

AGLOMERACIÓN ACUSTICA DE PARTÍCULAS EN AEROSOLES PROCEDENTES DE ACERÍA DE ARCO ELÉCTRICO

E. Riera¹, G. Rodríguez¹, A. Blanco¹, V.M. Acosta¹, J. A. Gallego-Juárez¹, J.J. Rodríguez Maroto², D. Sanz², E. Rojas², C. Gutiérrez-Cañas³, F. Vergniory⁴, R. Tucho⁵, F.J. Huertos⁵, J.M. Abad⁶

¹Grupo de Ultrasonidos de Potencia, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Serrano 144, E28006-Madrid, España, Tel.:+34 91 5618806. E-mail: enrique.riera@csic.es

²CIEMAT, Avda. Complutense 22, E28040-Madrid, España, Tel.: +34 913466524. E-mail: maroto@ciemat.es

³Departamento de Ingeniería Química y del Medio Ambiente, Universidad del País Vasco, Alameda Urquijo s/n, E48013-Bilbao, España, Tel.:+34 946 014033. E-mail: crisrina.gutierrezcanas@ehu.es

⁴Acero y Medio Ambiente, a.i.e. (ACYMA), San Vicente 8, E48001-Bilbao 22, España, Tel.: +34 94 4354984

⁵ARCELOR MITTAL I+D, Parque Tecnológico de Vizcaya, Edificio 207 C, E48160-Derio (Vizcaya), España, Tel.: +34 944 317236

⁶ARCELOR MITTAL Guipúzcoa, S.L.U., Barrio Artiz 34, E20700-Zumarraga (Guipúzcoa), España, Tel.: +34 943 726358

Resumen

Las partículas finas con diámetros inferiores a 5 micras, representan una fracción considerable de las emisiones de materia particulada en la industria. Estas partículas constituyen un riesgo para la salud, debido a su habilidad a penetrar dentro de los tejidos respiratorios al ser difíciles de separar mediante tecnologías convencionales tales como precipitadores electrostáticos, filtros de mangas, etc. La energía macrosónica proporciona un medio para solucionar este problema debido a que genera un proceso de aglomeración el cual produce un cambio en la distribución de tamaños de partícula. La aglomeración acústica (AA) es un proceso de colisión entre partículas que se puede atribuir entre otras causas, a un movimiento relativo entre las partículas en suspensión de diferente tamaño y también a la acción de las fuerzas hidrodinámicas resultantes de la distorsión mutua de los campos de flujo que las rodean. En este trabajo presentamos algunos resultados de los ensayos de laboratorio llevados a cabo sobre la AA de partículas procedentes de emisiones de acería de arco eléctrico. Para ello se ha desarrollado una pequeña instalación formada por un generador de partículas, una cámara de AA con un transductor de placa de 21 kHz, sistemas de control y equipos de medida de partículas. Al aplicar un campo acústico a 21 kHz a lo largo del aerosol con intensidades acústicas superiores a 150 dB se obtuvieron disminuciones significativas en la concentración numérica de partículas.

Palabras-clave: aglomeración acústica, transductores ultrasónicos de potencia, filtración, partículas finas.

Abstract

Fine particles, with diameters smaller than five microns, make-up a significant percentage of the particulate emissions in industry. These particles which are hazardous to health because of their ability to penetrate deeply into the respiratory tissues are difficult to remove by conventional technologies such as electrostatic precipitators, bag filters, etc. Macrosonic energy offers a means to solve this problem because induces agglomeration processes which change the particle size distribution. The

acoustic agglomeration (AA) is a collision process between particles that can be attributed, among other causes, on relative motion between suspended particles of different sizes which promotes particle collisions and also due to the action of hydrodynamic forces resulting from mutual distortions of the flow fields around them.

In this work we present results of laboratory tests carried out on the AA of aerosol particles from electric arc steelmaking. For this we have developed a small installation consisting of a particle generator, an AA chamber with a plate ultrasonic transducer at 21 kHz, control systems and equipment for measuring particles. A decrease of the particle number concentration was obtained when an acoustic field was applied at 21 kHz along the aerosol by means of acoustic intensities higher than 150 dB.

Keywords: acoustic agglomeration, power ultrasonic transducers, filtration, fine particles.

PACS no. 43.25.Vt, 43.35.Ty

1 Introducción

Las partículas muy finas, de tamaños inferiores a 2.5 micras (PM2.5) constituyen una fracción considerable de las emisiones de materia particulada en la industria: hasta un 26% en las plantas de generación termoeléctrica a partir del carbón, 35% en los procesos de producción de acero, 21% en la fabricación de cementos, etc. Estas micropartículas, que son difíciles de separar mediante tecnologías convencionales tales como precipitadores electrostáticos (PE) o filtros de mangas (FM), constituyen un riesgo notable para la salud al ser causantes de daños fisiológicos por su fácil adhesión a los tejidos del aparato respiratorio. A ello se suma, en muchas ocasiones, su carácter tóxico debido a su origen (condensación de sustancias químicas activas resultantes del proceso de combustión), como a su capacidad para actuar como vehículo de otros agentes nocivos (v.g. bacterias, virus, dioxinas, etc.). En la actualidad los sistemas comerciales de captación de polvo presentan notables problemas para controlar la emisión de las partículas finas (micrónicas y submicrónicas). Los más eficientes, como son los filtros de mangas y los lavadores, plantean dificultades para su utilización práctica, como son pérdidas de carga elevadas, mantenimiento complicado, altos consumos, etc. Los precipitadores electrostáticos presentan una clara disminución de la eficiencia precisamente para las partículas menores de 2 ó 3 micras junto a una limitación debida a las características eléctricas de las partículas.

La energía acústica puede ser utilizada en la eliminación de este tipo de partículas finas. En efecto, mediante la aplicación de ondas acústicas de alta intensidad y elevada frecuencia (macrosonidos) a una suspensión de partículas en un gas (aerosol), es posible provocar un proceso de aglomeración que tiene como resultado un cambio en la distribución de tamaños de las partículas hacia tamaños mayores así como una disminución en su concentración numérica. Estas partículas son así más fácilmente precipitables por métodos convencionales de separación (filtros de mangas, electrofiltros, ciclones) o bien gravitacionalmente (cámaras de decantación). Este fenómeno que se conoce con el nombre de aglomeración acústica (AA) de partículas, fue observado por primera vez por Patterson y Cawwood [1] al establecer un campo estacionario en el interior de un tubo. Poco tiempo después otros experimentos sobre la aglomeración acústica fueron llevados a cabo por Brant y Hiedemann en Alemania [2], Andrade en el Reino Unido [3] y St. Clair en USA [4]. Se demostró que partículas pequeñas a nivel microscópico lo suficientemente ligeras para permanecer suspendidas durante largos periodos de tiempo pueden ser aglomeradas por vibraciones ultrasónicas. Ello conduce a un incremento en el tamaño medio de partícula y consecuentemente a una precipitación más rápida bajo la influencia de la gravedad o de un precipitador convencional.

El proceso de la aglomeración acústica de partículas está gobernado por complejos mecanismos de interacción que normalmente aparecen combinados entre sí [5-9]. Cuando una partícula se encuentra en un campo acústico, varias fuerzas actúan sobre la partícula desplazándola de su posición inicial de equilibrio. Las interacciones onda acústica-partícula y partícula-partícula pueden clasificarse en función de: a) los efectos acústicos lineales que incluyen el arrastre de la partícula debida a la propagación de la onda acústica primaria (interacción ortocinética), y b) los efectos acústicos no lineales que incluyen dos tipos de interacciones hidrodinámicas asociadas al efecto de la presión de radiación mutua (PRM) originado por las ondas acústicas primaria y dispersada por la partícula [10, 11] y a las asimetrías acústicas de origen viscoso generadas en el fluido en torno a cada partícula, perturbando el medio, y por tanto alterando la dinámica de otras partículas próximas. Este último mecanismo de interacción se conoce como Estela Acústica [9,11].

En este trabajo presentamos algunos resultados de los ensayos de laboratorio llevados a cabo conjuntamente entre el CSIC y el CIEMAT sobre la AA de partículas procedentes de emisiones de acería de arco eléctrico. Las partículas fueron caracterizadas previamente a la realización de los ensayos de AA por la UPV. Las cenizas utilizadas en los ensayos fueron facilitadas por ARCELOR MITTAL. Para la realización de los ensayos se ha desarrollado una instalación formada por un generador de partículas, una cámara de AA con un transductor de placa de 21 kHz, sistemas de control y equipos de medida de partículas. Al aplicar un campo acústico a 21 kHz a lo largo del aerosol con intensidades acústicas superiores a 150 dB se obtuvieron disminuciones significativas en la concentración numérica de partículas. Paralelamente se llevo a cabo un trabajo de simulación numérica del proceso de AA en el interior de la cámara ultrasónica basado en el mecanismo de interacción ortocinética formulado por Mednikov lo que permite disponer de una herramienta predictiva potente de gran utilidad con vistas a posteriores diseños semi-industriales a escala de planta piloto.

2 Instalacion experimental en el laboratorio

Para realizar las pruebas a escala de laboratorio de tratamiento acústico de polvo de acería, se ha previsto la dispersión en forma de aerosol de muestras de dicho polvo para su alimentación a la instalación experimental. La instalación a escala de laboratorio está formada fundamentalmente por: un sistema de generación basado en la dispersión de polvo (PALAS, modelo BEG-1000), una cámara de aglomeración ultrasónica y una estación de muestreo y medida de partículas, así como las conducciones pertinentes para la conducción del aerosol (Figura 1). En dichas conducciones se han instalado sendos puntos de muestreo de aerosol antes y después de la cámara de tratamiento (ó cámara de aglomeración ultrasónica). El aerosol está compuesto por aire a temperatura ambiente y polvo de acería dispersado en él y se inyecta en la instalación aguas arriba del primer punto de muestreo. El flujo del aerosol por la instalación se produce mediante tiro inducido por un ventilador en cola, que impulsa los gases hacia un filtro antes de su descarga a la atmósfera. El caudal de aerosol en la línea se mide mediante un caudalímetro y se regula utilizando una válvula de mariposa situada tras el segundo punto de muestreo. La línea está construida con tubo ligero de acero inoxidable. En los puntos de muestreo se encuentran sondas de toma de muestra, provistas de boquillas de pared fina alineadas con el eje de la línea. El segundo punto de muestreo cuenta también con un tubo de Pitot para la medida de la velocidad del gas en el eje de la línea. En el primer punto de muestreo se ha conectado un portafiltros y un rotámetro, que permiten extraer muestras para la determinación gravimétrica de la concentración másica del aerosol. El caudalímetro utilizado es del tipo másico por dispersión térmica de inserción. En el segundo punto de muestreo, se encuentra conectada una estación de muestreo y medida para la caracterización del aerosol. La estación cuenta con dos instrumentos para la determinación en tiempo real de la distribución de tamaños y la concentración del aerosol. Por una

parte, un contador óptico por dispersión de luz blanca (PALAS PCS2000) permite la caracterización de las partículas de tamaño superior a un micrómetro. Además, un analizador de movilidad eléctrica diferencial (TSI SMPS) posibilita el análisis de las partículas de tamaño inferior a un micrómetro.

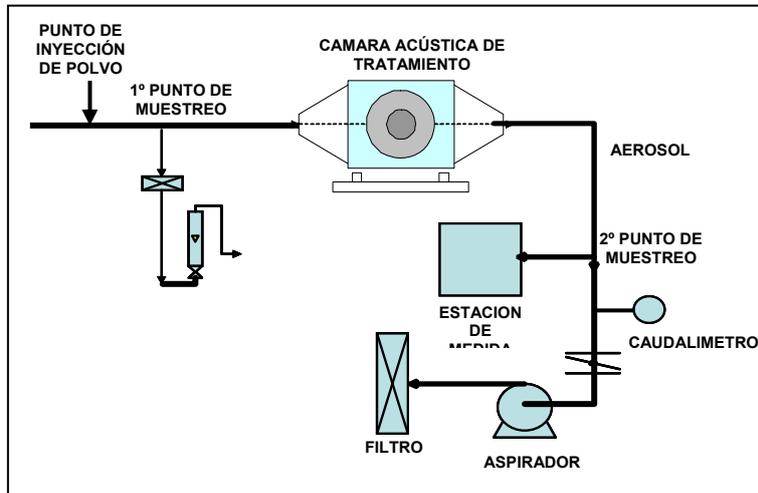


Figura 1 – Esquema de la instalación experimental de AA en el laboratorio

La cámara de aglomeración (o filtro acústico, FA) es de forma cúbica, con estructura de acero inoxidable y cerramiento con planchas de policarbonato transparente en sus caras frontal y superior para facilitar la observación/filmación de su interior a lo largo del proceso de AA. La entrada y la salida, situadas en caras opuestas, cuentan con transiciones y placas perforadas para la homogenización del flujo de aerosol. El transductor ultrasónico de placa circular está sintonizado para trabajar a una frecuencia de 21 kHz y se coloca tal y como se observa en la Figura 2. La placa radiante se sitúa en el interior de la cámara mientras que el vibrador ultrasónico que la excita se encuentra, parte en el interior y parte en el exterior de la cámara para facilitar su alimentación eléctrica. La placa radiante se encuentra montada verticalmente en uno de los laterales de la cámara. Está colocada perpendicularmente a la dirección del flujo de aerosol para generar un campo acústico de ondas estacionario de elevada intensidad ($I \geq 150$ dB).

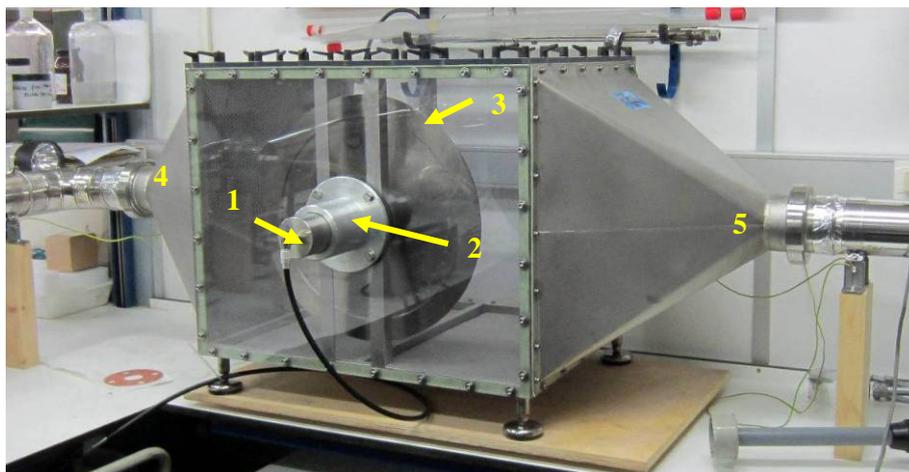


Figura 2 – Cámara de aglomeración ultrasónica (filtro acústico FA) con transductor de placa: (1) vibrador ultrasónico para 21 kHz; (2) brida de soporte y ajuste del transductor; (3) placa radiante circular; (4) entrada del aerosol y (5) salida del aerosol

2.1 Características del sistema ultrasónico de potencia

El transductor ultrasónico trabaja a su frecuencia de resonancia de 21 kHz, tiene una capacidad de potencia de 350W, un rendimiento electroacústico entre un 75% - 80% y un ancho de banda (a -3dB) de aproximadamente 1.5°. Para excitarlo se emplea un generador electrónico de ultrasonidos de potencia de diseño propio capaz de crear una señal eléctrica de excitación en onda continua, que después de ser sometida a diferentes acondicionamientos, se transforma en ondas acústicas de elevada intensidad que son emitidas a través del aire en el interior de la cámara de aglomeración. El generador consta de tres partes:

- a) un controlador electrónico. Es la parte del equipo encargado de generar y enviar la señal eléctrica de excitación al amplificador de potencia a la frecuencia de resonancia del transductor. Permite mantener la potencia de salida del amplificador en el nivel preasignado, ya sea fijo o variable en el tiempo, independientemente de las variaciones que pueda sufrir el medio gaseoso, hasta alcanzar las condiciones de operación. Todos los parámetros del controlador (frecuencia acústica, voltaje, corriente, fase, potencia aplicada) así como la impedancia del transductor son legibles y modificables tanto desde el teclado del equipo como desde un ordenador dotado de una línea de comunicaciones, dotado de un software de control, monitorización y adquisición de datos. El controlador dispone de un circuito PLL para seguimiento de fase y frecuencia de resonancia del transductor en condiciones de operación. Circuito de medidas de fase y potencia. Circuito de potencia;
- b) un amplificador de potencia. Es el dispositivo encargado de aumentar la potencia de la señal eléctrica de excitación generada por el controlador y enviarla al transductor;
- y
- c) un sistema adaptador de impedancias que adapta la impedancia de salida del amplificador a la impedancia de entrada del transductor. Su finalidad es posibilitar que el transductor utilice totalmente la energía suministrada por el amplificador. La impedancia de salida del sistema adaptador es ajustable y se fija en función de la respuesta del transductor al medio en el que se va a trabajar. Dispone de inductancia compensadora de la capacidad eléctrica del transductor y de un transformador 50 – 1000 Ω .
- d) un programa en código Labview. Para control, monitorización y adquisición de los parámetros eléctricos del transductor instalado en un PC-Portátil.
- e) un osciloscopio. Para visualización la forma temporal de las señales eléctricas en bornes del transductor (V, I).

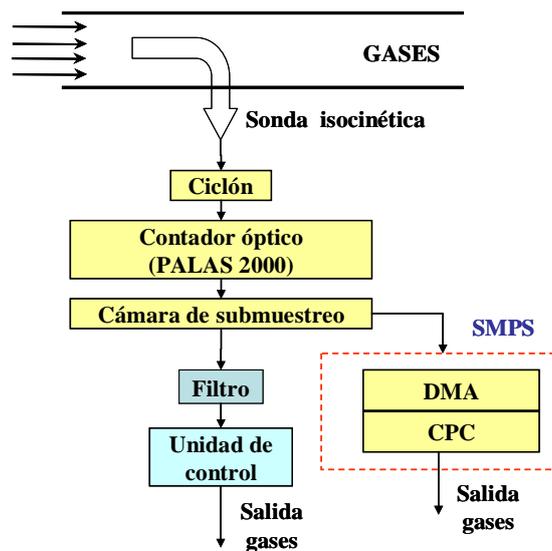


Figura 3 – Estación de muestreo y medida

2.2 Estación de muestreo y medida de partículas

La estación de muestreo y medida está formada por un sistema de muestreo automático (AUTO 5, Graseby Andersen), que permite muestrear en condiciones de isocinetismo y dos equipos de medida que abarcan dos intervalos de tamaño de partícula micrométrico (PALAS 2000) y submicrométrico (SMPS, TSI). El primero es un contador óptico, basado en la dispersión de la luz blanca y el segundo, esta formado por un clasificador por movilidad eléctrica diferencial (DMA) y un contador de núcleos de condensación, CPC. La medida con ambos equipos, permite determinar la distribución y concentración de tamaño de partículas en el intervalo de existencia del aerosol de ensayo.

La muestra es extraída de la línea a través de una sonda con boquilla intercambiable, mediante un sistema de succión y control. Posteriormente la muestra es conducida hasta la cabeza óptica del equipo PALAS 2000 y después de atravesar una cámara de submuestreo, donde parte de la muestra es desviada hasta el SMPS, filtrada y llevada al exterior.

3 Metodología y resultados experimentales

La instalación permite generar aerosoles a partir de diferente cantidad de polvo dispersado en distintos volúmenes de gas para ser tratado en la cámara de aglomeración. Esto se traduce en la posibilidad de ensayar con distintas concentraciones de partículas de aerosol y tiempo de residencia, considerando que ambos parámetros no son totalmente independientes. En los ensayos realizados se pretendía dispersar dos cantidades de aerosol, que coinciden con el porcentaje de regulación de 10 % (bajo) y 90 % (alto) del dispersador de polvo, nos referimos con ello al caudal másico (g/h) de dispersión del polvo. El caudal se variaría entre 100 y 500 m³/h, considerando un caudal bajo (≈ 150 m³/h), medio (≈ 300 m³/h), y alto (≈ 450 m³/h) lo que se traduce en una concentración teórica de partículas entre 0.02 y 0.9 g/l y un tiempo de residencia en la cámara entre 2 y 6 s, considerando: bajo (2 s), medio (3-4 s) y alto (6 s). Para estudiar el proceso de aglomeración acústica del aerosol se utilizó el transductor ultrasónico que trabaja a 21 kHz operando a dos potencias diferentes de 300W y 200W respectivamente. De esta forma se estudió el efecto de la potencia eléctrica aplicada al transductor, del tiempo de tratamiento y de la concentración numérica y másica del aerosol en el proceso de AA de partículas de acería.

3.1 Procedimiento experimental

En cada ensayo se ajusta primero el caudal de gas en la línea de ensayo, utilizando el caudalímetro másico y la válvula de mariposa. A continuación se comienza la inyección de polvo de acería, dejando un periodo de cinco minutos para que se establezca el flujo de aerosol. Seguidamente se realiza una caracterización del aerosol de ensayo en el segundo punto de muestreo, o sea, a la salida de la cámara de aglomeración, utilizando la estación de medida. El aerosol de ensayo debe presentar distribuciones de tamaño coherentes para proceder a la validación. Hay que tener en cuenta que las pruebas previas mostraron que la dispersión del polvo de acería es bastante complicada, debido a la cohesividad progresiva que provoca la obstrucción de los conductos en el eyector. Esto dificulta o imposibilita la estabilidad en concentración a lo largo del ensayo y crea la necesidad de una continua limpieza en el dispersador de polvo.

La caracterización del aerosol consta de una serie de medidas realizadas con ambos instrumentos (PALAS y TSI). Se realizan dos caracterizaciones, una con el sistema de tratamiento acústico desactivado (-FA/OFF) y otra con el sistema de tratamiento acústico activado (+FA/ON). Se repiten de nuevo las caracterizaciones. Entre ambas se deja transcurrir también un periodo de cinco minutos.

A lo largo de todo el ensayo se realizan varias tomas de muestra en el primer punto de muestreo para confirmar la concentración másica de aerosol. Para ello se realizan tomas de muestra cronometradas

con un caudal controlado (entre 5 y 10 litros por minuto, según el caudal total de aerosol en la línea) en filtros de celulosa de 47 mm de diámetro tarados y pesados en microbalanza. Alternativamente, en algunos ensayos se fue registrando el peso de polvo que se añadía periódicamente a la tolva del dispersador con el fin de estimar el caudal másico de polvo dispersado.

En aquellas ocasiones en que se ensaya con diferentes concentraciones de aerosol, para cambiarlas se actúa sobre el regulador de velocidad del dispersador de polvo. Como siempre que se realiza cualquier alteración en las condiciones de funcionamiento de la instalación, se deja transcurrir un periodo de cinco minutos antes de comenzar a realizar medidas de caracterización del aerosol.

Antes de comenzar los experimentos de AA se procede a conectar el Generador Electrónico de ultrasonidos de potencia (UdP), un osciloscopio y un PC-Portátil. A continuación se abre la aplicación desarrollada en código LabView en el PC para comprobar la correcta comunicación a través de tarjeta de adquisición entre el Controlador Electrónico y el Ordenador. Se programa el procedimiento/secuencia temporal de trabajo a seguir por el generador electrónico de ultrasonidos durante las pruebas (potencia aplicada y secuencia temporal). Ello permite controlar de forma automática tanto los tiempos de encendido/ON (+FA) como de apagado/OFF (-FA) del transductor ultrasónico de potencia.

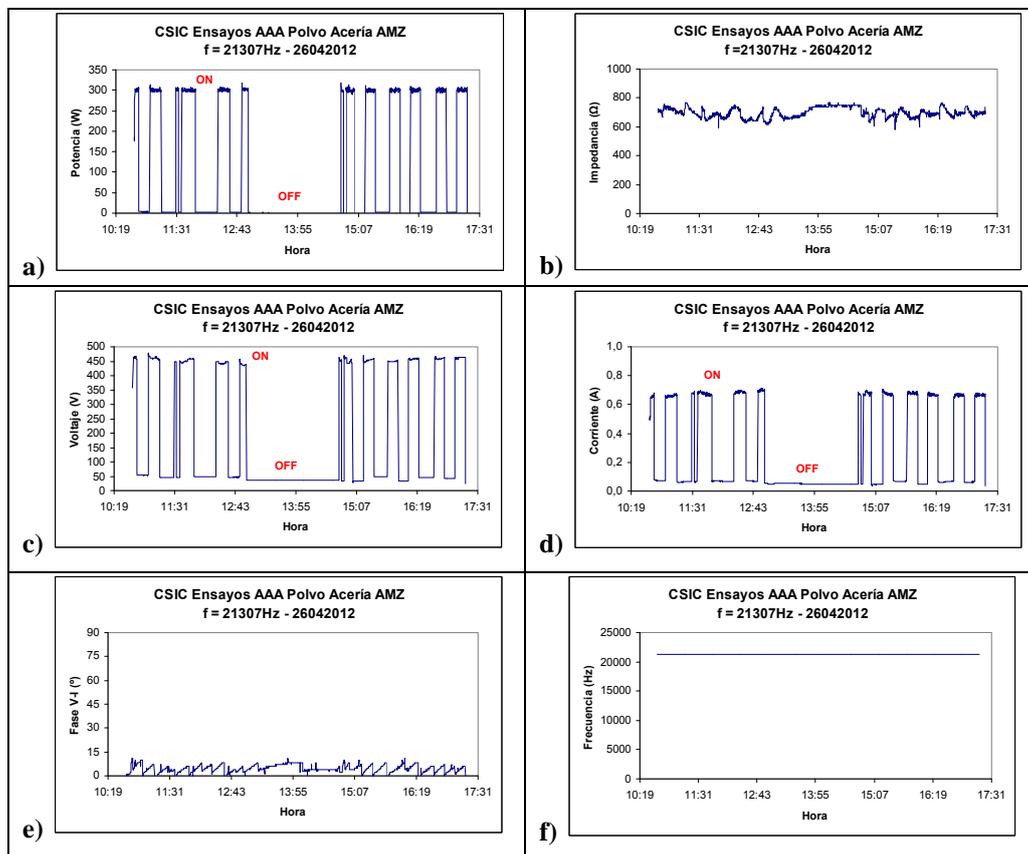


Figura 4 – Variación de los parámetros eléctricos del transductor ultrasónico: a) potencia eléctrica (P), b) impedancia (Z), c) voltaje (V), d) corriente (I), desfase entre V e I (fase) y e) frecuencia de excitación (f). En la figura ON/OFF indica CON/SIN campo acústico aplicado

En la Figura 4 se muestran, a modo de ejemplo ilustrativo del procedimiento de control, monitorización y adquisición de los parámetros eléctricos del transductor (P, Z, V, I, fase, f), la variación de dichos parámetros en las pruebas en función del tiempo de duración de los ensayos cuando se aplican 300W al transductor.

3.2 Resultados experimentales

A continuación se presentan dos ejemplos de los resultados obtenidos en los ensayos llevados a cabo en los que se muestran en forma gráfica las distribuciones de tamaño obtenidas con los dos equipos de medida, contador óptico (PALAS) y SMPS, especificando las condiciones del ensayo. En las gráficas de resultados se distinguen cuatro tipos de líneas que corresponden secuencialmente al desarrollo de las medidas:

- 1º línea roja; aglomerador ultrasónico o filtro acústico desactivado (-FA/OFF)),
- 2º línea azul; aglomerador ultrasónico o filtro acústico activado (+FA/ON))
- 3º línea magenta; aglomerador ultrasónico o filtro acústico desactivado (-FA/OFF)
- 4º línea azul claro; aglomerador ultrasónico o filtro acústico activado (+FA/ON)

Se llevaron a cabo inicialmente experimentos a concentración teórica baja de aerosoles, $0,046 \text{ g/m}^3$, siendo el tiempo de residencia en la cámara de 3 segundos con el transductor de 21 kHz trabajando a 300W. El registro del peso de polvo que periódicamente se iba añadiendo a la tolva del dispersador permite concluir que el caudal másico de polvo dispersado era próximo a 100 g/h cuando la regulación del dispersador se fijaba en el valor más alto de los seleccionados. Se observó en tales circunstancias, una disminución en la moda del 75 % al aplicar el campo acústico (Figura 5). Ello indica claramente un efecto positivo del campo acústico sobre las concentraciones finales másica y numérica del aerosol.

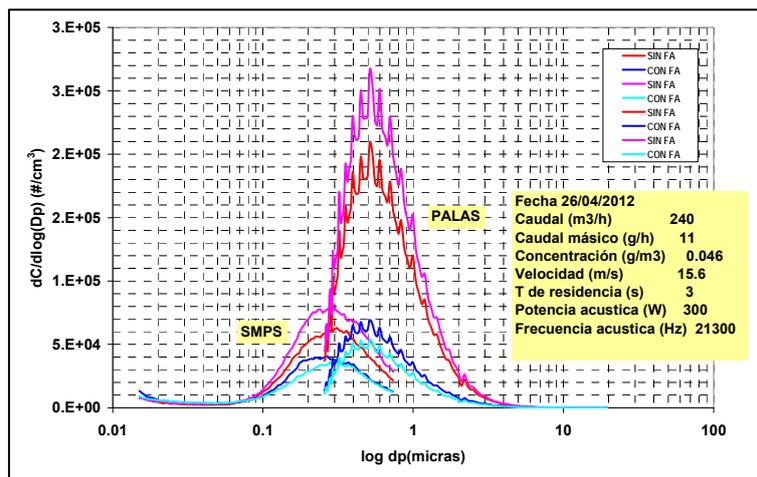


Figura 5 – Distribuciones numéricas de tamaño de partícula. Eficacia del proceso de aglomeración acústica y deposición 75%. Potencia eléctrica aplicada al transductor 300W.

De los ensayos se observa que la concentración alta del aerosol a tratar y el tiempo de residencia en la cámara de ultrasonidos son parámetros fundamentales en el proceso de aglomeración de este tipo de partículas, lo que está de acuerdo con la teoría. Con el fin de corroborar estas apreciaciones se llevaron a cabo una nueva serie de ensayos a una menor potencia eléctrica aplicada al transductor de 200W. Se plantearon dos ensayos con tiempo de residencia bajo $\approx 3 \text{ s}$ y otros dos con tiempo de residencia alto $\approx 6 \text{ s}$. De cada pareja uno se realizaría con una concentración media baja y el otro con concentración más alta.

En la Figura 6 presentamos los resultados obtenidos al aplicar al transductor una potencia de 200W. Es fácil observar que cuando el dispersador funciona con la regulación alta, aunque se observan variaciones en el aerosol de ensayo, estas no son muy significativas, es decir el aerosol de partida se mantiene estable. En estas condiciones la concentración de las partículas determinada mediante filtros tomados en el primer punto de muestreo fue de $0,86 \text{ g/m}^3$ y la disminución de la moda alcanzó un

50%. Este nuevo resultado ratifica de nuevo un efecto positivo del campo acústico sobre las concentraciones finales másica y numérica del aerosol.

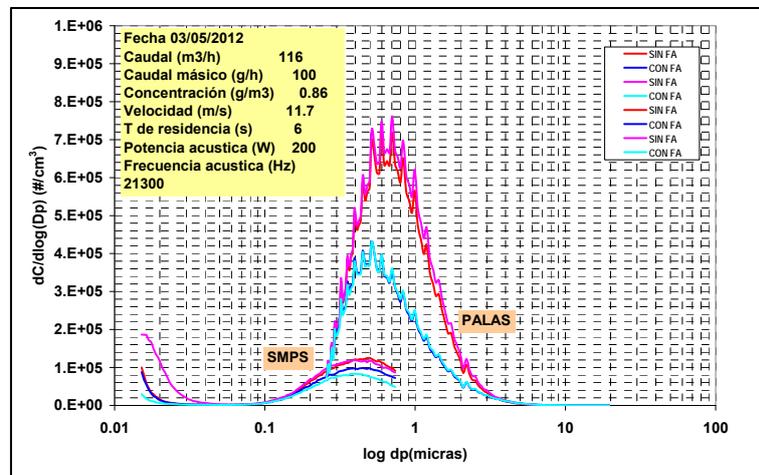


Figura 6 – Distribuciones numéricas de tamaño de partícula. Eficacia del proceso de aglomeración acústica y deposición 50%

En los ensayos llevados a cabo en el laboratorio en los que el aerosol se mantuvo estable a lo largo del tiempo, se puso de manifiesto el efecto positivo de la AA lo que confirma la validación del proceso con partículas de aceria, sin embargo, hubo otros ensayos posteriores en los que se puso de manifiesto que la dispersión de polvo de aceria conlleva grandes dificultades debido a la cohesividad del mismo que inhabilita el sistema de barrido del dispersador de polvo a lo largo del tiempo, provocando inestabilidades en la generación del aerosol lo que ha causado el descarte de gran parte de los ensayos de validación realizados. Ello hace necesario poder disponer de una herramienta numérica predictiva del proceso de aglomeración acústica de aerosoles capaz de evitar estos problemas experimentales. Para ello el CSIC ha desarrollado un primer modelo simplificado del proceso de AA que describiremos brevemente a continuación basado en el mecanismo ortocinético desarrollado por Mednikov.

4 Modelado del proceso de aglomeración acústica basado en el mecanismo ortocinético

El mecanismo de interacción ortocinético está basado en el modelo de arrastre vibratorio según el cual las partículas de un aerosol sometido a un campo acústico $u_g = U_o \cos(\omega t - kx)$ experimentan un movimiento vibratorio inducido en el que tanto sus desplazamientos como sus velocidades de vibración dependen de su tamaño, de su masa y de la amplitud y frecuencia de la onda acústica emitida. Así, mientras las partículas más grandes permanecen prácticamente en reposo, las más pequeñas siguen el movimiento vibratorio del medio. El modelo de Mednikov [5] estudia la diferencia de fase generada entre las partículas vibrantes y desarrolla el concepto de volumen de aglomeración acústica definiéndolo como el espacio ocupado por una partícula durante un ciclo acústico. De esta forma, aquellas partículas más arrastradas por el campo acústico adquieren un volumen de aglomeración mayor que las partículas estacionarias. Cuando intersecten dos volúmenes de aglomeración, la probabilidad de colisión y aglomeración será elevada. Despreciando los efectos gravitacionales, las partículas más pequeñas que siguen el movimiento vibratorio del medio penetran en el volumen de aglomeración de las partículas mayores (o núcleos de aglomeración) que

permanecen prácticamente estacionarias en el medio gaseoso. Se produce así su colisión y posterior aglomeración. Suponiendo que de cada colisión resulta aglomeración, los volúmenes de los núcleos de aglomeración se vaciaran al cabo de un ciclo acústico. Por ello no se producirán colisiones y aglomeraciones hasta que nuevas partículas sean transportadas dentro de este volumen. Este transporte de nuevas partículas constituye el proceso denominado de rellenado del volumen de aglomeración. La ecuación dinámica de un aerosol formado por partículas de dos tamaños diferentes, está basada en la primera ley de difusión de Fick. Esta ley establece que la velocidad de producción de colisiones n_{12} entre partículas de tamaño 1 y de tamaño 2 se expresa de acuerdo con Drake [13] como

$$\frac{dn_{12}}{dt} = -K_{12}n_1n_2 \quad (1)$$

en donde K_{21} es *el coeficiente (o kernel) de aglomeración* para partículas de los grupos de tamaños 1 y 2; n_1 y n_2 son las concentraciones iniciales para los dos grupos respectivamente. Considerando la aglomeración en un aerosol polidisperso (donde participan mas de dos tamaños de partículas) la velocidad con que cambia el número de partículas n_k en el grupo k se describe en forma discreta como

$$\frac{dn_k}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k \sum_{j=k-i}^k K_{ij}n_in_j - n_k \sum_{i=1}^{\infty} K_{ik}n_i \quad (2)$$

Aquí el primer miembro de la ecuación representa el aumento de partículas en el grupo k por combinación de partículas de los grupos i y j , los cuales contienen partículas más pequeñas que las del grupo k . El factor 1/2 es necesario para evitar contar doble número de combinaciones de parejas iguales. El segundo término precedido de un signo negativo, considera la pérdida de partículas de tamaño k por aglomeración de las mismas con partículas de cualquier otro grupo. Si se conoce el coeficiente K_{ij} para un mecanismo dado de aglomeración en la totalidad del rango de tamaños de partícula que interesa, la dinámica del aerosol puede ser simulada implementando la ecuación (2) en un esquema de interacción progresiva. Este procedimiento proporciona la evolución temporal de la distribución de partículas bajo la influencia de un mecanismo específico de aglomeración.

Mednikov definió el coeficiente de aglomeración ortocinético en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} K_{Mednikov}^{ORTO} &= 2\varepsilon\beta(a_1 + a_2)^2 U_o \sqrt{H_1^2 + H_2^2 - 2H_1H_2(H_1H_2 + B_1B_2)} \\ H_1 &= \frac{U_1}{U_o} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}}; H_2 = \frac{U_2}{U_o} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_2)^2}} \\ B_1 &= \frac{\omega\tau_1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_1)^2}}; B_2 = \frac{\omega\tau_2}{\sqrt{1 + (\omega\tau_2)^2}} \\ \varepsilon &= (1 + a_2/a_1)^2 - 1/(1 + a_2/a_1) \end{aligned} \quad (3)$$

donde las funciones H_1 y H_2 , representan los coeficientes de arrastre de las partículas, y B_1 y B_2 sus coeficientes de fluidez, ε el factor de captura y β el factor de relleno del volumen de aglomeración. Estas funciones dependen del tamaño de partícula (a_1 , a_2), de la frecuencia acústica de la onda emitida (f), de la amplitud de la onda acústica (U_o), del tiempo de relajación de la partícula (τ_1 , τ_2) el cual a su vez es función de la densidad de la partícula (ρ_1 , ρ_2) y de la viscosidad del fluido (ν). En el caso

particular en el que la concentración de partículas finas sea mucho mayor que el de las partículas grandes $n_1 \gg n_2$ y que $a_1 \ll a_2$ la ecuación (3) toma la forma:

$$K^* = 2\varepsilon\beta a_2^2 n_2 U_o \sqrt{H_1^2 + H_2^2 - 2H_1H_2(H_1H_2 + B_1B_2)}$$

$$n = n_o e^{-K^*t} \quad (4)$$

A partir de las ecuaciones (4) se ha desarrollado un programa de simulación numérica del proceso de AA basado en el mecanismo de interacción ortocinético que permite estudiar el efecto de la cámara de aglomeración (o filtro acústico) por separado o acoplado en serie con un filtro electrostático (FE) y/o filtro de mangas (FM). Para la simulación del efecto de los filtros FE y FM es necesario disponer de la curva de respuesta de cada filtro por separado. A modo de ejemplo en la Figura 7 se muestra el efecto del tiempo de tratamiento en el proceso de AA de partículas de acería. Los datos iniciales del aerosol corresponden a los medidos en la instalación experimental y mostrados en las distribuciones numéricas de la Figura 5 con el campo acústico desactivado (OFF). En la figura se aprecia claramente el efecto positivo del tiempo de aglomeración en el proceso de aglomeración de partículas de acería.

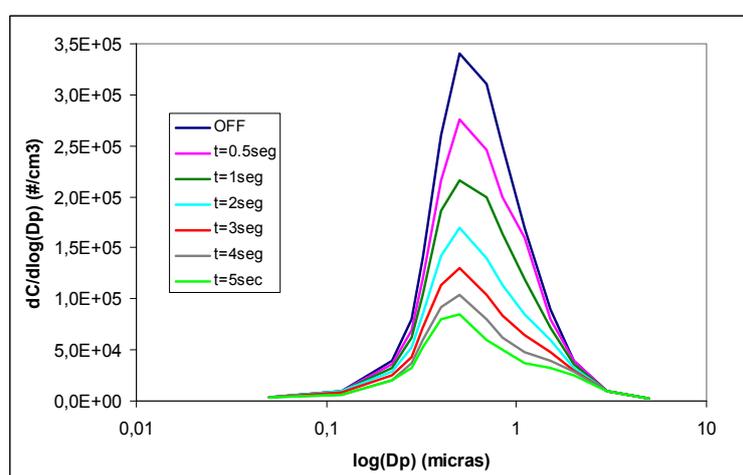


Figura 7 – Simulación numérica en el interior de la cámara de aglomeración (o filtro acústico) del efecto del tiempo de tratamiento en la AA de partículas de acería. Datos del transductor: frecuencia = 21 kHz y potencia = 300W

5 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado una instalación experimental a escala de laboratorio para determinar la posible aplicación de un sistema de precondicionamiento basado en la aglomeración acústica (AA) para incrementar la eficacia de los sistemas convencionales de filtración de partículas utilizados en emisiones de acería. Para ello se ha utilizado un sistema ultrasónico de potencia basado en transductor de placa radiante sintonizado a 21 kHz que ha trabajado a dos potencias 300W y 200W. Los ensayos se llevaron a cabo con un aerosol generado a partir de la dispersión de polvo de acería. Los experimentos se llevaron a cabo en condiciones ambientales. Cuando el aerosol de ensayo es estable se comprueba que la mayor concentración de partículas y el tiempo de tratamiento mas largo en la cámara de aglomeración (o filtro acústico) permiten alcanzar eficacias de aglomeración-retención que pueden ser superiores al 50%. Además se ha puesto a punto una herramienta numérica predictiva

basada en el mecanismo de interacción ortocinético que permite estudiar, en primera aproximación, la influencia de los parámetros del aerosol y del campo acústico en el proceso de aglomeración acústica. Los resultados numéricos calculados presentan un ajuste muy aceptable con los resultados experimentales medidos en el laboratorio.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado en el marco del Acuerdo Especifico de Colaboración establecido en 2011 entre el CSIC, la UPV y la Fundación Investigación Universidad Empresa EUSKOIKER del País Vasco. Damos las gracias a Alberto Pinto e Ignacio Martínez por su contribución a los trabajos experimentales.

Referencias

- [1] H.S. Patterson and W. Cawood, Phenomena in sounding tube, *Nature* 127 (3209) (1931) 667.
- [2] O. Brant and E. Hiedemann, The aggregation of suspended particles in gases by sonic and ultrasonic waves, *Trans. Faraday Soc.* 24 (1936) 1101-1110.
- [3] C. da Andrade, The coagulation of smoke by supersonic vibration, *Trans. Faraday Soc.* 134 (1936) 1111-1115.
- [4] H.W. St. Clair, Agglomeration of smoke, fog, or dust particles by sonic waves, *Ind. Eng. Chem.* 41 (11) (1949) 2434-2438.
- [5] E.P. Mednikov, Acoustic coagulation and precipitation of aerosols, Consultants Bureau, New York, (1965).
- [6] N.L. Shirokova, Aerosol coagulation, in: L.D. Rozenberg (Ed.), *Physical Principles of Ultrasonic Technology*, 2, Plenum Press, New York, (1973) 475-539, Part X.
- [7] D.T. Shaw, Acoustic agglomeration of aerosols, in D.T. Shaw (Ed.), *Recent developments in aerosol science*, John Wiley and Sons, New York, 1978, pp. 279-321 (Chapter 13).
- [8] S. Temkin, Gas dynamic agglomeration of aerosols. 1 Acoustic-waves, *Phys. Fluids* 6 (1994) 2294-2303.
- [9] T.L. Hoffmann, Visualization of particle interaction and agglomeration in an acoustic field, *Ph.D. Dissertation*, The Pennsylvania State University, 1993.
- [10] I. González, Estudio de las interacciones hidrodinámicas de origen viscoso en la aglomeración acústica de partículas, *Tesis Doctoral*, Dpto. de Física de Materiales, UCM (1998).
- [11] E. Riera, L. Elvira, I. González, J.J. Rodríguez, R. Muñoz, J.L. Dorronsoro, (2003) Investigation of the influence of humidity on the ultrasonic agglomeration of submicron particles in diesel exhausts, *Ultrasonics* 41 (2003) 277-281
- [12] I. González, J.A. Gallego, E. Riera, Experimental study of hydrodynamic interactions acoustically induced on aerosols at diverse acoustic entrainments: Influence of the particle entrainment, *Journal of Aerosol Science* 34 (2003) 1611-1631
- [13] R.L. Drake, A general mathematical survey of the coagulation equation, *Int. Rev. Aerosol Phys. Chem.*, 3 (1976) 201-376.