

PROCESO DE RE-DISEÑO DE UN PROTOTIPO DOMÉSTICO DE PRECIPITADOR ELECTROSTÁTICO TUBULAR

VILLARAVID ARES, Emilio⁽¹⁾; GRANADA ALVAREZ, Enrique⁽¹⁾; PORTEIRO FRESCO, Jacobo⁽¹⁾;

PATIÑO VILAS, David⁽¹⁾; MORÁN GONZÁLEZ, Jorge C⁽¹⁾.

emiliovillaravid@gmail.com

⁽¹⁾Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería Mecánica, Máquinas y Motores Térmicos y Fluidos

Grupo de Tecnología Energética (GTE)

RESUMEN

El principal problema para el desarrollo de precipitadores electrostáticos cilíndricos [1] es que el gas sucio atraviesa el interior prototipo, donde se encuentran alojados los elementos que sujetan el electrodo emisor de campo eléctrico, por lo que, durante su funcionamiento, la alta concentración de partículas de combustión, sumada a la gran turbulencia en el interior de la tubería hace que se formen capas de partículas que cubren la totalidad del área interna de la tubería, creando problemas de descarga del campo.

Esta capa de partículas es conductora (de hecho es precisamente esa la propiedad que se aprovecha para su retención), por lo que cuando el nivel de ensuciamiento llega a un punto crítico, se establece una capa de partículas entre los electrodos en la zona de entrada de humo y la electricidad fluye a través de la capa desde el electrodo emisor hasta el electrodo colector, sin que llegue a formarse el campo eléctrico de carga, impidiendo por tanto la carga y retención de las partículas durante cortos periodos de tiempo, insuficientemente largos como para aguantar las tandas de funcionamiento de las máquinas térmicas domésticas más comunes.

Para solucionar el problema, se modifica el diseño de la conducción donde tiene lugar la retención, [2] para evitar el paso de gas sucio por las zonas sensibles donde tienen lugar la gestión de los dispositivos de carga de las partículas. El nuevo diseño está constituido por una innovadora doble T a 135° de acero soldado calorifugado, de tal manera que se disponga de cuatro ramales que permitan gestionar el humo y el electrodo por separado:

- Dos ramales inferiores: uno para la entrada del gas y otro separado para el alojamiento del montaje y centrado inferior del electrodo.
- Dos ramales superiores: uno para la salida del gas y otro separado y enfrentado con el de alojamiento inferior que garantice la tensión y el centrado correctos del electrodo emisor.

De ese modo, las partículas contenidas en el gas entran directamente a la zona de carga y se depositan a lo largo de la zona recta, donde el campo eléctrico es más intenso, sin que se amontonen en las cavidades próximas al alojamiento del electrodo y se formen los anteriormente citados puentes. En el re-diseño juegan un papel fundamental el uso de materiales estándar, la consecución de un buen acabado interior para evitar el cebado de arcos voltaicos hacia las imperfecciones del metal, y la combinación de una buena masa metálica de descarga con un diseño modular, sencillo y seguro.

Palabras clave: ESP, PM10, electrostática, descarga corona, partículas de combustión, concentración de partículas, motor diesel, caldera de biomasa.

1. Introducción

En el presente apartado de introducción se hará una revisión rápida de las ideas clave para el proceso de diseño, empezando por una breve justificación, seguida de una presentación de la tecnología de limpieza electrostática existente, haciendo hincapié en la limpieza mediante métodos electrostáticos.

Más tarde, se clasificarán las tecnologías de limpieza electrostática ya existentes, atendiendo a diversas características que más tarde ayudarán a comprender mejor las actividades de diseño realizadas.

1.1. Demanda energética y efectos de las partículas

La sociedad actual necesita la energía para sobrevivir, ya sea en forma de energía térmica o eléctrica, la manera más común para obtenerla, a escala industrial o unifamiliar, es a través de una máquina térmica.

La gran mayoría de las máquinas térmicas en la actualidad tienen como inconveniente la emisión de un caudal de gases de escape, el cual a su vez, en la totalidad de los casos cuenta con una composición compleja y variable de gases, líquidos y sólidos, entre los cuales se encuentran las especialmente dañinas partículas de combustión, comúnmente denominadas hollín.

Son precisamente los efectos negativos que tienen las emisiones de estas sustancias al medio ambiente y su efecto en la salud humana lo que motiva el diseño y desarrollo de los dispositivos de limpieza y retención. Las partículas que emiten los escapes de motores diesel son de naturaleza y toxicidad muy diferente y están presentes en ellas compuestos reconocidos como cancerígenos. Las partículas de carbón que contienen son de diámetro inferior a $0,1 \mu\text{m}$ y adsorben en su superficie otros hidrocarburos que forman parte de los líquidos condensados e incluso sulfatos por el contenido de azufre del combustible. Con todo y después de la aglomeración no se llegan a alcanzar diámetros superiores a los $0,8 \mu\text{m}$, es decir, partículas clasificadas como ultras finas y respirables. El IARC, que forma parte de la Organización Mundial de la Salud (OMS), ha clasificado en 2012 el escape de los motores de diesel como cancerígeno para humanos (categoría 1), basado en una evidencia suficiente de que la exposición está asociada a un aumento de riesgo de cáncer de pulmón. En 1988 ya se clasificó como probable cancerígeno en humanos (grupo 2A). [3]

En la actualidad, motivados por esta problemática, existen muchos sistemas para la limpieza de los diferentes contaminantes de dichos gases, ya sea mediante reacciones químicas o separaciones físicas.

1.2. Dispositivos de limpieza de partículas

El dispositivo diseñado en el presente artículo se centra en la limpieza de las partículas procedentes de la combustión, dejando de lado otros contaminantes. El hecho de centrarse en las partículas de combustión hace que dicho dispositivo tenga un mayor interés para las máquinas que produzcan altas concentraciones de partículas o cuya fabricación esté limitada por la misma. Para el caso del prototipo diseñado, la aplicación se centrará en productores de energía térmica de tipo doméstico, más concretamente en calderas de biomasa y motores diesel de generación eléctrica de baja potencia (<60kW).

Los dispositivos de limpieza de partículas consisten en el guiado del gas hacia una cámara donde alguna fuerza les impida abandonarla, separándolas de la corriente gaseosa. [2] Existen numerosos mecanismos de retención de las partículas (sedimentación, deposición inercial, difusión browniana...) entre los que se elige a partir de las características del gas que se desee limpiar. Una vez se conocen las concentraciones volumétricas de las partículas en el gas, sus tamaños aproximados en forma de distribución, el caudal y velocidad del gas puede elegirse el equipo más adecuado para cada caso. Al caracterizar las emisiones de las máquinas térmica doméstica (caldera de biomasa, motor diesel...) se pueden esperar resultados variables, pero dentro de un cierto rango que permite la selección del dispositivo de limpieza más adecuado:

- Concentraciones de partículas: entre 10 y 300 mg/m³
- Distribuciones de partículas: con el pico representativo en las partículas de entre 0,1 (motores diesel) y 1 micrómetros de diámetro de partícula
- Caudales de gas de escape: poco variables dentro de cada máquina. Hasta 1000 l/min
- Velocidades de gas: en torno a 1 m/s

Con todos estos datos, y teniendo en cuenta las condiciones de operación de las máquinas térmicas con las que se tendrá que lidiar se selecciona la atracción electrostática como mecanismo de retirada.

Los precipitadores electrostáticos aun siendo caros e inflexibles en cuanto al cambio de las condiciones de operación son muy eficientes para los tamaños intermedios y el tratamiento de grandes caudales volumétricos [2].

1.3. Precipitador electrostático. Fundamento y clasificación

En este apartado se explica el funcionamiento básico de un filtro electrostático y más tarde se clasifican por tipos, atendiendo a diversos patrones

Fundamento de los filtros electrostáticos

Un precipitador electrostático (conocido por sus siglas en inglés ESP: Electro Static Precipitator) es un sistema de limpieza de humos contaminantes. El dispositivo se basa en el principio de la atracción electrostática de partículas para despojar al flujo de humos de sus partículas contaminantes, para después recogerlas y tratarlas por separado, evitando su emisión a la atmósfera.

En un ESP, el humo contaminado, proveniente de procesos de combustión industriales, calderas o incluso motores térmicos, se hace pasar a través de una cámara donde es sometido a un intenso campo eléctrico. Existen muchos tipos de filtros electrostáticos, pudiendo clasificarlos según su geometría, método de carga de las partículas, temperatura de funcionamiento, aplicación...

Clasificación de los filtros electrostáticos [2]

Según el diseño estructural de sus electrodos:

- Tubulares: están formados por un electrodo de captación cilíndrico con un alambre central que hace la función de electrodo de descarga.
- De placas: se usan placas metálicas como electrodo de captación. Los electrodos de descarga pueden ser alambres, marcos rígidos o placas.

Según el método de carga:

- Una etapa: la carga de las partículas y su captación se producen en la misma zona.
- Dos etapas: las partículas pasan primero por un ionizador y luego son enviadas a otra parte del ESP, donde son captadas.

Según la temperatura de funcionamiento:

- Lado frío: la temperatura del gas es menor de 200°C.
- Lado caliente: la temperatura del gas se sitúa entre los 320 y los 420°C.

Según el método de eliminación de las partículas de la superficie de captación:

- Secos: eliminan las partículas sacudiendo las paredes del precipitador. El principal problema de este método es que algunas partículas se reincorporan al flujo de gas.
- Húmedos: se aplica un flujo de agua a las paredes para arrastrar las partículas captadas. Su principal inconveniente es que el manejo de los lodos es más complicado que el de un residuo seco.

Los precipitadores electrostáticos (ESP) son uno de los sistemas de captación de partículas más usados en la actualidad. A pesar de ser utilizados desde principios del siglo XX a nivel industrial con muy buenos resultados (a menudo el rendimiento alcanza el 99%) aún no se ha trasladado ese resultado a modelos a pequeña escala que puedan adaptarse a sistemas domésticos. Las nuevas normativas medioambientales impulsadas en los ámbitos nacional y europeo harán necesaria la miniaturización de los sistemas de captación existentes para poder cumplir las exigencias impuestas a las calderas domésticas de biomasa.

2. Objetivos

Los objetivos de la presente actividad experimental son los siguientes:

- La obtención de un prototipo de filtro electrostático tubular que sea capaz de funcionar durante largos periodos de tiempo, para hacer posible el desarrollo del propio filtro y de todos los subsistemas asociados.
- Adquisición del conocimiento necesario (tanto en el campo central del diseño como en los campos adscritos del control electrónico y la regeneración de la capacidad de retirada de partículas mediante los sistemas de limpieza de las partículas una vez retenidas) para así ser capaz de diseñar un prototipo orientado al mercado.
- Sentar las bases para el futuro diseño de un prototipo comercial, que pueda ser instalado en una conducción ya existente, pero con la eficiencia de retirado y la autonomía de funcionamiento adecuadas.

En los apartados venideros se detallan las actividades llevadas a cabo para la consecución de los objetivos, después de eso se presentarán los resultados obtenidos y tras su exposición se enunciarán unas conclusiones adscritas a los resultados obtenidos.

3. Método de trabajo

Para un óptimo proceso de re-diseño del precipitador electrostático tubular, es necesario conocer los puntos débiles del prototipo anterior. El prototipo anterior partía de la idea de cortar la conducción donde se emiten las partículas para la instalación de los soportes del electrodo central. Para evaluar el rendimiento y los problemas del primer prototipo se realizaron ensayos con el prototipo anterior.

Ensayos con el prototipo anterior

Se llevan a cabo una serie de ensayos con un prototipo ya construido de precipitador tubular y una instalación de ensayo que incluye las siguientes unidades:

Tabla 1: elementos necesarios para la evaluación y funcionamiento del filtro

Motor	PERKINS 403C-11
Generador eléctrico	GESAN DP9 400/230 V
Fuente de alta tensión	SPELLMAN SL50PN150
Opacímetro	TEXA Diesel Test

El tándem motor-generador eléctrico sirve para la producción de una corriente de gases de escape con partículas para poder estudiar su retirada. El generador eléctrico va asociado a un cuadro que permite gestionar la carga al motor y por ende la concentración de partículas emitida. Con el opacímetro se mide la opacidad, y con ayuda de una correlación se transforma en concentración de partículas para poder calcular el rendimiento del filtro, saber cuál es la diferencia entre la entrada a trabajar del filtro y el estado normal de emisión.

Se realizaron ensayos a diferentes tensiones de la fuente y a diferentes potencias del motor para tratar de establecer un punto óptimo de funcionamiento, momento en el que se descubre que la duración de los ensayos es corta en todos los casos, si se establece como objetivo el tiempo de funcionamiento que equivaldría a los periodos de funcionamiento en caso de implantación. Con el primer prototipo, en ningún caso se rebasan los 12 minutos de funcionamiento en recogida.

La causa de todos estos fallos se atribuye a la geometría del filtro. El hecho de que el filtro quiera ser instalado in-situ en la manera que se pensó en un principio, obliga a usar unos módulos de sujeción que han de estar fabricados con materiales aislantes, que sujeten el electrodo y garanticen su centrado dentro de la tubería. El problema radica en que al estar los elementos de sujeción situados concéntricamente a la tubería y al alcance de las partículas, con el tiempo se forma una capa de partículas en las paredes de las sujeciones por la que circula la electricidad (las partículas son conductoras, por lo que esa capa también lo es) estableciendo puentes de descarga entre el electrodo central emisor de electrones y el electrodo cilíndrico colector de las partículas cargadas y puesto a tierra. Estos puentes hacen que la electricidad se desvíe a través de ellos, evitando que se forme el campo eléctrico para limpiar, y deteniendo la fuente al detectar un exceso de corriente debido a la resistencia que ejerce la capa de partículas al paso de la electricidad, confundiendo esta con un peligroso exceso de corriente en el propio electrodo.

Proceso de re-diseño

El principio básico e innovador en el re-diseño es la separación de los órganos de sujeción del electrodo del paso del gas, para evitar la formación de puentes. Para ello, se cambia la geometría del precipitador y se pasa de una conducción recta con los elementos de sujeción montados en el paso del gas a un diseño de dos dobles “T” unidas de manera que el filtro posea cuatro bocas, dos para la entrada del gas y dos para la sujeción del electrodo.

- Se da un ángulo de 135° a los ramales de la T para suavizar el paso del gas por el interior
- Se fabrica el prototipo en acero AISI304, necesario para aguantar la corrosión del escape de las calderas de biomasa
- Se evitan las soldaduras en el interior en la medida de lo posible para evitar imperfecciones que lleven a acumulación de partículas y por ende a la descarga del campo en forma de indeseados arcos de descarga.

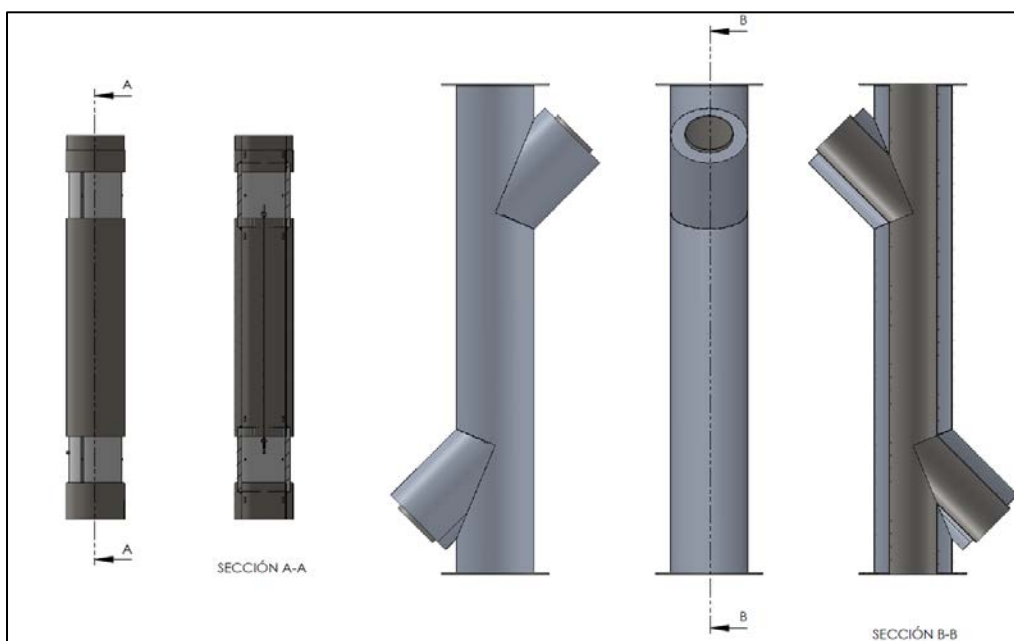


Figura1: Vistas de los modelos CAD de los dos prototipos, original (derecha) y re-diseñado (izquierda)

Resulta inevitable que la fabricación de un diseño teórico desvíe ciertas propiedades y medidas de lo inicialmente proyectado, en función de los materiales o tecnologías disponibles para la fabricación. Las medidas estándar de los aceros especiales, el espacio necesario para soldar, el remate de las tapas... toda una serie de factores que se han tenido que tratar con el fabricante en un continuo tira y afloja para encontrar un punto intermedio óptimo, válido tanto desde el punto de la teoría para una óptima limpieza, como desde el punto de vista de la fabricación sencilla y reproducible sin coste desorbitado.

Construcción del nuevo prototipo

Una vez recibido el nuevo diseño por parte de un fabricante local, se construye una estación que permita su manipulación, transporte y ensayo en las mejores condiciones. Para ello se diseña una estructura autoportante a medida y se construyen los elementos de sujeción, tensión y centrado del electrodo emisor de campo en material aislante. Se disponen los anclajes al motor diesel y los mismos sistemas de medida que en el anterior prototipo. Una vez se finalice el montaje, el prototipo empieza a emitir datos experimentales que servirán para su desarrollo y la consecución de sus objetivos.

4. Resultados alcanzados

Mediante el proceso de diseño se consigue un prototipo robusto y con menor incertidumbre. El hecho de tener que incluir los ramales en su geometría, y las exigencias impuestas al acabado interior hacen que el prototipo final recibido, al ser más grande y pesado, se conciba como más estable e invariante.

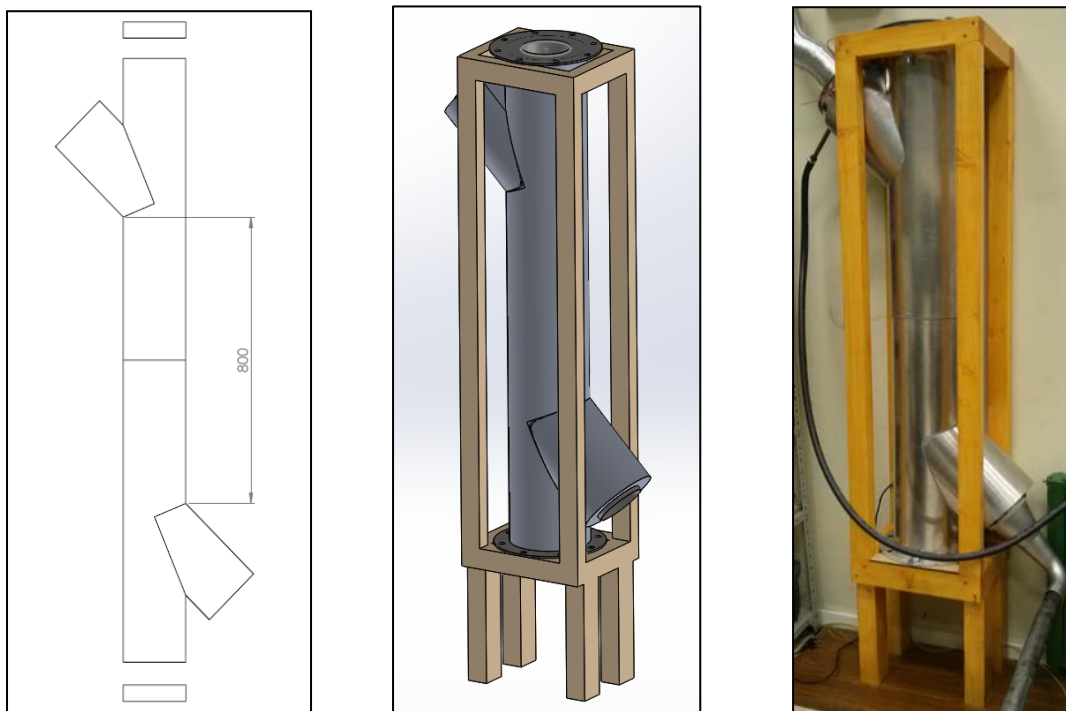


Figura2: Resultados de las diversas fases de diseño, desde boceto a prototipo ensayable

Cabe mencionar que el nuevo prototipo comienza a emitir datos experimentales que permiten su desarrollo día a día, para conseguir una buena duración de ensayo y rendimiento de retirada de partículas es necesario conocer los fenómenos electrostáticos que ocurren en el interior, para lo cual las curvas que enfrentan la tensión que se aplica desde la fuente, a la corriente que pasa por el electrodo, o curvas V-I, asociadas a cada prototipo, y su comparación con una curva teórica proveniente de modelos matemáticos empíricos son una herramienta muy útil:

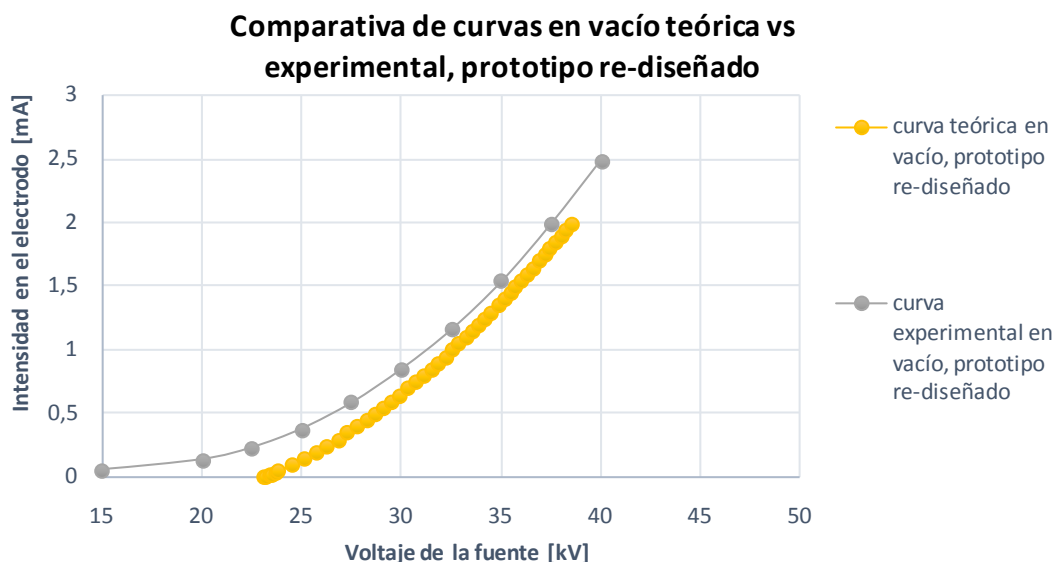


Figura 3: Curvas V-I teórica y experimental del nuevo prototipo, en un ensayo con aire en el interior (el término vacío referencia al contenido clave del filtro, el humo)

Junto con mejoras en el campo de la gestión electrónica de la corona, la nueva geometría permite ensayos de limpieza de partículas mucho más largos que los del prototipo del que se partía, extendiendo los tiempos de ensayo desde 2-12 minutos hasta las 2 horas de funcionamiento continuo, lo cual unido a los procedimientos de re-arranque y el sistema autónomo de limpieza en los que se trabaja en la actualidad, permiten un funcionamiento en continuo, pudiendo responder a las necesidades de limpieza de un productor de energía de ámbito doméstico.

5. Conclusiones y consideraciones finales

La idea principal del trabajo es el generar una geometría interna propensa a alargar los ensayos experimentales y continuar con la evolución del prototipo.

Como puntos fuertes, mediante la gestión separada de la aparamenta eléctrica interna del prototipo y del sucio flujo de gas de escape del motor se consigue crear zonas de baja turbulencia e incidencia del gas, lo cual, además de dejar sitio para instalar nuevos dispositivos de mejora, conduce a un aumento notable de la duración del ensayo, lo cual supone un plus en sus posibilidades de desarrollo en el resto de campos (electricidad, electrónica, sistemas autónomos de limpieza...).

A modo de inconveniente se presenta el hecho de que una geometría específica puede generar problemas a la hora de la implantación del sistema en una conducción de escape comercial, aunque ya existen soluciones para la creación de un nuevo prototipo totalmente comercial.

Las actividades de desarrollo anteriormente mencionadas han sido llevadas a cabo en paralelo con el re-diseño y siguen siendo llevadas a cabo en la actualidad, arrojando ya nuevos datos experimentales más propios de un prototipo en fase pre-comercial.

Con todo el ruido que está generando la emisión de partículas en la sociedad:

- En la automoción, la actual y exigente normativa EURO de emisiones están hiriendo de muerte al motor diesel, y con el tiempo se renuevan con cada vez más frecuencia, volviéndose cada una exponencialmente más restrictiva que la anterior.
- En el plano sanitario, cada vez se documentan más casos de problemas respiratorios a causa de las partículas procedentes de la combustión.

La combinación de estos dos factores de presión ha generado que los gobiernos de algunas ciudades europeas como París, estén llegando a los extremos de prohibir el uso de ciertos vehículos o alternar obligatoriamente su uso según tengan matrícula par o impar, por días)

Por todas estas causas, es de vital importancia que la comunidad científica responda una vez más a los problemas de la sociedad y demuestre que la tecnología es y será un valor de inversión seguro.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto ENE2012-36405

7. Referencias

- [1] IGLESIAS, I. GRANADA, E. PATIÑO, D. PORTEIRO, J. REGUEIRO, A. *Removal of particulate matter from the exhaust gas of a domestic biomass boiler using a small-scale electrostatic precipitator*. 35th International symposium on combustion, Agosto de 2014.
- [2] FLAGAN, R.C. SEINFELD, J.H. *Air pollution engineering*. New Jersey: Prentice Hall, 1988. 411 p. (Ed. Prentice Hall)
- [3] BERNAOLA ALONSO, M *La emisión de aerosoles de partículas y gases de motores diesel* Centro nacional de nuevas tecnologías, INSHT