



## **APLICACIÓN DE LOS ULTRASONIDOS DE ALTA INTENSIDAD EN LA SEPARACIÓN SÓLIDO-FLUIDO**

J.A. Gallego-Juárez, E. Riera-Franco de Sarabia, G. Rodríguez-Corral, L. Elvira-Segura y J. A. García-Fernández  
Dpto. de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasonicas, Instituto de Acústica, CSIC  
Serrano 144, 28006 Madrid, España  
Tel. 915618806  
E-mail jgallego@fresno.csic.es

### **SUMMARY**

Ultrasonic energy can be used to enhance fluid/solid separation processes. In solid/gas separation, it has been successfully applied to agglomerate very fine suspended particles to enhance conventional separation. In solid/liquid separation, ultrasonic stresses are useful to dewater slurries by inducing a sponge effect. Agglomeration, cavitation and streaming may be also induced to improve filters performance.

### **INTRODUCCIÓN**

La aplicación de energía ultrasónica a medios multifásicos representa un campo todavía no suficientemente explotado. En particular la acción de los ultrasonidos de alta intensidad puede ayudar a mejorar la eficiencia de diversos procesos industriales cuyo objetivo fundamental es la separación de la fases sólida-fluida. Los efectos que la energía ultrasónica puede producir para mejorar los procesos de separación son debidos a una serie de fenómenos que acompañan a las altas intensidades, siendo los mas relevantes: la presión de radiación, el viento acústico, el calor, las inestabilidades en las interfases, la agitación, y (exclusivamente en líquidos) la cavitación. Ahora bien, el mecanismo específico para mejorar ultrasónicamente los procesos de separación depende básicamente del medio tratado. En un aerosol la acción de los ultrasonidos produce la aglomeración de partículas lo que aumenta su tamaño y consecuentemente la eficiencia en la retención de los filtros convencionales. La aglomeración acústica es el resultado de la colisión entre partículas de distinto tamaño producidas por las diferencias en sus amplitudes de oscilación (efecto ortocinético)<sup>(1)</sup>, y por la acción de la presión de radiación y de otras fuerzas de tipo estacionario (efectos hidrodinámicos)<sup>(2-3)</sup>. En la separación sólido-líquido, la aglomeración ayuda a evitar el bloqueo de los filtros incrementando su rendimiento, pero en general este efecto es menos intenso que en los gases. La energía ultrasónica resulta útil para separar el líquido en suspensiones muy concentradas de partículas sólidas al producir un "efecto esponja" y facilitar la migración del líquido a través de los canales naturales o de otros canales creados por la propia propagación. Otros efectos ultrasónicos tales como la cavitación y el viento acústico pueden resultar también beneficiosos para la separación sólido-líquido.

En este trabajo se analiza el efecto de los ultrasonidos en la separación sólido-fluido y se presentan algunos resultados experimentales en aplicaciones concretas.

### **SEPARACIÓN SÓLIDO-GAS**

La eliminación-retención de partículas finas en humos industriales es uno de los problemas mas importantes relacionados con la polución medioambiental por materia particulada. La población de partículas inferiores a 5 micras juega un papel importante ya que las tecnologías convencionales de retención son generalmente poco eficientes al tratar de eliminar estas poblaciones. La propagación de ondas acústicas de elevada intensidad representa una alternativa para incrementar el rendimiento de los filtros convencionales al aglomerar y desplazar la distribución de partículas hacia tamaños mayores. Teniendo en cuenta los procesos de separación sólido-gas,

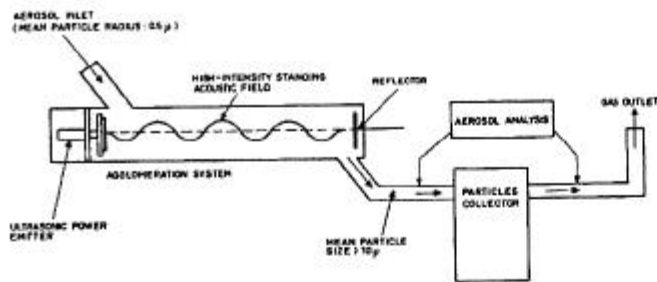


Fig. 1 Esquema básico del sistema de aglomeración

El primer sistema desarrollado<sup>(4)</sup> a escala de laboratorio, consistió en un nuevo tipo de emisor ultrasónico de potencia acoplado a una cámara cilíndrica (220mm de diámetro interno y 2m de longitud) en cuyo interior se establece un campo estacionario. El emisor con una capacidad de potencia de 150W trabaja a una frecuencia de 20kHz. La Figura 1 muestra el esquema básico del sistema de aglomeración combinado con un colector de partículas. La distribución axial del NPS medio obtenido en el interior de la cámara fue de 160dB. Se realizaron pruebas de *precipitación* con partículas de negro de humo (radio medio = 0.5μm, desviación standard = 2.2), caudales del orden de 60m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> y concentraciones máscicas entre 4 y 14gm<sup>-3</sup>. En estos experimentos se obtuvieron rendimientos en la retención del 93% (las partículas retenidas se depositaron en las paredes de la cámara), incrementando de 4 a 5 veces el tamaño medio de partícula detectada en el aerosol a la salida de la cámara. El consumo energético medio fue de 3kWh per 1000m<sup>3</sup>.

En experimentos posteriores se estudió el uso de la cámara como *preacondicionador* colocado aguas arriba de un colector de partículas. La principal ventaja que presenta esta última configuración es poder trabajar con caudales mayores. Se llevaron a cabo ensayos en condiciones dinámicas de flujo para conocer el grado de aglomeración de partícula en función de la intensidad del campo ultrasónico y del tiempo de tratamiento. La Figura 2 muestra un ejemplo representativo de la distribución log-normal de partículas de negro de humo antes y después del tratamiento, con un caudal de 100m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> y un NPS de 160dB. Partiendo a la entrada de la cámara de un aerosol de 0.3μm de radio medio, se obtuvo a la salida un radio medio de 4.8μm. Este resultado confirmó la bondad del dispositivo ultrasónico como *preacondicionador* de partículas finas para facilitar su retención mediante colectores convencionales.

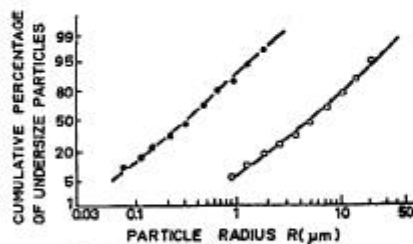


Fig. 2 Distribución de partículas

Consecuencia directa de estos resultados fue el *escalamiento del sistema* para su aplicación industrial. Un requisito previo fue el diseño, construcción y experimentación de nuevas versiones de transductores de alta potencia de placa escalonada de 10kHz y 20kHz con capacidad de potencia de 1kW y rendimientos de ~75%. La siguiente etapa experimental fue fruto de un convenio de colaboración entre el Instituto de Acústica de Madrid y el ITU de Karlsruhe. En este proyecto se estudió el rendimiento en la retención de partículas de un *precipitador electrostático* (PE) *combinado con la cámara acústica* (CA) de aglomeración. El objetivo de esta investigación fue analizar el papel de los ultrasonidos en la mejora del rendimiento del PE en el rango de partículas submicrónicas<sup>(5)</sup>. Los aerosoles utilizados en este estudio presentaron una distribución de tamaños log-normal con un diámetro geométrico medio de 0.8μm y una desviación standard de 1.4. Las concentraciones numéricas de trabajo van de 5x10<sup>5</sup>-5x10<sup>6</sup> para concentraciones máscicas de hasta 5 gm<sup>-3</sup>. En estos experimentos el aerosol entra en un buffer de 5m<sup>3</sup>, fluye a través de la cámara ultrasónica de acondicionamiento y del PE. El caudal tratado fue de 150-1500 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>, resultando que el gas fluye con una velocidad de 0.17-1.7 ms<sup>-1</sup> en CA y de 0.33-3.3 ms<sup>-1</sup> en el PE.

Como ejemplo la Fig.3 muestra los resultados obtenidos para un caudal de 560 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup>, una concentración numérica total de partículas de 2x10<sup>6</sup>cm<sup>-3</sup>, y una concentración máscica de 1.35gm<sup>-3</sup>. Es evidente de la gráfica que el rendimiento en la separación para partículas de 0.8μm aumenta del 87% al 92% al aplicar un campo ultrasónico de 20kHz y 400W. En resumen, la combinación del PE y de la CA reduce la masa de materia particulada acumulada por debajo de 5μm desde 103mgm<sup>-3</sup> a 29mgm<sup>-3</sup>, lo cual confirma los beneficios de la energía acústica. En todos los experimentos la interacción ortocinética se reveló como el principal factor responsable de la aglomeración acústica de partículas de aerosoles.

Como se ha demostrado a lo largo de esta sección los ultrasonidos de potencia representan una nueva tecnología

se han diseñado y desarrollado diferentes sistemas experimentales para el procesado de aerosoles por ultrasonidos.

### Desarrollo de sistemas ultrasónicos para la retención de partículas finas en aerosoles

El primer sistema desarrollado<sup>(4)</sup> a escala de laboratorio, consistió en un nuevo tipo de emisor ultrasónico de potencia acoplado a una cámara

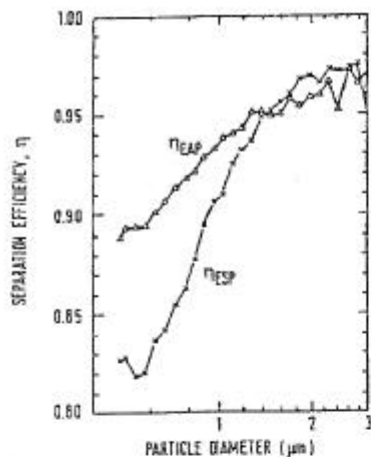


Fig. 3 Rendimiento del PE ± ultrasonidos en función del tamaño de partícula.

partícula se seleccionaron tres puntos de muestreo en la línea de proceso localizados a la entrada y salida de la cámara acústica y a la salida del PE. Las Figuras 4 y 5 muestran distribuciones de partícula representativas medidas a la salida de PE en los rangos submicrónico y micrónico. En el experimento, el aerosol entra en la cámara a 250°C con un caudal de 1600m<sup>3</sup>/h, una concentración mássica de 5gm<sup>-3</sup> y una concentración numérica total de 5x10<sup>5</sup>cm<sup>-3</sup>. El efecto del campo acústico es claro, y en general se alcanza una reducción de las densidades numéricas de partícula de un 30% y un 70% en los rangos submicrónico y micrónico, respectivamente.

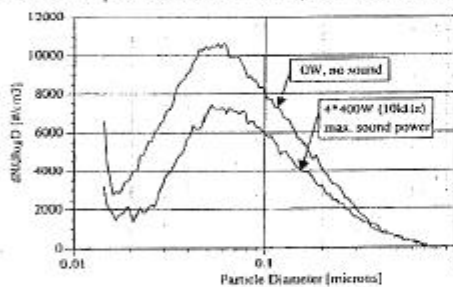


Fig.4 Distribución de tamaño de partícula con y sin tratamiento acústico medido con TSI-SPMS.

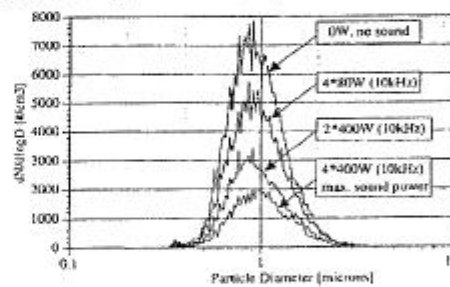


Fig.5 Distribución de tamaño de partícula con y sin tratamiento acústico medido con Polytec.

## SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO

### Efecto de los ultrasonidos en suspensiones acuosas

La filtración y separación de partículas asistidas ultrasónicamente en un medio líquido ha sido objeto de un gran número de publicaciones durante las últimas décadas y una gran variedad de procesos ultrasónicos relacionados con estas aplicaciones han sido estudiados (aglomeración, separación y arrastre de partículas, limpieza de filtros, cavitación y microflujos para evitar la colmatación de los filtros, etc.). En esta sección presentamos una breve discusión sobre la separación sólido-líquido en procesos de filtración asistida con el objeto de aportar alguna luz sobre las posibilidades de aplicación de los ultrasonidos en este campo.

### Separación asistida por ultrasonidos durante el proceso de secado

Se ha demostrado<sup>(8,9)</sup> que los ultrasonidos de potencia pueden usarse para mantener limpios los filtros en procesos de filtración de lodos industriales. La presencia de cavitación y flujos, unida a las altas velocidades que alcanzan las partículas ayudan a evitar la formación del *cake* sobre la superficie de los filtros al disminuir la resistencia al flujo a través de los mismos. Este efecto incrementa la cantidad de líquido que penetra en el filtro lo que mejora el rendimiento de la separación. Si el campo ultrasónico se combina con un campo eléctrico, se observa un efecto sinérgico que produce una notable mejora en el volumen de líquido filtrado. Ahora bien, si el producto del proceso de separación es el sólido retenido sobre la cara del filtro, debe favorecerse la formación

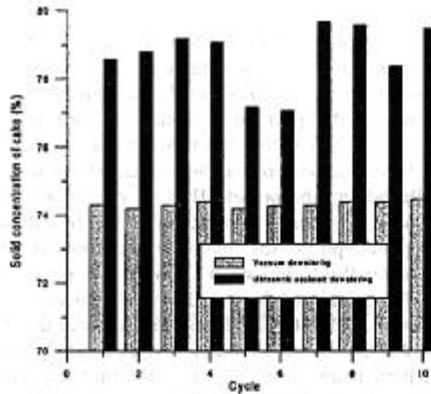


Fig.6. Concentración final del *cake* secado con ultrasonidos (barras negras) y standard (barras grises). Potencia aplicada: 20W.

del *cake*, por lo que la energía ultrasónica debe utilizarse de manera diferente. En este tipo de procesos, la separación sólido-líquido se lleva a cabo en varias etapas. Primeramente hay una de formación del *cake* con el filtro sumergido en la suspensión. A continuación se reduce el contenido de líquido del *cake* durante el proceso del secado, siendo en esta etapa cuando se estudia el efecto de la potencia ultrasónica.

Los experimentos se llevaron a cabo con suspensiones densas de partículas de  $\text{TiO}_2$  en agua (concentración en peso del 25%). Para esta aplicación se desarrolló un transductor ultrasónico de placa rectangular. La Figura 6 muestra la separación sólido-líquido sin y con ultrasonidos para 10 ciclos consecutivos de filtración. Como puede observarse, se obtiene un significativo incremento de la concentración de sólido con un consumo igual a 1/3 de la energía necesaria para el secado por evaporación. Existen diferentes mecanismos<sup>(10-13)</sup> que parecen jugar un papel importante en la propagación de ondas ultrasónicas de gran amplitud en suspensiones concentradas:

- Las compresiones y dilataciones del medio ayudan a mantener abiertos los canales entre partículas sólidas, a través de los cuales fluye el líquido hacia el filtro.
- La fricción producida entre las partículas y el líquido por las vibraciones de alta frecuencia da lugar a calentamientos locales que disminuyen la tensión superficial y la viscosidad del líquido
- Las pequeñas gotitas retenidas en el interior de los capilares la materia sólida pueden ser separadas, si las presiones ultrasónicas superan la tensión superficial.
- Las burbujas de aire en el seno del líquido, retenidas en los microporos y capilares del sólido, pueden crecer debido al mecanismo de difusión rectificadora causado por la onda ultrasónica. Este crecimiento da lugar a que el líquido sea empujado fuera de estos microporos y capilares.
- El fenómeno de la cavitación, muy potente, puede dar lugar a que el agua ligada químicamente y en estado coloidal sea separada de la fase sólida.
- La importancia predominante de un mecanismo frente a otro dependerá de las características de la suspensión bajo estudio así como de la frecuencia e intensidad ultrasónica empleadas.

Como conclusión se puede asegurar de los resultados obtenidos la viabilidad de los ultrasonidos de potencia para optimizar los procesos de separación sólido-líquido en suspensiones muy concentradas con un bajo coste energético.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por tres proyectos de investigación: CICYT-AMB96-1211-C02-01, BRITE-EURAM DELACOU BRPR-CT96-157 y PIE-131.095 de las compañías ENDESA-OCIDE.

#### REFERENCIAS

1. E.P.Mednikov, *Acoustic Coagulation and Precipitation of Aerosols*, N Y, Consultants Bureau (1965).
2. T.L.Hoffmann and G.H.Koopmann, *J. Acoust. Soc. Am.*, 99(4), 2130 (1996)
3. T.L.Hoffmann and G.H.Koopmann, *Rev. Sci. Instrum.*, 65(5), 1527 (1994)
4. J.A.Gallego, E.Riera, and G.Rodríguez, *Proc. Ultrasonics International* 227 (1979)
5. J.Magill, Ch.Caperan, J.Somers, K.Richter, S.Fourcaudot, P. Barreaux, J.Lagarge, J.A.Gallego, E.Riera, G.Rodríguez and N.Seyfert, *J. Aerosol Sci.*, 23 sup.1, s803 (1992).
6. J.A.Gallego, E.Riera, G.Rodríguez, J.C.Gálvez, T.L.Hoffmann, F.Vázquez, J.J.Rodríguez, F.J.Gómez, M.Martín, M.Acha, and F.Montoya, *Proc. High Temperature Gas Cleaning*, 60 (1996).
7. J.J.Rodríguez, F.J.Gómez, M.Martín, and A.Bahillo, *J. Aerosol Sci.*, 26 sup. 1, 685 (1995).
8. T.Tuori, *Drying '92, Part B* (Edited by A.S. Mujumdar), Elsevier, NY, 1897 (1992).
9. Wakeman and E.S. Tarleton. *Trans. IChemE, Vol 69, Part A*, 386 (1991).
10. J.A.Gallego, G.Rodríguez, F.Vázquez and J.C.Gálvez, "Deshidratación de vegetales mediante ultrasonidos de potencia y bajo presión estática". Memoria Interna del Instituto de Acústica, CSIC (1996).
11. N.Senapati, H.S. Muralidhara. *Flocculation & Dewatering*, Ed. by Brij M. Moudgil and Bernard J. Scheiner, Engineering Foundation, 421 (1989).
12. D.Ensminger. *Ultrasonics: Fundamentals, Technology, Applications*. 2<sup>nd</sup> ed, Ed. Marcel Dekker NY, (1988).
13. H.S.Muralidhara, D. Ensminger and A. Putnam. *Drying Technology*, 3(4), 529 (1985).