

DESARROLLO DE SISTEMAS ACÚSTICOS PARA TRATAMIENTO DE FLUIDOS. ESCALAMIENTO DE PROTOTIPOS DE LABORATORIO A SISTEMA INDUSTRIAL

REFERENCIA PACS: 43.25.Cb

Rodríguez Corral, Germán; Campos Pozuelo, Cleofé; Acosta Aparicio, Victor M.; Vázquez Martínez, Fernando; Gallego Juárez, Juan A.
Instituto de Acústica, CSIC
Serrano 144
28006 Madrid. España
Tel: 34 915 618 806
Fax: 34 914 117 651
E-Mail: grodriguez@ia.cetef.csic.es

ABSTRACT

This work deals with the development of industrial macrosonic systems for fluid application. To undertake an industrial problem using a high power acoustic system, it is necessary to scale up a laboratory prototype. The linear scaling is one of the most practical alternatives for macrosonic systems (transducer treatment chamber): if all dimensions are increased by a factor of K , in the scaled model the power capacity of the transducer increases by K^2 , the frequency decreases by $1/K$, the acoustic pressure in the chamber increases by K and, the impedance and efficiency remains unchanged.

RESUMEN

Este trabajo trata del desarrollo de sistemas macrosónicos industriales partiendo del estudio y pruebas de sistemas de laboratorio a pequeña escala. El método consiste en un escalamiento acústico lineal, donde el aumento por K de las dimensiones de un sistema (emisor acústico-cámara de tratamiento) conlleva una disminución en la frecuencia del emisor por $1/K$, un aumento de su capacidad de potencia por K^2 y un aumento de la presión acústica por K en la cámara. Al mismo tiempo se mantiene constante en el emisor acústico, su rendimiento e impedancia. Este método se ha validado mediante la realización a pequeña y gran escala, de sistemas experimentales para cuyo diseño se ha recurrido a la ayuda de cálculo por elementos finitos.

De acuerdo con la influencia de la frecuencia y la presión acústica en el proceso real, este método permite establecer criterios para el escalamiento a tamaños industriales de emisores acústicos y cámaras de tratamiento. Así es posible abordar problemas industriales y aplicaciones teniendo en cuenta su factibilidad técnico-económica.

1 INTRODUCCIÓN

Con el objeto de introducir en la industria la aplicación de ondas acústicas de alta intensidad, se han explorado diversos campos, aun no explotados, como son:

- Desespumación acústica: eliminación de espuma en máquinas envasadoras, fermentadores industriales, tanques de lavado, etc...
- Aglomeración acústica de aerosoles: descontaminación de humos y eliminación de partículas en suspensión proveniente de plantas térmicas y diferentes procesos industriales. [1]
- Secado acústico: deshidratación de productos alimenticios, secado de productos mineros.
- Lavado ultrasónico: especialmente el lavado profundo de tejidos en continuo.

Para estas y otras aplicaciones se requiere:

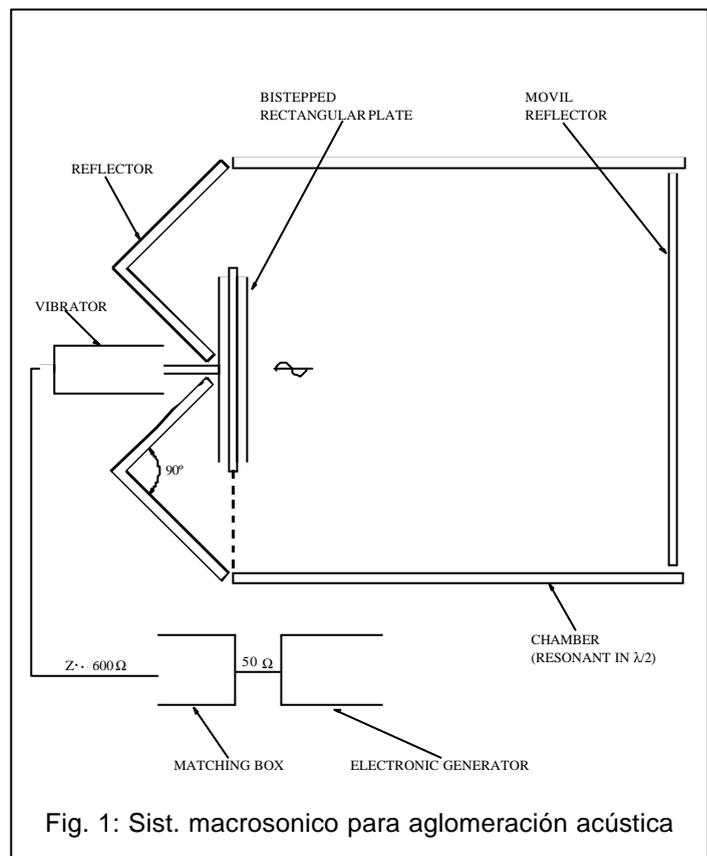
a) conocer los mecanismos básicos que gobiernan estas aplicaciones, conocer la tecnología propia disponible y ver si el problema es abordable.

b) Desarrollar la tecnología acústica necesaria para atacar con éxito el problema específico. Esto implica el escalamiento de prototipos de laboratorio a modelos industriales de gran tamaño y potencia.

2. DESARROLLO DE SISTEMAS ACÚSTICOS DE POTENCIA

Por sistema acústico para procesos con fluidos, entendemos, en general, un conjunto formado por un emisor acústico de potencia acoplado a una cámara de tratamiento y con o sin accesorios. (ver Figura 1.) Supongamos que conocemos el comportamiento del proceso acústico para una aplicación específica y determinamos que el problema es abordable. Entonces, el desarrollo de la tecnología adecuada, según nuestra experiencia, se debe realizar del siguiente modo (ver Figura 2):

1. Conocer las características del proceso industrial específico: magnitud, cantidad de producto a tratar por unidad de tiempo; rendimiento requerido, (por ejemplo aglomerar un 90% de partículas en suspensión menores a 1 micra); características del producto, (por ejemplo distribución del tamaño de partículas de un aerosol.)
2. Determinar los parámetros generales que afectan al proceso acústico: intensidad acústica (W/cm^2); frecuencia de trabajo (Hz); tiempo de tratamiento (seg.). El conocimiento de estos parámetros en concordancia con las características del proceso industrial y una base de modelos de emisores obtenidos analíticamente y experimentalmente, permiten efectuar una primera estimación del sistema acústico y especificar en un diseño preliminar, sujeto a modificaciones, el tipo de emisor (tamaño, potencia, frecuencia); el equipo electrónico para alimentar a ese emisor, la cámara de tratamiento adjunta al emisor y los accesorios.
3. Si no se dispone del prototipo de laboratorio adecuado para el escalamiento, hay que desarrollarlo. Para ello hay que realizar las siguientes operaciones:
 - Se selecciona el material adecuado. Generalmente aleaciones de aluminio y titanio.
 - Se diseña el transductor, con criterios teóricos y experimentales, y la asistencia de métodos numéricos. Se determina para el radiador, la capacidad de potencia mediante cálculo por un programa de elementos finitos (FEM). El campo acústico se calcula por algún programa que incluya FEM y elementos de contorno (BEM). [2]



- Se construye el prototipo, primero en aluminio y luego en titanio. En ambos casos se caracteriza en baja potencia, midiendo impedancias, distribución de desplazamientos, rendimiento mecánico-acústico y campo acústico. Asimismo se caracterizan en alta potencia determinando la existencia de vibraciones, espureas, calentamientos locales y la evolución de impedancia y frecuencia durante tiempos largos de trabajo en continuo (100 Horas).
4. Realizado el prototipo de laboratorio, se toma éste como referencia para el escalamiento y desarrollo del modelo industrial. Para abordar un problema industrial de grandes dimensiones, existen las siguientes caminos:
- Construir un emisor multielemento constituido por un conjunto de unidades similares a la de laboratorio. Esta solución, además de su complejidad, tiene inconvenientes técnicos. En gases, los emisores tipo placa vibrante tienen anchos de banda muy estrechos (1,5-6 Hz), por lo que es muy difícil mantener el conjunto de emisores emitiendo a la misma frecuencia y en fase.
 - Aumentar de tamaño el prototipo de laboratorio escalándolo hasta las dimensiones precisadas, con barras y placas trabajando en modos altos.
 - Escalamiento lineal. Todas las dimensiones se aumentan por un factor de escala "K", que da el tamaño requerido (Ver Figura 3). Sin embargo la frecuencia del modelo escalado decrece en el factor 1/K. Es importante, por tanto, saber como afecta la frecuencia al proceso.

El hecho de contar con un prototipo de laboratorio, junto a determinados criterios de escalamiento facilita el planteamiento del diseño de un modelo de gran tamaño. En todo caso conviene efectuar además cálculos por métodos numéricos y realizar el desarrollo en forma similar al prototipo de laboratorio. Para buscar la solución óptima no solo hay que adoptar criterios técnicos sino también económicos. La factibilidad técnico-económica de la tecnología desarrollada es esencial para su implantación en la industria.

5. El modelo industrial se somete a pruebas de funcionamiento a máxima potencia. Cualquier mal funcionamiento puede implicar un rediseño del modelo. Finalmente, se prueba en la industria o planta piloto.



Fig. 3: Escalamiento de un prototipo de placa vibrante.

3 ESCALAMIENTO ACÚSTICO LINEAL

El método de escalamiento acústico lineal se puede aplicar a sistemas (barras y/o placas) vibrantes y también a campos acústicos en fluidos, libres o confinados. -[3]

Por las condiciones elásticas de sólidos y fluidos, cuando todas las dimensiones de una estructura resonante y/o cámara de tratamiento se multiplican por un factor de escala "K" el nuevo modelo escalado resulta similar al primitivo tanto geoméricamente como dinámicamente. En el nuevo modelo no cambia esencialmente la distribución de velocidades y tensiones pero otras características del emisor si se ven afectadas.

Se puede demostrar que si un sistema acústico se escala de forma que todas las dimensiones se multiplican por xK, la distribución de desplazamiento w' en la nueva estructura será es: $w'(x,y,z) = Kw(x,y,z,t)$ siendo $w(x,y,z)$ la distribución de desplazamiento en el modelo a escalar. La frecuencia de resonancia de trabajo F' del nuevo sistema es $F'=K/F$. Analizando las

ecuaciones generales de estructuras vibrantes y campos acústicos confinados, se determinan las relaciones que a continuación se indican:

Potencia radiada para la misma tensión máxima en el material: al ser la potencia radiada proporcional a la superficie, en el modelo escalado vendrá incrementada en un factor K^2 .

Resistencias de radiación y de pérdidas: Se puede demostrar que al escalar no cambian en los sistemas de transductores tipo placa vibrante.

En consecuencia, la impedancia total en resonancia no cambia y el rendimiento mecánico acústico tampoco. Se puede demostrar asimismo que el factor de calidad tampoco cambia. El ancho de banda se reduce al escalar, en el factor $1/K$.

Campo acústico: en cámaras con dimensiones $\gg \lambda$, podemos considerar que la atenuación es proporcional al cuadrado de la frecuencia (sin considerar el efecto de las paredes).

Se puede demostrar que la presión acústica en la cámara con el emisor escalado aumenta en un factor K .

En la Tabla 1 se resume el efecto de escalar por K , estructuras resonantes y cámaras de tratamiento, sobre diferentes parámetros que determinan el comportamiento del sistema.

Tabla 1: Relaciones que determinan el comportamiento del sistema acústico formado por estructuras resonantes y cámaras de tratamiento

1 Estructura resonante	Efecto sobre modelo escalado xK
Volumen y peso transductor V, P	$V'=K^3V$ $P'=K^3P$
Superficie radiante S	$S'=K^2xS$
Frecuencia de resonancia F	$F'_o=1/KxF_o$
Desplazamiento δm	$\delta m'=Kx\delta m$
Velocidad de vibración v	$v'=v$ no cambia
Capacidad de potencia W	$W'=K^2xW$
Resistencia de radiación	$R_r=R_r$ no cambia
Resistencia de pérdidas R_p	$R'_p=R_p$ no cambia
Rendimiento mecánico-acústico. η	$\eta'=\eta$
Factor de calidad Q_T	$Q_T'=Q_T$
Ancho de banda Bw	$Bw'=(1/K)Bw$
Separación de modos cercanos ΔF	$\Delta F'=(1/K)\Delta F$
2. Campo acústico libre	
Intensidad acústica. Radiada Y	$I'=I$ no cambia
Longitud campo cercano, L	$L'=KL$
Angulo apertura campo lejano, γ	$\gamma'=\gamma$ no cambia
Atenuación acústica en fluido α (m^{-1})	$\alpha'=(1/K^2)\alpha$
3. Campo acústico en cámara	
Volumen cámara V_c	$V'_c=K^3V_c$
Presión acústica en cámara p	$p'=Kp$
Forma del campo confinado	$w'(x, y, z)=w(w, y, z)$ no cambia

Factores no escalables

El material empleado en la fabricación de los transductores de potencia, independientemente del tamaño de estos, es el mismo. El tamaño de grano de la microestructura no es escalable. Como el efecto de la fatiga del material sometidos a vibraciones de alta frecuencia depende del tamaño de grano en relación a la longitud de onda de la vibración, los transductores escalados, deberían soportar mejor los efectos de la fatiga del material. Sin embargo en estructuras de gran tamaño, es muy difícil garantizar características homogéneas del material. Si coinciden puntos de gran tensión mecánica con defectos del material, la ruptura por fatiga puede ocurrir antes de lo esperado. Este aspecto hay que tenerlo en cuenta en el diseño.

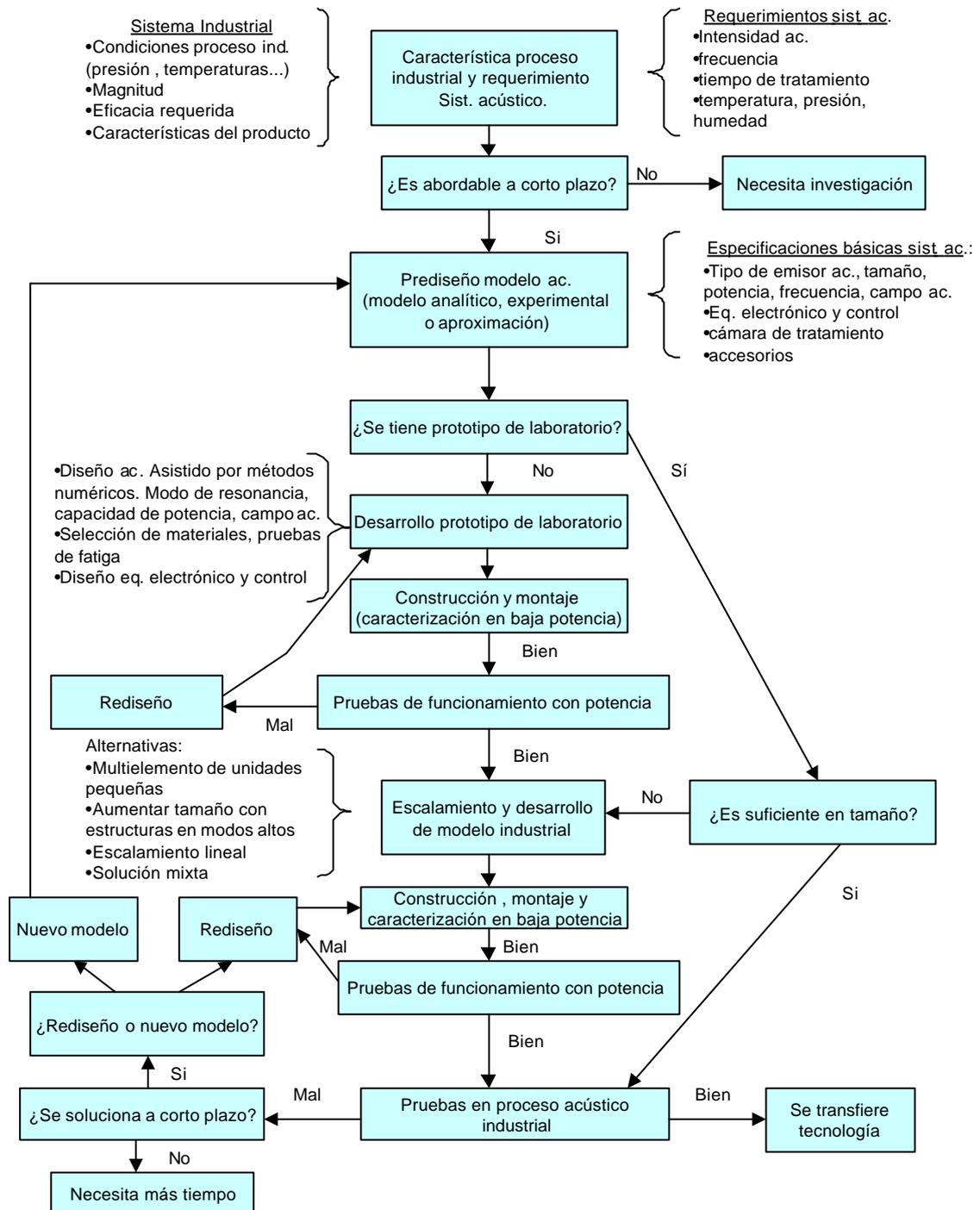


Figura 2: Desarrollo de sistemas acústicos de potencia

4. CONCLUSIONES

El paso desde el pequeño prototipo de laboratorio a un sistema industrial es complejo. El desarrollo de sistemas acústicos de potencia requiere explorar alternativas de escalamiento, de acuerdo a la aplicación específica. Para determinar el tipo de escalamiento hay que conocer las alternativas y limitaciones de éstas. En sucesivos pasos de prediseño, diseño y rediseño, asistido por métodos numéricos, se puede llegar a una solución óptima, que hay que construir, caracterizar y probar.

El escalamiento acústico lineal es quizás la alternativa más práctica. Merece destacar el hecho de que es válido para transductores resonantes que empleen tanto estructura vibrando extensionalmente como flexionalmente, así como para cámaras de tratamiento donde puede existir un campo acústico confinado. Un análisis sencillo de este tipo de escalamiento permite tener una visión clara y rápida del efecto que tiene el factor de escala "K" sobre las principales relaciones que determinan el comportamiento del sistema acústico. De esta forma se pueden plantear soluciones y diseños adecuados a un problema industrial específico.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro de la segunda fase del Proyecto "Filtros acústicos para la aglomeración y separación de micropartículas en gases de combustión" financiado por OCIDE y coordinado por ENDESA.

REFERENCIAS

- 1) J.A. Gallego, G. Rodríguez, E. Riera, C. Campos, F. Vázquez, V.M. Acosta. "A Macrosonic system for industrial processing", *Ultrasonics* 38 , 2000, 331-336.
- 2) F. Vázquez, G. Rodríguez, J.A. Gallego, E. Riera, V. M. Acosta, C. Campos, E. Andrés, "Desarrollo de generadores macrosónicos para aplicaciones industriales en medios gaseosos" Rediseño numérico del elemento radiante por problemas de fatiga, II Congreso Iberoamericano de Acústica, Madrid Octubre 2000.
- 2) R.S. Woolett, "Power limitation of sonic transducers", *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, Vol. SU-15, (1969).