

CAMPOS ACÚSTICOS COMBINADOS MONO Y MULTIFRECUENCIA PARA PROCESOS DE AGLOMERACIÓN DE MICROPARTÍCULAS EN AIRE

Luis Elvira Segura y Enrique Riera Franco de Sarabia

Instituto de Acústica. CSIC. UEI Ultrasonidos
Serrano, 144. 28006 Madrid

INTRODUCCIÓN

La frecuencia y la intensidad del campo acústico son dos parámetros fundamentales involucrados en el proceso de aglomeración acústica de las partículas de un aerosol. En especial, la frecuencia juega un papel relevante al estar ligada al tamaño de partícula como pone de manifiesto el mecanismo ortocinético de aglomeración¹. La velocidad U_p con que una partícula de radio R se desplaza en el seno de un fluido viscoso e incompresible viene dada por la ecuación BBO² (Basset-Boussinesq-Oseen). La solución de esta ecuación para el caso en que se propague una onda sinusoidal de la forma $u=U_0 \text{Re}(\exp(-i\omega t))$ permite determinar la fuerza resultante que actúa sobre la partícula. Así, mientras las partículas pequeñas gozan de una gran movilidad siguiendo bien los movimientos del fluido, no ocurre lo mismo con las mas grandes y pesadas que ven reducida su movilidad. Se produce así un movimiento relativo entre las partículas y el medio, definido por la función de arrastre H y dado por la siguiente expresión

$$H = \frac{U_p}{U_0} = \frac{1 + \frac{3}{2} (\delta\omega\tau)^{1/2} - i \left[\frac{3}{2} \delta\omega\tau + \frac{3}{2} (\delta\omega\tau)^{1/2} \right]}{1 + \frac{3}{2} (\delta\omega\tau)^{1/2} - i \left[\left(1 + \frac{1}{2} \delta\right) \omega\tau + \frac{3}{2} (\delta\omega\tau)^{1/2} \right]}$$

Aquí δ es la relación entre la densidad del medio y la de la partícula, τ el tiempo de relajación de la partícula y ω la frecuencia angular.

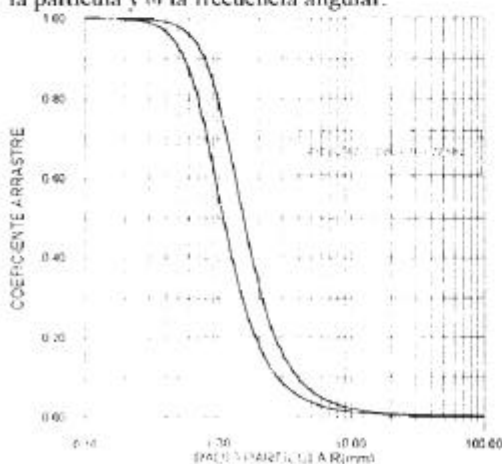


Figura 1. Coeficiente de arrastre en aire

La Figura 1 muestra la dependencia en aire del coeficiente de arrastre $\eta=|H|$ con el tamaño de partícula incluyendo los efectos viscosos. Las curvas representadas corresponden a 10 y 21KHz. Es claro de las gráficas la conveniencia de trabajar a estas frecuencias cuando se trata con aerosoles submicrónicos.

El nivel de presión (NPS) se presenta igualmente importante, ya que es necesario disponer de campos acústicos de elevada intensidad para producir una rápida aglomeración de las partículas en suspensión. En función del tamaño medio de partícula del aerosol a irradiar y de las intensidades requeridas, se han desarrollado transductores resonantes de emisión coherente y alta directividad para frecuencias de 10 y 20 KHz⁴.

En este trabajo, se presenta el análisis experi-

mental y las características principales de campos acústicos complejos, resultantes de la emisión simultánea de hasta cuatro transductores. Cada transductor dispone de un sistema de excitación independiente. Las superficies emisoras están dispuestas transversalmente al eje de cámaras paralelepédicas de sección rectangular. Se estudia también el efecto combinado de las dos frecuencias en los campos resultantes, con objeto de obtener una aglomeración eficiente de micropartículas en efluentes de centrales térmicas de carbón.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Como se ha explicado anteriormente en la introducción, las medidas de campo acústico se realizarán en una cámara paralelepédica de dimensiones 500x800x3800mm. Esta cámara está fabricada en PVC Glass, con paredes de 10mm de espesor.

Los emisores acústicos, se encuentran en el interior de un soporte cilíndrico metálico que se acopla a la cámara por su parte inferior. Este soporte, además de realizar una función de sujeción, permite la refrigeración del transductor y su separación de los posibles gases que fueran a ser tratados, lo cual es imprescindible cuando estos circulan a alta temperatura. Serán consideradas temperaturas elevadas aquellas que aumenten de forma considerable la fatiga de los elementos vibrantes o que alteren las características de las cerámicas piezoeléctricas (>100°C).

Se ha de aclarar que en las experiencias que se presentan, no se usa otro fluido más que el aire a temperatura ambiente, pero aun así, es conveniente realizar las pruebas acústicas según la posible configuración práctica del sistema.

El sistema de medida fue tratado con bastante detalle en trabajos anteriores³, por lo que no vamos a detenernos en el mismo, aunque el sistema actual incorpora algunas mejoras (mayor capacidad de movimiento del sistema mecánico en velocidad y alcance, mejora del software y hardware de control y adquisición de datos, etc.).

A la hora de interpretar los datos obtenidos, es necesario tener en cuenta la orientación que presenta el micrófono dentro de la cámara; ya que el efecto de la difracción en la punta del mismo variará con el ángulo de incidencia de la onda. A su vez, esta variación dependerá de la frecuencia. En nuestro caso, se dispondrá perpendicularmente a dicha onda, con objeto de optimizar las dimensiones de campo que pueda ser explorado.

Los transductores empleados en las medidas que se muestran en este trabajo, son altamente resonantes a las frecuencias aproximadas de 10KHz y 21KHz. En ambos casos, están formados por un elemento piezoeléctrico en configuración de tipo sandwich, al que irá acoplado un amplificador mecánico, que a su vez excitará una placa escalonada. Dichos escalones permiten una radiación acústica coherente⁴. El tamaño de todos estos elementos varía según la frecuencia. El sandwich y el amplificador mecánico tienen aproximadamente un tamaño doble en el caso de 10KHz, respecto al de 21KHz, lo cual resulta razonable, al ser esta la relación existente entre las respectivas longitudes de onda. No ocurre así, sin embargo, en el caso de las placas emisoras (10KHz: 670mm \varnothing ; 21KHz: 500mm \varnothing). Esto es debido a que, para el primer caso (10KHz), las placas vibran a flexión con 5 círculos nodales, y en el segundo caso (21KHz), lo harán de la misma manera, pero con 7 círculos nodales. En ambos tipos de transductores, los modos de vibración de la placa tienen simetría radial (modos axisimétricos).

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las medidas realizadas hasta el momento, tienen como objetivo el de conocer el comportamiento del campo acústico emitido por los transductores dentro de la cámara de prueba. La configuración espacial elegida, posibilita el funcionamiento simultáneo de varios transductores. Por tanto, es fundamental conocer las posibles interacciones entre ellos, cuando trabajamos a elevada intensidad. Este conocimiento, unido a los datos concernientes a las frecuencias idóneas de aglomeración, nos llevarán a la elección de una combinación eficiente de transductores, dependiendo del aerosol que hayamos de tratar.

Según esto, se presenta a continuación un primer estudio de los patrones de campo acústico dentro de las cámaras descritas. Estas medidas están realizadas en el plano que contiene los centros de las placas de los transductores y que, a su vez, es perpendicular a las mismas.

Las pruebas de sintonización de los transductores, muestran que la frecuencia de resonancia no sufre variaciones cuando varios de ellos vibran simultáneamente dentro de las cámaras de prueba, respecto a la que tenían cuando fueron caracterizados en condiciones de campo libre. La frecuencia de resonancia está íntimamente ligada a la impedancia del transductor. Por tanto podemos concluir que la

impedancia tampoco sufre variaciones; es decir, que ni las cámaras, ni la vibración de otros transductores, tienen influencia apreciable sobre el funcionamiento de cada transductor.

Quedan por estudiar las posibles interacciones del campo acústico. Dado que el sistema práctico que está siendo analizado, puede tener varios transductores en funcionamiento simultáneo; sería interesante poder conocer el valor del NPS emitido por todos ellos en cada punto de la cámara, a partir de la información experimental del NPS de uno de ellos (o dos, si trabajamos a frecuencias combinadas). Por tanto, sea p_1 el valor del NPS que emite un transductor en un punto dado de la cámara, y p_2 , el valor del NPS emitido por otro transductor en ese mismo punto, proponemos que, si ambos transductores están emitiendo simultáneamente, el NPS total, p_t en dicho punto será:

$$p_t = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$$

Esto supone, en realidad, despreciar varios términos. Por un lado, se están despreciando los términos provenientes de las interferencias lineales entre los campos emitidos por cada transductor. Se considera que esta interferencia tiene poca relevancia por varias razones:

- Dada la disposición de los transductores, en las zonas más energéticas, la interferencia es menor.
- Dos transductores emitiendo, nunca lo harán exactamente a la misma frecuencia, ya que siempre existen diferencias entre ellos, y por tanto, la interferencia de que hablamos, no se producirá.
- Dadas las pequeñas longitudes de onda (siempre menores de 32mm) que manejamos, en comparación con el tamaño de las cámaras; al lado de interferencias constructivas, habrá interferencias destructivas. Por tanto, el nivel promedio en distintos sectores de la cámara, que es lo que interesa a efectos de aglomeración, no cambiará apreciablemente.

Por otro lado, se está despreciando la energía que, proveniente de la interacción no-lineal entre los haces de ambos transductores, se transforma en presión que vibra a frecuencias suma y resta de los distintos armónicos que aparecen. Esta presión de la que hablamos, evidentemente, sólo aparece cuando están emitiendo dos o más transductores a la vez.

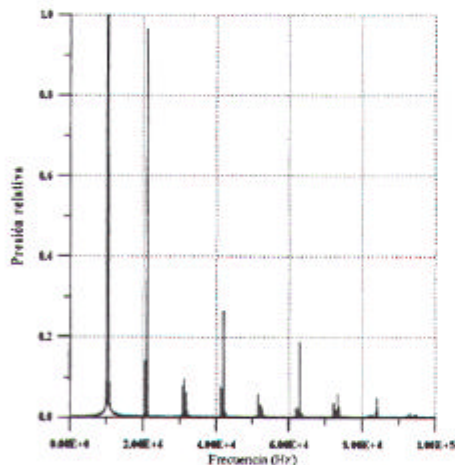


Figura 2. Espectro de la señal procedente de 2 transductores de 10 y 21 KHz.

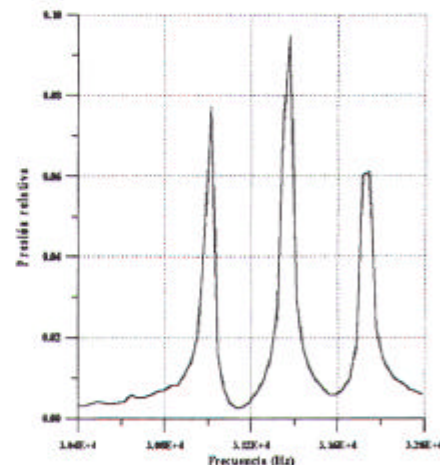


Figura 3. Detalle del espectro anterior.

Para determinar la validez de la aproximación propuesta, se midió el campo acústico emitido por un transductor de 10KHz, y otro de 21KHz. A la hora de cuantificar la pérdida debida a los efectos no-lineales mencionados se capturaron señales en varios puntos, siendo los más significativos los que se encontraban en zonas más o menos equidistantes a ambos transductores. En la Figura 2, se muestra el espectro de la señal en uno de esos puntos. La Figura 3 muestra un detalle de este mismo espectro, donde se aprecian no sólo los armónicos de la onda procedente de cada uno de los transductores, sino que también aparecen picos debidos a la interacción entre ambos haces.

Así se ve cómo aparecen tres picos que se corresponden, de izquierda a derecha, con:

- 31013 Hz: tercer armónico de la señal de 10348Hz ($10348 \times 3 = 31044$)
- 31380 Hz: Suma de la señal de 10348Hz y 21032Hz ($10348 + 21032 = 31380$)
- 31746 Hz: Resta del segundo armónico de 21032Hz menos el fundamental de 10348Hz ($21032 \times 2 - 10348 = 31716$).

De estos tres, ni el segundo, ni el tercero aparecen cuando no funcionan los dos transductores al mismo tiempo; es decir, que proceden de la interacción acústica de los campos de ambos transductores, y por tanto, serán despreciados. También podemos encontrar otros picos procedentes de dicha interacción en otras frecuencias (cerca de 20, 40, 50 KHz, etc.). En cualquier caso, se comprueba a la vista de la Figura 2, que la contribución de esta interacción, es pequeña comparada con el total de la presión en este punto. Igual ocurre en otros puntos de medida.

A continuación, se realizó una serie de tres medidas con objeto de superponer los campos de cada transductor. Las dos primeras corresponden a la medida del campo emitido por cada uno de los dos transductores por separado, y la tercera, al campo emitido por los dos simultáneamente. En la Figura 4, se muestra en línea gruesa, esta última medida, y más fino, el resultado de aplicar la raíz cuadrada a la suma de los cuadrados de las otras dos primeras medidas. Las gráficas representan el promedio del NPS para cada valor de "x". El eje X, se corresponde con la distancia longitudinal de la cámara. Se puede comprobar que la diferencia entre los valores medidos y los predichos de forma semiempírica, es pequeña, con lo cual, en las condiciones de nuestro experimento, podemos validar el método propuesto para superponer campos.

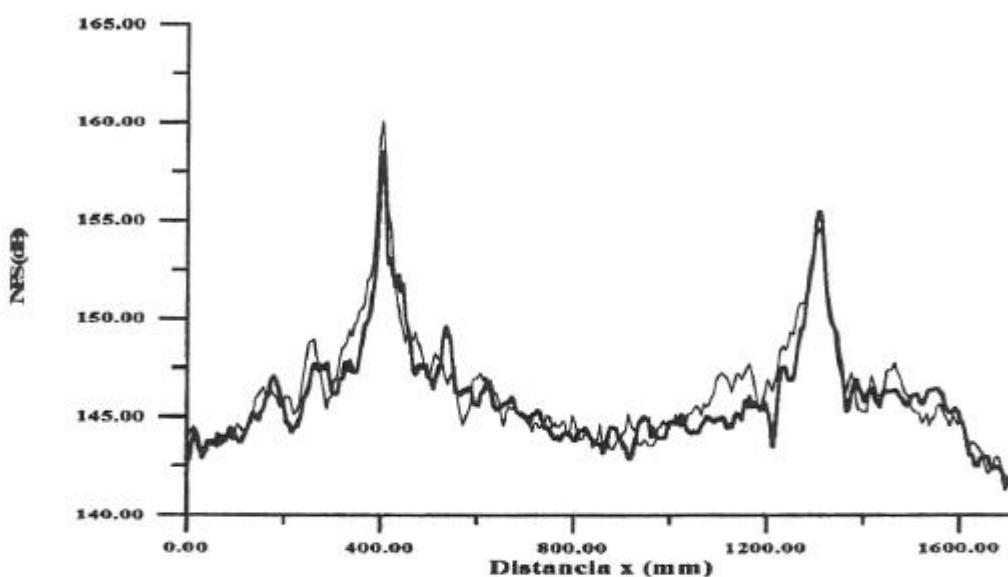


Figura 4. NPS emitido por dos transductores en la cámara de prueba. La línea más gruesa corresponde a la medida directa, y la fina, a la composición del campo medido para cada transductor por separado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido llevado a cabo en el marco de un Contrato de Investigación con la empresa ENDESA financiado por OCIDE. Asimismo esta investigación en sus aspectos más básicos, está financiado por el Plan Nacional de Tecnologías Avanzadas de la Producción (Proyecto TAP: 93-230).

BIBLIOGRAFÍA

1. E.P.Mednikov, *Acoustic coagulation and precipitation of aerosols*. 1965, New York:Consultants Bureau:p.75-82.
2. S.Temkin, *Elements of Acoustics*. 1981, New York, Chichester, Brisbane, Toronto:John Wiley & Sons:p.455.
3. L.Elvira , E.Riera y J.A.Gallego, *Estudio del campo acústico en cavidades para procesos de aglomeración*. *Tecniacústica*, Nov. 1993, 275-278.
4. J.A.Gallego-Juárez, G.Rodríguez-Corral and L. Gaete-Garretón. *An ultrasonic transducer for high power applications in gases*. *Ultrasonics* (1978) 16, 267-272.