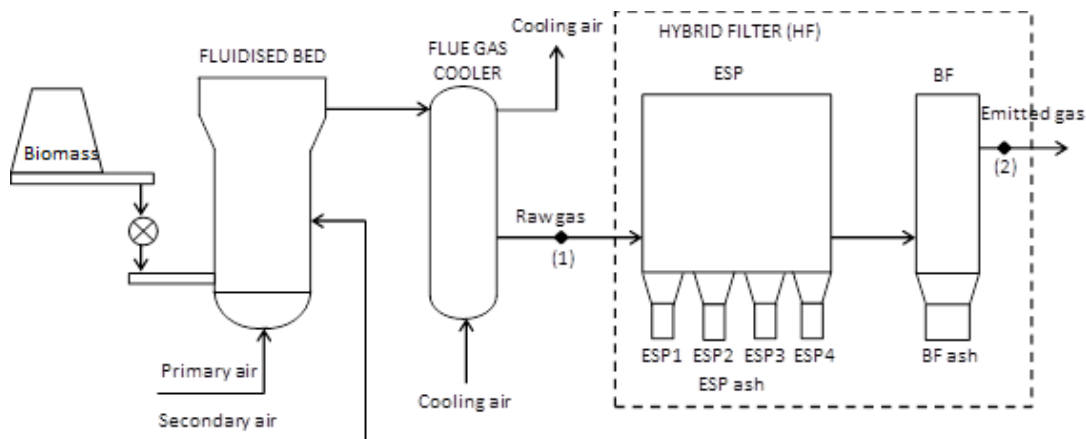


Figura 1 Diagrama de la planta de combustión ubicada en las instalaciones de CEDER-CIEMAT.



Figura 2 Detalle del sistema de depuración híbrido (electrofiltro + filtro de mangas) ubicada en las instalaciones de CEDER-CIEMAT.

2.2. Contaminantes estudiados

El uso de biomasa como combustible genera una serie de emisiones contaminantes que incluye en su composición una gran variedad de compuestos. Los contaminantes de interés en el presente trabajo abarcan compuestos particulados (PM) y compuestos gaseosos.

Se ha estudiado de modo exhaustivo las características que definen en mayor grado, el impacto asociado al PM, como el tamaño (centrándose en el rango submicrónico, fundamentalmente), morfología, mineralogía y composición química (con especial

atención a la presencia de determinados metales, compuestos orgánicos como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) o especies como el α -dibenzopireno, de interés por su carácter cancerígeno).

En cuanto a los contaminantes gaseosos, se ha estudiado la presencia de cloro, por su papel fundamental en la formación de partículas finas en atmósferas ricas en álcalis y metales, además de ser un precursor de las dioxinas y furanos. Por otro lado, también se han estudiado los gases habituales generados en procesos de combustión y los compuestos orgánicos volátiles (COVs), estos últimos por su especial relevancia como precursores para formar compuestos oxidantes, como por ejemplo del ozono troposférico.

2.3. Métodos de medida

Los métodos experimentales utilizados se basan en normas internacionales de medida de contaminantes en fuentes estacionarias y en trabajos previos del equipo investigador [4]. En la *Tabla 1*, se muestra, a modo de resumen, las diferentes técnicas utilizadas.

Tabla 1. Toma de muestra y análisis de los contaminantes de interés

Contaminante	Toma de muestra	Norma de referencia	Metodología analítica
Partículas	Extracción isocinética	EN 13284	Gravimetría
Número de partículas	Extracción isocinética	--	CPC
Metales (fracción sólida)	Extracción isocinética	EN 13284	ICP-AES ICP-MS
HAPs (fracción sólida)	Extracción isocinética	EN 13284	GC-MS
COV	In situ	EN 12619	FID
HCl	Extracción no isocinética	EN 1911	Cl
CO, NO _x , SO ₂ , Humedad	In situ	--	FTIR
Cenizas	--	--	Gravimetría

3. Planificación de campañas experimentales

Antes de definir los experimentos necesarios, se ha llevado a cabo un análisis en detalle sobre el proceso de combustión de biomasa, con la finalidad de identificar los parámetros críticos asociados a los tres pilares de dicho proceso y que pueden afectar o tener cierta influencia sobre el control de las emisiones. Estos pilares son: preparación de la biomasa, la propia combustión y la posterior depuración de los gases generados.

En los siguientes apartados se describen brevemente los parámetros asociados a cada uno de los tres pilares citados anteriormente.

3.1. Parámetros críticos asociados a la biomasa

Disponibilidad: La producción y el uso de las distintas biomásas caracterizan la disponibilidad de las mismas de cara a su aprovechamiento energético. Según la base de datos RAISE [3], la biomasa se puede clasificar, según su origen, en biomasa residual de origen agrícola y forestal y residuos de industrias agroforestales. El cultivo de secano (principalmente trigo y cebada), con un total de $9,4 \cdot 10^6$ t m.s./año es el de mayor disponibilidad dentro de la biomasa agrícola seguido de la poda de 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). Con respecto a los residuos de industrias agroforestales, destaca 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.

En general, el uso de estas biomásas es escaso, principalmente como fuente de energía. La fracción no utilizada es, en ocasiones, eliminada de forma incontrolada por quema en los propios campos de cultivo (quema al aire libre), cuyo impacto en algunas ocasiones puede llegar a ser significativo.

Caracterización: La composición química de la biomasa puede influir en la presencia de precursores de corrosión y en la aparición de algunas especies en la corriente de gases a depurar. En este sentido destaca, por ejemplo, la composición de la ceniza de las biomásas herbáceas con un menor contenido en calcio (Ca) y un mayor contenido en potasio (K), lo que hace que presenten unas temperaturas de fusibilidad de cenizas más reducidas y pueden dar problemas de formación de escorias y de sinterizados en su combustión, con los correspondientes problemas durante la operación de las instalaciones y una mayor necesidad de mantenimiento de las mismas.

Problemática asociada a las distintas biomásas:

Las biomásas herbáceas residuales de los cultivos de secano, son las de mayor disponibilidad, pero poseen las peores características desde el punto de vista físico-químico (mayor contenido en cenizas, en azufre y en cloro y menor poder calorífico y temperaturas de fusibilidad de sus cenizas), lo que hace difícil su utilización debido a problemas técnicos comentados anteriormente.

Por otro lado, la biomasa procedente de las podas del olivar, posee un elevado potencial como recurso energético especialmente en el Sur de la Península, si bien en la actualidad no se está aprovechando, y en su mayor parte se quema de forma incontrolada a la intemperie en el campo. Un cambio de la gestión de esta poda hasta su aprovechamiento final supone un mejor aprovechamiento en el proceso de combustión.

3.2. Parámetros críticos en la 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. La calidad del combustible biomásico se mejora en base a las tecnologías de pretratamiento (secado, molienda, densificación,...) y a su vez esto supone un incremento en el coste de producción. Por ejemplo, una biomasa puede alimentarse al horno 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 pellets o residuos de proceso, de la misma biomasa forestal.

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. Teóricamente, un aumento de la humedad reduce la temperatura máxima a que se puede llevar la combustión y precisa de mayor tiempo de residencia en el horno para reducir los efectos de una combustión incompleta. En este sentido, el poder calorífico inferior (PCI), se reduce con un aumento de la humedad del combustible, por lo que es necesario realizar etapas de secado. Este secado puede ser natural o forzado.

Granulometría, presencia de impropios y proporción de finos: La reducción del tamaño de partícula del combustible biomásico viene impuesta por los equipos de

combustión, que precisan tamaños reducidos que permitan una dosificación en continuo según el tipo de combustión (lecho fijo, que incluyen hornos de parrillas y hornos de afloración, lecho fluidizado, burbujeante o circulante y combustión en polvo). Varias ventajas se consiguen simultáneamente con la reducción de tamaño: aumento de densidad a granel del material que reduce costes de transporte y volumen de almacenamiento; aumento de la homogeneidad del combustible deseable para los sistemas de alimentación continuos y aumento de la superficie específica de las partículas que mejora la reactividad del combustible y permite un mejor control del proceso de combustión. Como principal inconveniente se encuentra el alto coste energético de estos procesos y la producción de finos. Precisamente, la proporción de finos es un parámetro importante, puesto que está directamente relacionada con su contenido en ceniza y la suciedad generada y está regulado por normas UNE e ISO para combustibles.

Además, es necesario controlar la presencia de impropios, tales como piedras o metales ya que ocasionan problemas en los equipos de combustión (perturba las condiciones de fluidización o genera atascos o deterioro de partes móviles).

Peletizado: La baja densidad que presenta la biomasa resulta negativa de cara a su aprovechamiento energético, debido al aumento de los costes de transporte y almacenamiento y a un manejo más complicado. La densidad de la biomasa es variable en función de su tamaño de partícula (por ejemplo, en función del tamaño de malla usado en su molienda). El proceso de peletizado es una solución que presenta ventajas como elevada densidad, limpieza y uniformidad de propiedades físico-químicas, que permite su dosificación continua en sistemas de alimentación automática con una operación muy estable. Además, los pellets presentan unas características estandarizadas (*ISO/FDIS 17725-2:2003*) que hacen que tengan una calidad muy bien definida y que exista un mercado establecido. Por el contrario, este proceso requiere un alto consumo de energía que repercute en un mayor precio de este producto.

3.3. Parámetros críticos en la combustión

Los procesos termoquímicos de conversión de la biomasa en energía implican reacciones químicas irreversibles, homogéneas y heterogéneas, a alta temperatura y en condiciones variables de oxidación: con exceso de aire (combustión), con escasez de aire (gasificación) o con ausencia total de aire (pirólisis). También implica la generación de diferentes tipos de contaminantes gaseosos y de materia particulada. Alcanzar una elevada eficiencia en la combustión reduce mucho las concentraciones alcanzadas para los contaminantes gaseosos.

Las tecnologías de los hornos para el quemado y la recuperación energética de biomasa o combustibles sólidos residuales varían mucho con las potencias utilizadas y se diferencia entre lechos fijos, lechos fluidizados y hornos de combustión de polvo. En aplicaciones industriales de mediana potencia (entendida entre <1 y 50 MWt según la legislación europea) las dos tecnologías que más se usan son: tecnología de parrillas y tecnología de lecho fluidizado.

En términos de parámetros de diseño, los lechos fluidos presentan una serie de ventajas frente al resto de sistemas de combustión en cuanto a temperatura uniforme en el lecho, grado de turbulencia elevado, tiempos de residencia elevados en función del diseño del lecho fluidizado y de la velocidad de fluidización con la que se opere. Además, presenta temperaturas de operación relativamente bajas, flexibilidad en el uso de combustibles, eficacia de combustión y menor de emisiones de CO y NOx.

Parámetros de operación

Exceso de aire: Para asegurar una mezcla suficiente entre el aire de entrada y el combustible, es necesario un exceso de oxígeno en el medio de reacción, normalmente en torno al 1,5. 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.

Distribución del aire de combustión: La introducción de aire escalonada permite que existan diferentes excesos de aire a lo largo de la cámara de combustión. Puede introducirse aire en dos puntos, el aire primario junto con el combustible y aire secundario en otra sección de la cámara de combustión. En ese punto el aire de combustión alcanza una buena mezcla con los gases 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 NO_x en la combustión.

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.

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.

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. En sistemas de lecho fluidizado burbujeante, como es el caso del presente trabajo, 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 800-825°C.

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.

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_2 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.

3.4. Parámetros críticos en la depuración de emisiones

Normalmente, el contenido en azufre de las biomásas no da lugar a emisiones de SO_x que requieran medidas secundarias para cumplir con la normativa. Respecto a NO_x , si es preciso, se pueden aplicar medidas primarias. Así pues, la materia particulada es el principal contaminante que requiere de medidas secundarias para la limitación de sus emisiones. Otras categorías de contaminantes regulados como los metales pesados, las dioxinas y furanos (PCDD-F) o los hidrocarburos policíclicos, se presentan frecuentemente en fase sólida o asociados al PM, razón por la cual las mismas medidas secundarias implementadas para las partículas resultan relevantes para estos contaminantes. De todas ellas, caben destacar los precipitadores electrostáticos o electrofiltros, los filtros de mangas y en menor proporción los lavadores o “scrubbers”, constituyendo los Filtros híbridos formados por los dos primeros en serie los que se presumen como la mejor opción, no solo por su alta eficacia en la separación de la PM, sino también por la reducción de los contaminantes asociados a ellas [5] [6].

En la fase experimental del trabajo se ha utilizado un filtro híbrido instalado en la línea de depuración de emisiones de la planta de CEDER-CIEMAT. Se han seleccionado los parámetros críticos del filtro híbrido en cuanto al control de emisiones durante la quema de biomasa [7]. Dichos parámetros son dos: el potencial aplicado en el precipitador electrostático y la velocidad de filtración en el filtro de mangas.

El primer parámetro afecta a la distribución relativa de las cenizas volantes recogidas entre dos módulos del filtro híbrido, o el consumo de energía del proceso. Al mismo tiempo, la proporción de paso de ceniza afecta a la dinámica de este módulo, su consumo de energía, la penetración de partículas a través de los medios filtrantes, etc. Por su parte, la velocidad de filtración en el filtro de mangas es el otro parámetro fundamental. Para variar la velocidad de filtración el área superficial disponible del filtro se reduce mediante la eliminación de algunas bolsas de filtro en algunos experimentos.

3.5. Diseño de experimentos

La identificación teórica de los parámetros que pueden tener influencia sobre los procesos de combustión ha sido extensiva. No obstante, para la selección de los parámetros a ensayar se tienen que considerar diferentes condiciones de contorno como, por ejemplo, cuáles de estos parámetros muestran una mayor influencia potencial sobre la combustión, si existe una posibilidad práctica de modificación en la instalación experimental, cuales están definidos a priori por el tipo de combustible utilizado y, las condiciones de combustión. A modo de ejemplo, no es posible modificar el caudal de gas tratado o el área filtrante en el electrofiltro.

Por otro lado, a nivel práctico una premisa importante ha sido la limitación temporal y económica de las campañas de medida, dado que cada una de las condiciones de ensayo necesita de, al menos, 8 horas de funcionamiento estacionario para poder llevar a cabo los muestreos de los contaminantes de interés. De esta forma, no ha sido posible realizar un número elevado de experimentos.

Considerados todos los aspectos comentados, se ha optado por realizar un diseño de experimentos factorial de tipo fraccionado, con dos niveles de modificación y con tres factores, comúnmente identificado como $2^{(3-1)}$. Este tipo de diseño presenta un grado de resolución III, que permite conocer las interacciones principales, pero presenta la limitación de no conocer las interacciones de 2 factores.

Por el tipo de experimento diseñado, los factores seleccionados han sido únicamente tres. En la Tabla 2, se describen los factores seleccionados y sus respectivos niveles de

variación. El resto de parámetros identificados se han fijado durante la realización de la campaña de medida. De entre los parámetros fijados, destaca el combustible utilizado, que en esta ocasión ha sido la biomasa de olivo presentada en forma de astilla.

Tabla 2. Diseño de experimentos $2^{(3-1)}$: Factores y sus niveles utilizados durante la campaña experimental para la biomasa en forma de astilla de olivo

Factor	Nombre	Nivel	
		Bajo	Alto
A	Combustible/Granulometría	Cribado	Sin cribar
B	Temperatura del aire (°C)	45	90
C	Distribución aire (%)	55	75

4. Resultados

4.1. Diseño de experimentos

Los resultados experimentales obtenidos en función del diseño de experimentos y sus respuestas, se muestran en la *Tabla 3*. Dichas respuestas han sido analizadas mediante el programa estadístico MINITAB 17.3.1 (Minitab Inc., State College, PA, USA).

El análisis estadístico realizado ha permitido representar en forma de diagrama de Pareto, los efectos de las respuestas, que presentan un grado de significancia de los factores sobre las respuestas obtenidas. Se considera que un efecto es significativo cuando el valor absoluto del mismo se extiende más allá de la línea de referencia de dicho diagrama (PSE de Lenth,[8]). Los factores significativos son aquellos que influyen en la respuesta cuando cambian de un valor a otro. Únicamente se han encontrado grados de significancia en tres de las respuestas estudiadas, que se muestra en la *Figura 3*.

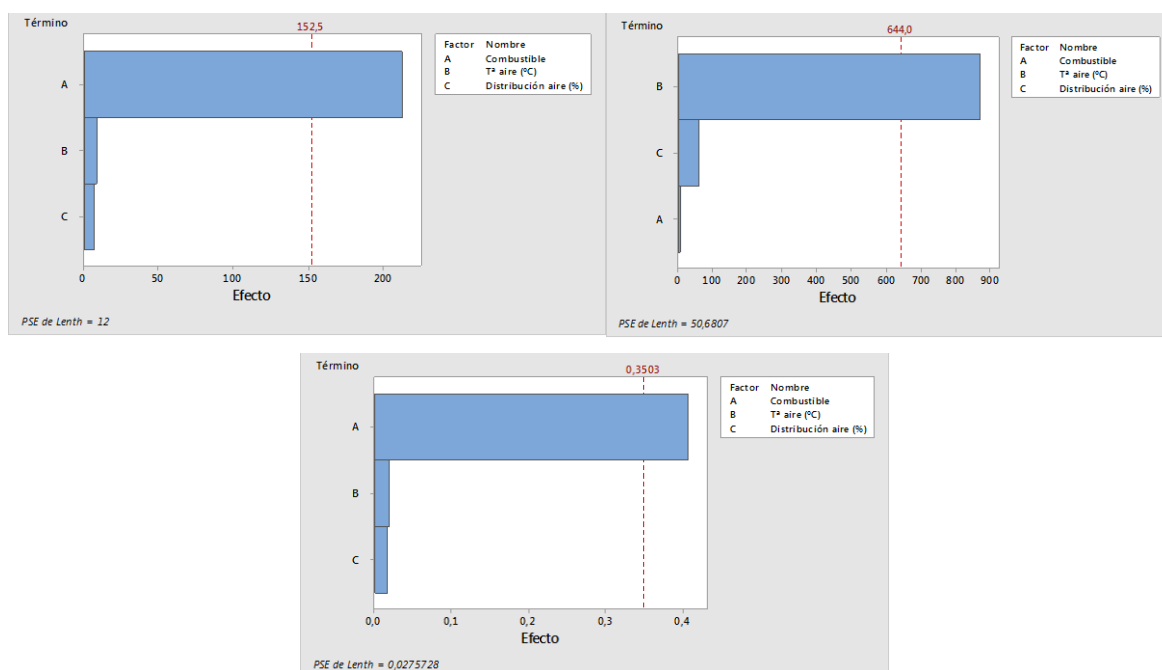


Figura 3 Diagrama de Pareto de los efectos para el PST (superior izquierda) y el Fe en bruto (superior derecha) y el número de partículas en depurado (inferior).

En dicha figura, se comprueba que la concentración de partículas totales y su contenido en hierro (Fe), depende del tratamiento del combustible, si está cribado o no cribado. Por su parte, el número de partículas en la corriente depurada depende de la temperatura del aire.

Tanto la composición de gases de la corriente de salida en bruto y tras los sistemas de depuración, como la composición de las partículas en cuanto al resto de metales estudiados y de los HAPs más abundantes, no presentan una respuesta significativa desde un punto de vista estadístico aun siendo importantes [9]. Sin embargo, algunos elementos muestran una respuesta elevada a alguno de los factores estudiados. Este es el caso por ejemplo de los contaminantes mostrados en la Figura 4. En la misma, se

observa que el contenido en aluminio (Al) y potasio (K) de las partículas en bruto, depende del combustible, si está cribado o no cribado.

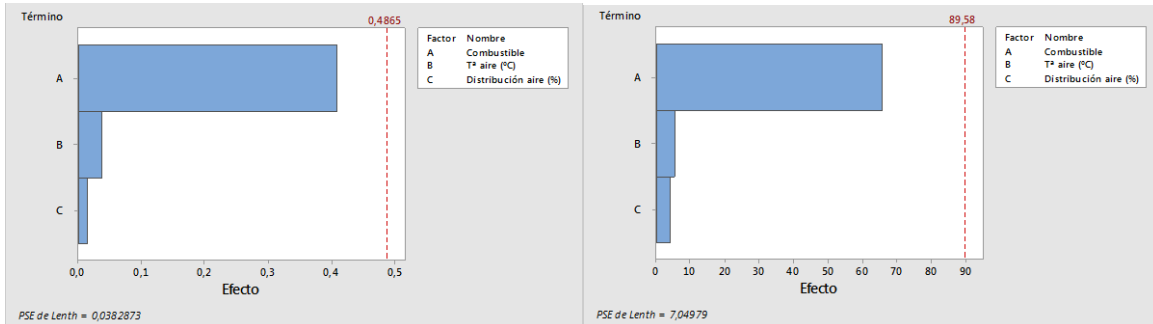


Figura 4 Diagrama de Pareto de los efectos para la composición de las partículas en la corriente sin depurar en cuanto a Al (izquierda) y K (derecha).

4.2. Análisis de impactos ambientales de las emisiones

Desde un punto de vista legislativo, la quema de biomasa en instalaciones de combustión de mediana potencia tiene limitada la emisión de SO₂, NO_x y partículas. Los resultados experimentales obtenidos para los mencionados contaminantes se encuentran por debajo de los VLE más restrictivos, para el caso del sistema de depuración estudiado. Además, ninguno de estos contaminantes muestra una respuesta significativa en el diseño de experimentos estudiado. En la

Figura 5, se ha representado la variación de la emisión debida a la modificación de los factores estudiados, y las pequeñas variaciones que alcanzan en comparación con los respectivos VLE.

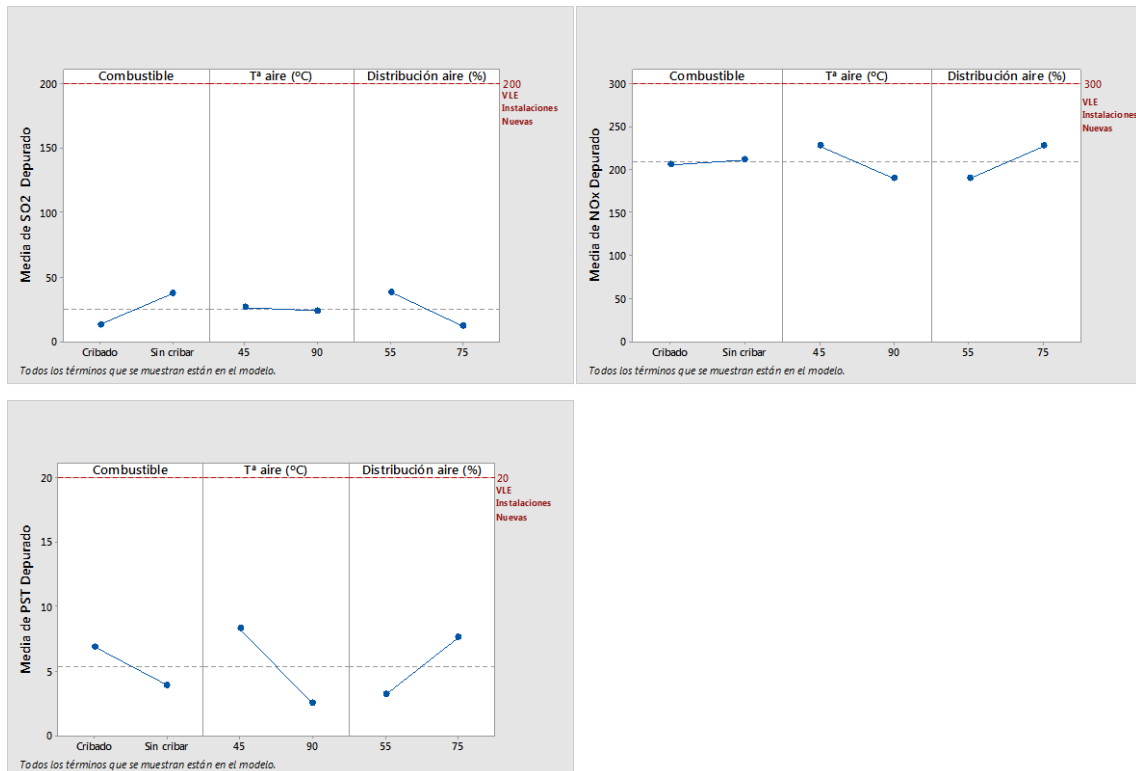


Figura 5 Gráfica de efectos principales para SO₂ (superior izquierda), NO_x (superior derecha) y partículas (inferior) en la corriente de gases depurada y sus respectivos valores límite de emisión según la Directiva (UE) 2015/2193.

También merece un comentario específico la emisión de CO en la corriente de salida procedente de la quema de la astilla de olivo. Los valores de emisión son elevados, lo que denota una combustión deficiente en el sistema estudiado. Por otro lado, la emisión de CO está asociada con la emisión de COT que presenta en este caso, como cabe esperar, valores relativamente elevados tanto en la corriente en bruto como en la corriente en depurado, ya que el sistema de depuración considerado en el presente trabajo no es específico para el tratamiento de este tipo de contaminante.

Teniendo en cuenta la concentración de COT en la corriente de salida, es importante conocer los valores de emisión de HCl, debido a su papel fundamental en la formación de partículas finas en atmósferas ricas en álcalis y metales, y como precursor de las dioxinas y furanos [10]. En general, los valores alcanzados por este contaminante son bajos, inferiores a 4 mg/Nm³ al 6% de O₂. No obstante, dado que los límites aplicables a dioxinas y furanos son muy restrictivos, sería necesario realizar un estudio específico que permitiera determinar su importancia en este tipo de procesos de combustión.

Tabla 3. Respuestas al DdE realizado con biomasa en forma de astilla de olivo

Parámetro, corriente bruta (B) ó depurada (D), unidades			Exp1	Exp2	Exp4	Exp5
Combustible	--		Sin cribar	Sin cribar	Cribado	Cribado
Tª aire	°C		90	45	45	90
Distribución aire	%		75	55	75	55
Composición de los gases:						
HCl	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	3,0	3,5	2,1	1,3
HCl	D	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	1	3,5	0,7	1,4
COT	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	95,7	249,8	76,7	152,6
COT	D	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	ND	156	13	45
CO	D	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	8573	11548	4834	5030
NOx	D	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	211,5	211,6	243,2	167,8
SO2	D	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	22,8	51,6	1,2	25,2
H ₂ O	D	%	8,1	7,7	7,6	7,6
Ceniza	-- mg/m ² /h		775	1431	1529	
Partículas:						
PST	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	323	339	119	117
PST	D	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	3,2	4,6	12	1,8
Número de partículas	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	4,79E+04	4,32E+05	8,75E+04	1,64E+05
Número de partículas	D	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	314	1125	1193	259
Composición de las partículas en metales:						
Al	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	0,7	0,7	0,3	0,3
Ca	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	34,5	31,4	5,2	21,5
Fe	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	0,7	0,7	0,3	0,3
K	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	89,5	98,9	29,1	27,7
Mg	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	3,2	2,6	1,6	2,2
Na	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	1,4	1,7	0,6	0,5
Sr	B	mg/Nm ³ al 6% de O ₂	0,2	0,2	0,1	0,1
Composición de las partículas en HAPs:						
BeP	B	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	81,3	11,6	ND	0,0
BbF	B	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	45,5	7,9	ND	0,4
BaP	B	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	17,8	3,3	ND	0,1
DBA	B	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	11,4	5,6	ND	0,2
BghiP	B	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	97,6	69,5	ND	2,9
BeP	D	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	0,5	40,8	ND	0,8
BbF	D	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	1,1	9,5	ND	1,2
BaP	D	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	0,8	8,6	ND	0,1
DBA	D	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	0,4	22,7	ND	0,2
BghiP	D	10 ⁻⁴ ng/Nm ³ al 6% de O ₂	6,2	243,6	ND	5,5

ND: No disponible.

Compuestos HAPs:

5 anillos [BeP: Benzo (e) pireno; BbF: Benzo (b) fluoranteno; BaP: Benzo (a) pireno; DBA: Dibenzo (a,h) antraceno; BghiP].
6 anillos [Benzo (g,h,i) perileno].

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto CLEANBIOM, financiado por el Gobierno de España (Ministerio de Economía y Competitividad) con el número CTM 2.013-49.121-C3.

6. Bibliografía

- [1] de Energías Renovables, P. (2012). Renovables 2011–2020.-IDAE, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. 2007.
- [2] MAGRAMA. Plan Nacional de Calidad del Aire y Protección de la Atmósfera: Plan AIRE. [Internet]. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (Consultado el 27/10/2016.) Disponible en: http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/PLAN_AIRE_2013-2016_tcm7-271018.pdf
- [3] BIORAISE. Geoportal para evaluación de recursos de biomasa agrícola y forestal en el Sur de Europa. [Internet]. (Consultado el 29/04/2016) Disponible en: <http://bioraise.ciemat.es>.
- [4] Rodríguez Maroto, J. J. (2004). Diseño, validación y aplicación de un sistema integrado de caracterización de partículas de aerosol.
- [5] Aragón, G., Sanz, D., Múgica, I., Rojas, E., Larrión, M., Rodríguez Maroto, J., ... & Gutiérrez-Cañas, C. (2015). Enhanced Control of Fine Particle Emissions from Waste Biomass Combustion Using a Hybrid Filter. *Energy & Fuels*, 29(4), 2358-2371.
- [6] Contreras, M. L., García-Frutos, F. J., Ramos, R., Sanz, D., & Bahillo, A. (2015). Trace metals removal through a catalytic hybrid filter during cofiring of different biomass waste materials. *Fuel*, 150, 538-547.
- [7] Sanz, D., Rojas, E., Rodríguez-Maroto, J. J., Ramos, R., Borjabad, E., Escalada, R., ... & Ibarra, I. (2015). Review of critical parameters in biomass combustion emissions control by means of hybrid filter. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 28, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- [8] Russell V. Lenth (1989) Quick and Easy Analysis of Unreplicated Factorials, *Technometrics*, 31:4, 469-473.
- [9] E. Borjabad, S. García, J. Rodríguez Maroto, R. Escalada, D. Sanz, A. Pascual, E. Rojas, G. Aragón, I. Ibarra, I. Múgica, C. Gutiérrez-Canas, I. Celades, V. Sanfelix, S. Gomar, R. Moliner, R. Ramos (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated to particulate matter in combustion of residual biomass. 24th European Biomass Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 6-9 June, 2016. ISSN 2282-5819.
- [10] Wei, X., Schnell, U., & Hein, K. R. (2005). Behaviour of gaseous chlorine and alkali metals during biomass thermal utilisation. *Fuel*, 84(7), 841-848.