

## **ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN EN LFC Y GASOIL MEDIANTE CAMPOS ACÚSTICOS ESTACIONARIOS NOLINEALES**

REFERENCIA PACS: 43.25.-x; 43.35.-c

E. Riera<sup>a</sup>, J.A. Gallego<sup>a</sup>, G. Rodríguez<sup>a</sup>, F. Vázquez<sup>a</sup>, I. González<sup>a</sup>, V.M. Acosta<sup>a</sup>, E. Andrés<sup>a</sup>, J.J. Rodríguez<sup>b</sup>, J.L. Donrroso<sup>b</sup>, D. Sanz<sup>b</sup>, F.J. Gómez<sup>b</sup>, M. Martín<sup>b</sup>

(a) Instituto de Acústica, CSIC, Serrano144, 28006 Madrid, España

(b) CIEMAT, Avda. Complutense 22, 28040 Madrid, España

email: eriera@ia.cetef.csic.es

### **ABSTRACT**

One of the most important problems to solve about environmental pollution is removing fine particle emissions ( $< 2.5 \mu\text{m}$ ) from coal and diesel combustion plants. New specific technologies are required to solve this problem because conventional filter techniques are generally inefficient. Acoustic agglomeration can be a method able to enhance the efficiency of the filtration systems and retain these particles. In this work, development and performance evaluation of a new macrosonic technology (at 10 kHz and 20 kHz) is proposed for reduction micro-particle emissions, in combination with an electrostatic filter in a pilot plant installation.

### **RESUMEN**

La eliminación de partículas finas ( $< 2.5 \mu\text{m}$ ) de las emisiones producidas en plantas de combustión de carbón y gasoil es uno de los principales problemas en la contaminación atmosférica. Las técnicas de filtración convencionales resultan ineficientes en la retención de estas partículas por lo que es necesario desarrollar nuevas tecnologías. La aglomeración acústica puede constituir un método capaz de mejorar la eficiencia de los sistemas de filtración en la retención de estas partículas. En este trabajo se propone validar la utilización de una nueva tecnología macrosónica (a 10 kHz y 20 kHz) en combinación con un filtro electrostático para la reducción de emisiones de micropartículas a nivel de planta piloto.

### **INTRODUCCIÓN**

Dentro de los problemas medioambientales producidos por materia particulada, requieren una atención especial los producidos por partículas finas (micrónicas y submicrónicas) por ser los que representan mayores dificultades de resolución y plantean un verdadero reto tecnológico. En la actualidad los sistemas comerciales de captación de polvo presentan notables dificultades para controlar las emisiones de partículas finas inferiores a 2.5 micras. Los mas eficientes como son los filtros de mangas y los lavadores presentan problemas para su utilización práctica, como son pérdidas de carga elevadas, mantenimiento complicado, altos consumos, contaminación de aguas, etc. Los precipitadores electrostáticos, que son los mas comúnmente empleados en instalaciones industriales, presentan una clara disminución de la eficiencia precisamente para partículas menores de dos o tres micras.

A mediados de los años 90 la importancia de esta problemática y su impacto en la opinión publica ayudaron a que las compañías de producción de electricidad, entre otras industrias, y los fabricantes de filtros se interesasen por hallar soluciones tecnológicas nuevas a los problemas de retención de las partículas finas de los gases procedentes de las emisiones industriales. En este sentido la energía acústica puede ser utilizada en la eliminación de este tipo

de partículas ultrafinas [1]. Así, mediante la aplicación de ondas acústicas de alta intensidad (macrosonidos) a una suspensión de partículas en un gas (aerosol), es posible provocar un proceso de aglomeración que tenga como resultado un cambio en la distribución de tamaños de las partículas reduciendo su concentración numérica inicial y produciendo un desplazamiento de sus tamaños medios hacia valores superiores. Estos aglomerados son así más fácilmente retenidos por métodos convencionales de filtración-retención (electrofiltros, filtros de mangas, ciclones) o bien gravitacionalmente (cámaras de decantación).

Desde hace varios años el Instituto de Acústica viene desarrollando una nueva tecnología macrosónica para la aglomeración de partículas entre 0.1 y 10 micras [2,3,4]. La colisión entre partículas se puede atribuir entre otras cosas, a la diferente amplitud de vibración de las mismas, a sus interacciones hidrodinámicas y a los movimientos de traslación que se producen en dichas partículas al actuar sobre ellas un campo acústico de intensidad elevada. Para validar la bondad del pretratamiento acústico para la reducción de materia particulada emitida a la atmósfera se planteó en 1995, a propuesta de la empresa ENDESA, la conveniencia de aplicar las tecnologías macrosónicas en el desarrollo de una instalación piloto para la aglomeración y separación de micropartículas en gases de combustión de carbón de lecho fluidizado (LFC) para su aplicación a centrales térmicas. A este fin, se desarrolló la 1ª Fase del proyecto financiado por el Sector Eléctrico Español (PIE Nº 131.095) en el que el Instituto de Acústica ha contado con la colaboración de otros grupos de investigación y empresas (CIEMAT, ASINEL y Duro-Felguera). Hay que destacar especialmente la participación del CIEMAT por su gran experiencia tanto en problemas de combustión de carbón como en la medida y caracterización de aerosoles industriales. Los objetivos de esta primera fase han sido:

- Diseño, desarrollo y construcción de una Instalación Experimental combinada de Filtro Acústico - Filtro Electrostático (FA + FE) para tratar caudales de unos 2000 Nm<sup>3</sup>/h.
- Ensamblaje de la instalación a una planta piloto de combustión de carbón de lecho fluidizado de 0.5 MWT de potencia perteneciente al CIEMAT.
- Validación de la instalación experimental de captación de partículas.

Frecuencia de Resonancia	Diámetro de placa	Círculos nodales	Rendimiento	Directividad ( $\Delta B$ a 3 dB)	Capacidad de Potencia	Impedancia	Máximo Nivel de Intensidad
10 kHz	67 cm	5	75-80 %	$\cong 1.5^\circ$	0.9 kW	400-600 $\Omega$	165 dB
20 kHz	48 cm	7	75-80 %	$\cong 1.5^\circ$	0.5 kW	500-700 $\Omega$	165 dB

Tabla 1. Características de los transductores Macrosónicos

La instalación experimental combinada FA + FE [5] ha sido experimentada con humos cuyas partículas presentan una distribución bimodal con un modo submicrónico entorno a 0.1 $\mu$ m y otro micrónico en 1 $\mu$ m. El FA consiste en una cámara metálica calorifugada, en cuyo fondo y en dirección longitudinal, va instalado un array lineal de cuatro transductores piezoeléctricos de potencia de placa radiante de geometría circular y perfil escalonado cuyas principales características aparecen resumidas en la Tabla 1. En el FA se generan campos acústicos estacionarios no lineales a 10 kHz y/o 20 kHz con NPS medios en torno a los 151dB cuando los transductores operan a su máxima potencia 4Tx400W. Las condiciones de operación de los humos en el FA son: caudales  $\leq 1600$  Nm<sup>3</sup>/h, temperatura de los humos de entrada  $\leq 350^\circ\text{C}$ , velocidades de los humos  $\leq 1.3$  m/s con tiempos de tratamiento de hasta 2.3s. Los resultados obtenidos han dado lugar a diversas publicaciones [5,6,7] demostrando que la aglomeración producida por el sistema acústico, aumenta significativamente la retención másica y numérica de partículas micrónicas y submicrónicas en el filtro electrostático, alcanzándose en promedio mejoras en torno al 50%.

Estos primeros resultados positivos, no pueden ocultar, sin embargo la existencia de ciertas incertidumbres en las medidas, a causa de la complejidad del proceso de medida y de las dificultades inherentes al control de las características de los efluentes gaseosos. Por otra parte, hay que tener presente que dado el número y variedad de los parámetros que intervienen en el proceso se requiere profundizar y ampliar el estudio de la influencia de los mismos para poder acceder sólidamente a cualquier aplicación industrial. Con este objetivo y con la extensión de la

aplicación al caso de efluentes gaseosos procedentes de la combustión de gasoil, se ha acometido la realización de un nuevo proyecto de I+D coordinado con el CIEMAT y financiado por el Plan Nacional de Medio Ambiente (AMB96-1211-CO2-01) cuyos resultados mas relevantes se presentan a continuación en este trabajo.

## ESTUDIO Y TRATAMIENTO DE EMISIONES DE PARTÍCULAS FINAS EN EFLUENTES GASEOSOS DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN Y GASOIL.

### Adecuación de la instalación experimental de combustión y de la línea de proceso a la generación y tratamiento de efluentes.

Con el fin de eliminar las incertidumbres aparecidas en algunas de las medidas con humos de LFC y de extender la aplicación de la tecnología acústica a humos procedentes de la combustión de gasoil se ha llevado a cabo una extensión y adecuación de la instalación experimental de combustión y de la línea de proceso en el CIEMAT. Como resultado de este trabajo se ha montado un conducto sonda para incorporación de gases a la línea, que permite utilizar indistintamente humos de la planta de combustión o de un motor diesel. Se ha calefactado y calorifugado toda la instalación para evitar la deposición de partículas en los conductos por termoforésis, se ha instalado un filtro absoluto de limpieza del aire de dilución y se ha preparado la línea para incorporar un sistema de humidificación de los humos con objeto de estudiar el efecto de la humedad en la aglomeración de partículas. Para la generación de humos por combustión de gasoil se ha procedido a la puesta a punto de un motor diesel de 10.000 cm<sup>3</sup>. Con respecto a la medida de aerosoles se dispone de una estación móvil puede ser acoplada a los distintos puntos de muestreo (PM1, PM2, PM3) de la línea de proceso (ver Figura 1), dotada de sonda isocinética automática de muestreo y equipos para medida de partículas in-situ y post-proceso [8]. Se ha diseñado y construido una caja caliente para evitar posibles condensaciones, y se ha construido un sistema de automatización de la estación de muestreo de micropartículas, y se han elaborado procedimientos de toma de muestras y de análisis de partículas para los distintos gases a estudiar. La metodología de análisis de resultados se ha elaborado a partir de los datos de la planta de combustión, datos de la estación de medida en tiempo real, y los correspondientes a las medidas indirectas de partículas y análisis químico efectuadas en laboratorio.

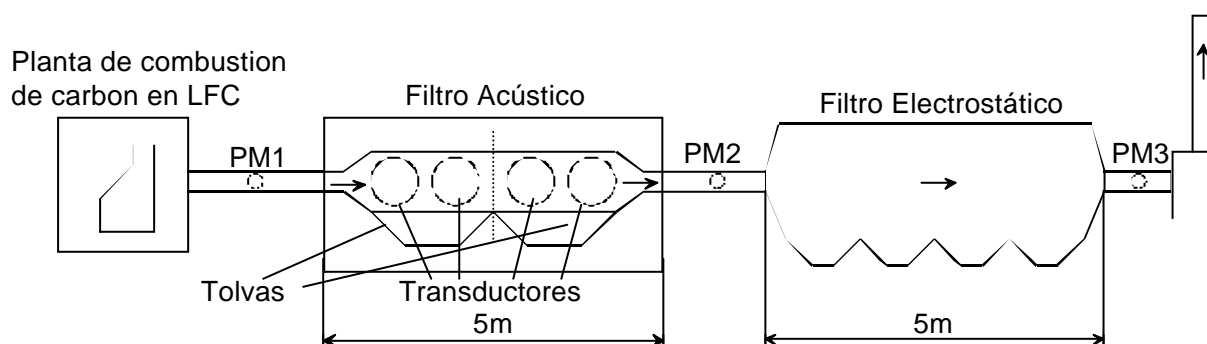


Figura 1. Esquema de instalación piloto de micropartículas en humos de combustión de carbón en LFC con nuevo Filtro Acústica

### Desarrollo y caracterización acústica de nuevo Filtro Acústico para reducción de emisiones de partículas.

Con el objetivo de mejorar, a escala de planta piloto, la tecnología macrosónica para humos de combustión de carbón en LFC y su extensión a humos de gasoil, se ha diseñado y construido un nuevo FA de geometría paralelepédica (3.56mx0.5mx0.7m), en chapa de acero al carbono y dotado de tolvas en su parte inferior para la recogida de cenizas. El array lineal de cuatro transductores de 10/20 kHz se sitúa en la cara frontal del FA, a lo largo del eje

longitudinal y en dirección normal al campo gravitatorio. En la Figura 2 se presenta una fotografía de la realización del array de 10 kHz montado en el FA; y en la Figura 3 el esquema de uno de los dos módulos de que consta el FA y una vista del barrido 2D correspondiente al plano central-XY. La medida del campo estacionario no lineal (de alta intensidad) se lleva a cabo mediante barridos en 2D tipo raster con un micrófono B&K de 1/8". Se han obtenido las medidas del campo en los diferentes planos XY que cubren todo el volumen del FA. Estos barridos se realizan de forma continua a lo largo del eje longitudinal del FA. En el caso de los gráficos en 2D, y teniendo en cuenta que la longitud de onda en aire a 20kHz es de unos 16mm a 20°C, se toman medidas de la señal cada 0.75mm a lo largo del eje longitudinal (eje-X) y a lo largo del eje transversal (eje-Y), con objeto de obtener una resolución espacial superior a  $\lambda/16$ . La señal eléctrica generada por el micrófono se adquiere en un amplificador de medida B&K 2636 y posteriormente la transfiere a un ordenador personal tipo PC para su almacenamiento y posterior análisis.

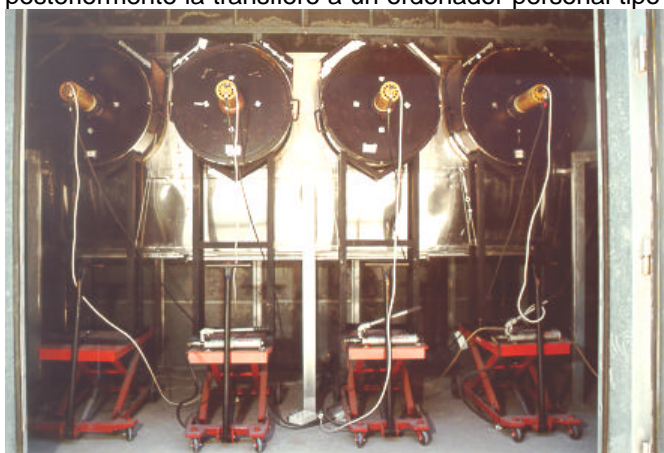


Figura 2. Fotografía de la vista frontal del nuevo filtro acústico (FA) en planta piloto de combustión de carbón en LFC y gasoil.

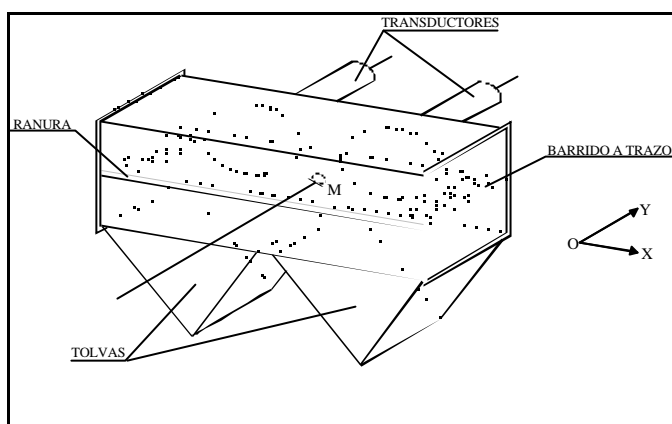


Figura 3. Esquema del barrido XY para medida del campo acústico en 2D en uno de los dos módulos del FA. Estudio del efecto de las tolvas.

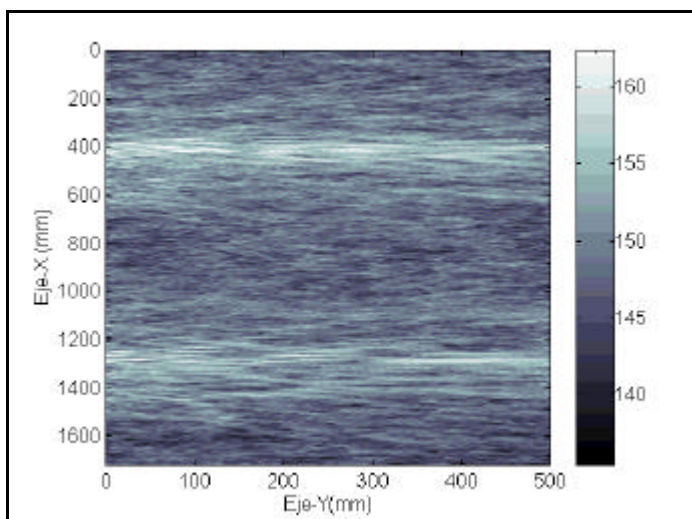


Figura 4. Visualización del campo acústico generado por dos transductores de 20 kHz a 400W.

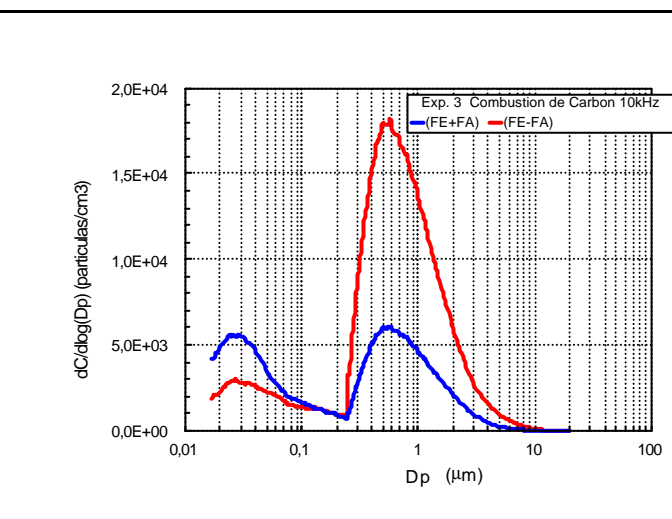


Figura 5. Efecto del campo acústico a 10 kHz en la retención de partículas de carbón

La caracterización acústica del FA dotado de tolvas se ha llevado a cabo mediante la medida del campo estacionario generado por el array de transductores de 10 kHz y el de 20 kHz. En la Figura 4 se presenta la visualización en 2D del campo acústico generado por dos transductores ultrasónicos de 20 kHz operando a su máxima potencia (2Tx400W). La representación de los NPS en dB permite observar los haces de cada transductor y un nivel medio de presión en todo el plano en torno a los 150 dB. La superficie medida con el micrófono corresponde al plano central XY (1750mm x 500mm), de uno de los dos módulos que constituyen el FA. Este plano está situado a lo largo del eje longitudinal del FA, pasa por el centro de ambos transductores, y es perpendicular a su superficie radiante. El procedimiento seguido para determinar la energía acústica almacenada en el FA ha consistido en determinar el valor medio del NPS medido en cada uno de los planos en que se divide el interior del FA para proceder a continuación a calcular el valor medio del NPS de todos los planos. Así se ha podido determinar un nivel medio global de 149 dB en el FA en presencia de tolvas, unos 2 dB inferior al medido en el FA sin tolvas. Una relación semejante ha sido encontrada con el array de 10 kHz estando en promedio los niveles alcanzados 1 dB por debajo de los correspondientes al array de 20 kHz.

### Efecto combinado del campo acústico y del FE sobre las emisiones de partículas de carbón

Previamente a los ensayos de validación del sistema combinado FA+FE se ha procedido a la caracterización completa de los aerosoles procedentes de la combustión de un carbón nacional en los puntos de muestreo PM1, PM2 y PM3 (ver Figura 1). Los humos en PM1 presentan una distribución de partículas multimodal (muy polidispersa) con un primer modo en torno a  $0.1\mu\text{m}$  ( $2 \times 10^4$  part/Ncm<sup>3</sup>); un segundo en  $0.4\mu\text{m}$  ( $4.5 \times 10^5$  part/Ncm<sup>3</sup>), y un tercero en torno a las  $3\mu\text{m}$  ( $6.5 \times 10^5$  part/Ncm<sup>3</sup>), siendo su concentración másica de  $1.7 \text{ g/Nm}^3$ , el caudal de gases de  $1.100 \text{ Nm}^3/\text{h}$  y la temperatura de  $250^\circ\text{C}$ . Se ha constatado que la frecuencia de 20kHz favorece principalmente la aglomeración de las partículas inferiores a la micra alcanzando una disminución numérica de hasta el 60%, mientras que con la frecuencia de 10 kHz se reduce el número de partículas micrónicas en un 50%. Es de notar como se aprecia en la Figura 5 la aparición de un resultado anómalo al trabajar a 10 kHz, como es el incremento en la concentración numérica de partículas submicrónicas. Este aporte que ha aparecido de forma sistemática en todos los ensayos llevados a cabo a dicha frecuencia se encuentra en estos momentos en estudio ya que desconocemos su origen. Los ensayos con incorporación de hasta un 6% en volumen de humedad han conseguido reducir hasta en mas del 60% la concentración de partículas inferiores a la micra, al trabajar a 10 kHz. En todos los ensayos se ha trabajado con la máxima tensión de operación del FE, 30kV.

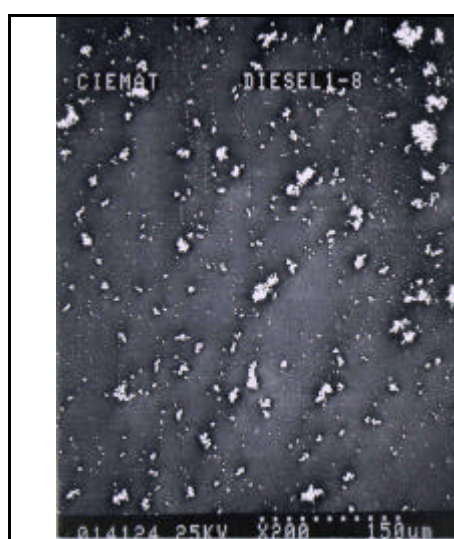


Figura 6. Microfotografía de partículas de emisiones diesel mediante SEM

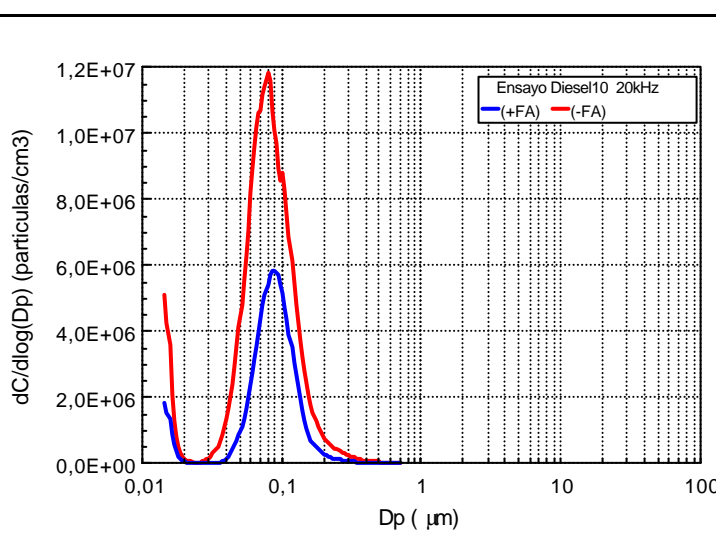


Figura 7. Efecto del campo acústico a 20 kHz en presencia de humedad sobre las partículas de gasoil

### **Efecto del campo acústico sólo sobre las emisiones de partículas de gasoil en presencia de humedad**

Las emisiones del motor-generator Diesel han sido generadas con gasóleo de automoción Clase A. El aerosol generado tiene una concentración másica hasta dos ordenes de magnitud menor que la de la combustión de carbón  $\approx 0.01 \text{ g/Nm}^3$  en PM1. Las distribuciones de tamaño de partícula presentan un modo en  $0.04 \mu\text{m}$  ( $2.1 \times 10^7 \text{ part/Ncm}^3$ ) poco polidisperso y casi tres ordenes de magnitud mayor que en el carbón. Se trata de un aerosol bastante monodisperso en donde el 91% de la masa corresponde a partículas menores a  $0.6 \mu\text{m}$ , y en que el FE sólo, resulta ineficiente a la hora de retener partículas tan finas. Por este motivo, los ensayos de validación se han centrado en el estudio del comportamiento del FA sólo, operando a máxima potencia (4Tx400W), con caudales en torno a  $900 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , y temperatura de gases de  $180^\circ\text{C}$ . La Figura 6 muestra una microfotografía de las partículas características de emisiones diesel obtenida por microscopía electrónica de barrido. Se ha estudiado el efecto de la frecuencia acústica (10 kHz y 20 kHz) en presencia de humedad (6% v/v). Los resultados de los ensayos demuestran claramente que los mejores resultados en aglomeración-reducción de partículas se alcanzan a la frecuencia ultrasónica de 20 kHz y en presencia de humedad, alcanzando una disminución en la concentración numérica de partículas submicrónicas superior al 55% como puede observarse en la Figura 7.

### **CONCLUSIONES**

Se ha demostrado que al aplicar durante unos 2 segundos un campo acústico no lineal de alta intensidad a gases de combustión de carbón en LFC y de gasoil se produce un efecto de aglomeración entre micropartículas, lo que favorece su posterior retención en un FE convencional. Se ha constatado que la frecuencia de 20 kHz favorece la aglomeración de las partículas submicrónicas, mientras que la de 10 kHz reduce el número de las micrónicas. Cuanto mayor es el grado de polidispersión de las partículas en los gases mas eficiente resulta el proceso de aglomeración. Los primeros ensayos en presencia de humedad en los gases parecen favorecer la aglomeración-reducción del número de partículas tanto a 10 kHz como a 20 kHz en el FA. Como perspectiva de futuro se continuaran los estudios sobre el efecto de la frecuencia acústica y la humedad de los gases de combustión en la aglomeración acústica de partículas submicrónicas tanto a nivel teórico como a nivel experimental.

### **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos de I+D AMB96-1211-C02-01 de la CICYT y CAM 07M-0043-1999 de la Comunidad Autónoma de Madrid.

### **REFERENCIAS**

- [1] E.P. Mednikov, "Acoustic coagulation and precipitation of aerosols", Consultants Bureau, New York 1965.
- [2] J.A. Gallego, L. Gaete, G. Rodríguez, Patente Británica nº 2029159, 1982.
- [3] J.A. Gallego, G. Rodríguez, J.L. San Emeterio, F. Montoya, Patente USA nº 5.29.175 (1994).
- [4] J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, Patente USA nº 5.769.913 (1998).
- [5] J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodríguez, T.L. Hoffmann, J.C. Gálvez, L. Elvira, F. Vázquez, F. Montoya, J.J. Rodríguez, F.J. Gómez, M. Martín, M. Acha, Primeros resultados en planta piloto de un sistema acústico para la eliminación de partículas finas en cenizas volantes, Revista de Acústica Vol 1 Nº Extraordinario p. 121-124 (1995).
- [6] J.A. Gallego, E. Riera, L. Elvira, G. Rodríguez, F. Vázquez, T.L. Hoffmann, F. Montoya, Acoustic preconditioning of coal combustion fumes for enhancement of electrostatic precipitator performance : I. The acoustic preconditioning

system, 8<sup>th</sup> International Conference on Coal Science, Oviedo (Spain) 10-15 September 1995. Coal Science, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 1995, p. 1899-1902.

[7] J.A. Gallego, E. Riera, G. Rodriguez, T. Hoffmann, J.C. Gálvez, J.R. Maroto, F.J. Gómez, A. Bahillo, M.M. Espigares, M. Acha, Application of acoustic agglomeration to reduce fine particle emissions from coal combustion plants, Environmental Science & Technology, Vol. 33 (21) Nov. 1999, pp.3843-3849.

[8] Informe final de la 1<sup>a</sup> Fase del Proyecto PIE N<sup>o</sup> 131.095, "Desarrollo de filtros acústicos para la aglomeración de micropartículas en gases de combustión de carbón", Madrid, Marzo 1996. (Confidencial).