

Transductores macrosónicos tipo placa vibrante escalonada Fundamentos, desarrollos, estado actual

J.A.Gallego, G.Rodríguez*, F. Vázquez, L. Gaete, C.Campos, E.Riera, F. Montoya^(a), J.L. San Emeterio, A. Ramos, P.T. Sanz, J.C- Lázaro, V. Acosta, J.C. Gálvez, L. Elvira, G. Nájera, A. Blanco^(a), E.Andrés, M. Navajas^(a)
Departamentos de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas
Instituto de Acústica, CSIC C/ Serrano, 144 28006 Madrid España
Tel. 915618806 - Fax. 914117651
(a) Instituto de Física Aplicada, CSIC, Serrano 144, 28006, Madrid

* Coordinador de la recopilación y redacción del trabajo

PACS: 43.25.Vt, 43.40.Dx

Resumen

En este artículo se describen muy brevemente los fundamentos y desarrollo de un nuevo tipo de transductor macrosónico. El estudio y desarrollo de diferentes aspectos de este dispositivo ha constituido una línea de investigación original y permanente del Departamento de Sistemas, Señales y Tecnologías Ultrasónicas del Instituto de Acústica, que ha permitido generar y utilizar en forma eficiente y novedosa ondas acústicas de alta intensidad.

Abstract

This paper deals with brief review about of the fundamentals and development of a new type of high power acoustic transducer. The study and development of the different aspects of this device have constituted an original and permanent research topic in the Ultrasonic Department of the Instituto de Acústica, giving rise to the efficient generation of high intensity acoustic waves and their use in new applications.

1.- Introducción

El comienzo de esta línea de trabajo se remonta a 1967, en el Instituto O.M. Corbino (CNR), de Roma, con el estudio de generadores de ultrasonidos en aire.⁽¹⁾ El hecho relevante fué lograr direccionalidad en la emisión acústica de placas vibrando a flexión. La emisión de placas planas carece de direccionalidad, sin embargo con placas vibrantes de perfil escalonado se logró conseguir una radiación coherente similar a un pistón acústico teórico⁽²⁾. Para excitar las placas se emplearon vibradores piezoeléctricos constituyendo los transductores acústicos que denominamos tipo placa vibrante escalonada. (ver figura)

A partir de 1971, en Madrid, en el Departamento de Acústica del CIF "L. Torres Quevedo" (Centro de Investigaciones Físicas), se estudiaron y construyeron transductores con placa circular escalonada de mayor tamaño, desarrollando paso a paso prototipos de potencia con alta eficiencia mecánico-acústica y gran direccionalidad en la emisión⁽³⁾⁽⁴⁾. Esto nos permitió disponer de emisores de alta intensidad y abordar aplicaciones que no habían sido desarrolladas a escala industrial por falta de emisores adecuados.

Actualmente se dispone de un amplio conjunto de prototipos de emisores acústicos de alta intensidad, con placa vibrante escalonada circular o rectangular, alimentados por generadores electrónicos específicos para su utilización en numerosos campos de trabajo. Las perspectivas abiertas al consolidar esta singular tecnología emergente, se deben al trabajo de varias personas durante varios años. En esta publicación se presentan en forma esquemática los principales desarrollos y fundamentos de esta tecnología.

2- Transductores para uso en gases y medios multifásicos de baja densidad

2.1- Radiación acústica de placas escalonadas vibrando a flexión.

Radiación coherente⁽⁶⁾

La idea novedosa fue obtener a partir de una placa vibrando a flexión radiación coherente, mediante un diseño de perfil escalonado, de tal forma que entre los sectores en contrafase exista una diferencia de espesor de media longitud de onda de la radiación en el medio de propagación. Con esto se logra una directividad en la radiación similar a la de un pistón teórico.

Este tipo de diseño se ha empleado en radiadores para generar campos estacionarios intensos en cámaras de aglomeración acústica de aerosoles.

Radiación focalizada⁽⁶⁾

Más tarde se observó la conveniencia de generar campos acústicos focalizados. Esto condujo a generalizar la idea anterior y llevó al estudio y diseño de un tipo especial de radiador con placa escalonada, donde la energía radiada se focalizaba en un volumen determinado, consiguiendo varias decenas de W/cm^2 . Básicamente, el diseño consiste en una placa circular vibrando a flexión con modos axisimétricos, con pequeños escalones cubriendo las zonas internodales, de tal modo que a un determinado punto del eje la radiación proveniente de cada zona, llega en fase con las otras, compensando con el respectivo escalón la diferencia de camino y fase de partida. Este tipo de diseño se ha utilizado en radiadores para desespumación acústica.

2.2- Estructuras tipo placa vibrante como transductores de potencia.⁽⁶⁾⁽⁷⁾

Los transductores piezoeléctricos con radiador de placa escalonada resonante constituyen emisores acústicos cuyas características más relevantes, son su elevado rendimiento mecánico acústico (>70%) y capacidad su de potencia. Esto

es debido a la amplia superficie del radiador, (la placa vibrante), y las reducidas pérdidas internas del mismo, que dependen de su espesor y la constante de pérdidas del material.

Estas características, junto a la direccionalidad de la radiación de la placa escalonada, permiten constituir un emisor de alta intensidad acústica para aplicaciones en fluidos y medios multifásicos de baja densidad tales como aglomeración de aerosoles, rotura de espumas, etc,

2.3 - Radiadores con placas resonantes en modos altos⁽⁸⁾⁽⁹⁾

Con el objetivo de disponer de radiadores de mayor tamaño y mayor capacidad de potencia conservando la frecuencia de resonancia, se desarrollaron placas resonantes en modos altos. Se pasó de placas circulares resonantes con 3 modos axisimétricos a 5 modos y luego a 7 modos; aumentando de 200 mm. a 480 mm. el diámetro de la placa y de 100W a 400W la potencia aplicada. El problema que surgía era que los desplazamientos vibratorios disminuían en los sectores periféricos de la placa vibrante. Esto se corrigió modificando la parte trasera de la placa escalonada, mediante canales en las partes opuestas a las de mayor espesor, para lograr una distribución homogénea de desplazamiento vibratorio y aprovechar eficientemente toda la superficie radiante. Esta distribución más homogénea de la vibración mejoró asimismo la capacidad de potencia.

2.4 - Escalamiento acústico de prototipos⁽¹⁰⁾

Otra alternativa práctica de obtener transductores de mayor tamaño y capacidad de potencia es mediante un escalamiento lineal de las dimensiones de un prototipo. Si se aumentan todas las dimensiones por K , la frecuencia del nuevo modelo disminuye en $1/K$, la superficie radiante y la capacidad de potencia aumenta en K^2 y se mantiene constante el rendimiento e impedancia del transductor. De acuerdo a la influencia de la frecuencia en el proceso real, este método permite establecer criterios para el escalamiento a tamaños industriales de emisores acústicos. Así se construyeron transductores de 10KHz y 7KHz tomando como referencia transductores de 20 KHz.

2.5 - Grandes radiadores con placa rectangular biescalonada⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

El desarrollo y empleo de placas rectangulares en lugar de circulares obedeció principalmente a dos motivos: Por una parte, las dificultades para obtener discos de dimensiones adecuadas, de aleaciones de titanio forjadas con las especificaciones necesarias para construir radiadores de potencia, siendo, en cambio, posible obtener chapa de titanio de gran tamaño. Por otro lado una placa rectangular escalonada por ambas caras, vibrando a fle-

xión con líneas nodales paralelas al ancho, permite aprovechar fácilmente la radiación trasera, empleando un reflector adecuado.

Mediante placas rectangulares es posible diseñar y construir transductores de gran tamaño y potencia para aplicaciones industriales. Usando criterio de escalamiento acústico asistido por métodos numéricos (FEM - BEM), se ha desarrollado un transductor con placa biescalonada de titanio de $1,6 * 0,8$ m., resonante a 7 KHz, con capacidad de 4KW.

2.6 - Transductores pulso-eco para medidas a gran distancia en aire⁽¹³⁾

Por encargo de una empresa privada, se estudió un tipo de emisor-receptor, con placa vibrante para medir largas distancias (50 - 100 m.). Se trataba de diseñar un transductor con cierta capacidad de potencia, buena eficiencia, gran ancho de banda y gran directividad. Esto se consiguió diseñando una placa muy delgada de aluminio, trabajando en modos altos con escalones de material plástico poroso, pegados a la placa plana. De hecho, una placa delgada vibrante reúne las cualidades de tener pérdidas internas despreciables, ya que estas dependen del espesor, un factor de calidad bajo y un ancho de banda grande, ya que su masa es muy pequeña y la energía que se almacena es pequeña en comparación con la energía que se radia que depende de la superficie.

2.7 - Materiales empleados en transductores de potencia⁽¹⁴⁾

En gases debido a la baja impedancia característica del medio, los radiadores de potencia deben soportar grandes amplitudes de desplazamientos sin sufrir fisuras. Se usan principalmente aleaciones de titanio por su baja pérdida por fricción interna del material, y su resistencia a la fatiga en alta frecuencia. El problema de la resistencia a la fatiga de los materiales empleados en la construcción de las placas vibrantes es muy importante, ya que limita la tensión máxima que puede soportar el material. Un método práctico desarrollado para estudiar fatiga, consiste en medir la atenuación del material en función del desplazamiento unitario (deformación) para altos desplazamientos vibratorios. Se ha comprobado que la atenuación permanece aproximadamente constante hasta un cierto valor de deformación, comenzando después una variación no lineal que pronto conduce a la ruptura del material. Esto permite fijar unos límites dinámicos, de deformación y tensión para el material, límites empleados en el cálculo de la capacidad de potencia del transductor.

Aleaciones de titanio con microestructura α - β de grano fino son las más convenientes para radiadores acústicos de alta frecuencia; su límite de fatiga es >200 MPa.

3.- Transductores para uso en contacto con medios multifásicos de alta densidad

3.1 - Diseño de radiadores en contacto con medios multifásicos (sólido-líquido-gas)

Los radiadores se ponen en contacto, o muy cerca del medio a tratar (suspensiones de alta concentración, sólidos porosos, etc.), para aprovechar directamente el efecto de alta intensidad de la placa vibrante. Estos radiadores, no están sujetos a desplazamientos vibratorios tan grandes como los de uso en gases, debido a que transmiten la energía en medios de mayor impedancia específica. Así, es posible emplear materiales que soporten mejor el desgaste y a pesar de que estos tengan mayores pérdidas internas se logra un buen rendimiento mecánico acústico.

El hecho de que la impedancia específica del medio sea mayor, conlleva un diseño especial del vibrador para excitar la placa y obtener una adecuada impedancia del transductor.

Generalmente en estas aplicaciones se emplean placas vibrantes rectangulares resonando con líneas paralelas al ancho o al largo. La distribución de desplazamientos es bastante homogénea y se aprovecha toda la placa.

3.2 - Transductores para aplicaciones específicas

Transductor para deshidratación de vegetales⁽¹⁵⁾

El procedimiento de deshidratación emplea un transductor con placa vibrante para someter a vegetales laminados a una acción combinada de vibración intensa (20 micras. de desplazamiento a 20 KHz) junto a una moderada presión estática (0,1 Kg./cm²). El líquido del vegetal fluye al exterior a través de poros y capilares donde es absorbido por un aspirador a través de una placa perforada, sin que el vegetal sufra deterioro en sus propiedades.

El radiador empleado debe ser de titanio o acero, para soportar al menos 20 micras de desplazamiento vibratorio, recubierto de teflón para evitar la adhesión del vegetal.

Transductor para asistir al secado de lodos minerales⁽¹⁶⁾

Básicamente se emplea un dispositivo ultrasónico para mejorar el secado final de capas de lodo mineral en procesos de secado convencional, a través de filtros cerámicos por succión del líquido u otro tipo de filtro. El dispositivo es similar al caso anterior, el secado de vegetales, con algunas particularidades. Normalmente el proceso de secado es continuo y la placa vibrante en contacto con la capa de lodo debe permitir que esta capa se desplace sin romperse. La vibración de la placa es flexional con líneas nodales perpendiculares a la dirección del movimiento, los bordes de la placa son redondeados y la superficie tiene pequeños canales en forma

de diente de sierra para facilitar el contacto e impedir la adhesión del lodo.

Transductor para el lavado de textiles⁽¹⁷⁾

En este caso, un tejido plano se desplaza, a través de rodillos, sumergido en un baño de muy poca profundidad donde una placa rectangular vibrante plana en contacto con el tejido y cubriendo todo el ancho, produce una intensa cavitación y eliminación prácticamente instantánea de las manchas.

El material de la placa debe soportar la erosión producida por cavitación y su forma de vibración debe ser homogénea a lo largo de la placa que cubre todo el ancho del tejido.

4.-Métodos analíticos y numéricos aplicados al diseño de transductores

4.1 - Diseño analítico por ordenador de placas vibrantes escalonadas⁽⁹⁾

El cálculo de placas planas circulares o rectangulares es conocido en la literatura. Pero el cálculo de placas escalonadas es complejo y hubo de ser abordado por métodos analíticos tratados por ordenador. Se empleó, básicamente el método de Rayleigh, que consiste en suponer una curva dinámica de desplazamientos vibratorios, con parámetros a calcular (α, β), que se pueden determinar mediante un conjunto de ecuaciones obtenidas con las condiciones de contorno y de conservación. Por ejemplo: en placa libre en modos axisimétricos esfuerzo cortante y momento flector radial son cero en los bordes; se agregan condiciones de conservación de energía y cantidad de movimiento. Este conjunto de cuatro ecuaciones se resuelve por ordenador determinando: los tres parámetros de la curva dinámica, los ceros de esta curva que dan la posición de los escalones y la frecuencia de resonancia.

La curva dinámica propuesta para obtener la forma de vibración de una placa circular escalonada con modos axisimétricos es del tipo: $W_n(r) = K(r) [J_0(\alpha r) + BI_0(\beta r)]$; donde J_0, I_0 son funciones de Bessel; $K(r) = \text{espesor mayor} * \text{espesor base de una placa escalonada}$, y "r" es la coordenada radial. Esto permite un buen cálculo aproximado para placas resonantes en modos altos, no muy gruesas, con una precisión aceptable especialmente para la posición de los últimos círculos nodales que son más difíciles de determinar.

Otro procedimiento de diseño consistió en calcular las placas escalonadas como constituidas por una serie de placas y anillos planos, pero de distintos espesores, estableciendo las condiciones adecuadas de continuidad y de contorno⁽⁸⁾.

4.2.- Métodos de elementos finitos (FEM) y elementos de contorno (BEM) aplicados al diseño de transductores.

FEM⁽¹⁸⁾

Se emplea el método de elementos finitos para el diseño de estructuras dinámicas como el transductor tipo placa vibrante. Inicialmente se analiza un prediseño proveniente del cálculo analítico o un nuevo modelo derivado de un prototipo anterior. Principalmente el estudio por FEM, permite un análisis modal de la estructura vibrante, es decir, modos propios de vibración existentes en un determinado rango de frecuencia. También permite un análisis armónico, es decir, para una determinada excitación, se obtienen los valores reales de distribución de desplazamiento y tensiones mecánicas en la estructura vibrante. Mediante estos análisis es posible definir la capacidad de potencia de la estructura, teniendo en cuenta el límite de fatiga de los materiales empleados. La potencia radiada se determina con la distribución del desplazamiento en la superficie vibrante

Además, en el caso de transductores piezoeléctricos tipo placa vibrante es posible determinar la distribución de desplazamientos en el vibrador e impedancia eléctrica en los terminales de las cerámicas piezoeléctricas.

FEM - BEM⁽¹⁹⁾

Asimismo, se emplean métodos numéricos para determinar el campo acústico radiado, coherente o focalizado, campo lejano y cercano al radiador. Se usan programas de elementos de contorno (BEM), acoplados a los FEM. Con esto se determina la distribución de presiones acústicas en cualquier punto del espacio radiado.

5. - Generadores electrónicos de potencia

5.1-Generadores con seguimiento automático de frecuencia de resonancia para transductores de banda estrecha⁽²⁰⁾⁽²¹⁾

Una de las características de los transductores piezoeléctricos tipo placa vibrante escalonada usados en gases, es la estrechez de su banda (2 - 6 Hz) y las amplias variaciones de la frecuencia de resonancia en condiciones normales de operación (100-200 Hz). El generador electrónico debe ser por tanto capaz de seguir estas variaciones de frecuencia con máxima potencia. El sistema de seguimiento diseñado para ello básicamente consiste en: (a) Convertir la impedancia del transductor en puramente resistiva en resonancia, compensando la capacidad de las cerámicas piezoeléctricas con una inductancia. (b) Mantener la admitancia mecánica del transductor en fase cero, mediante un ajuste automático e instantáneo de la frecuencia con un oscilador VCO (Voltage Con-

trolled Oscillator). Esta regulación dinámica es muy estable ya que la variable de control no depende de la amplitud de vibración como en "feed-backs" convencionales.

Este sistema electrónico ha sido progresivamente mejorado introduciendo sistemas de control de potencia y simplificando el proceso de seguimiento de frecuencia,

Los generadores electrónicos incorporan asimismo un amplificador de potencia y una caja de adaptación de impedancia con el transductor

5.2.- Generadores con control digital dinámico de resonancia⁽²²⁾

Recientemente se ha introducido en los generadores electrónicos el control digital de la frecuencia de resonancia. Este dispositivo de control se ha diseñado con microprocesadores que permiten manejar un software con un conjunto de algoritmos. Con estos, es posible definir un barrido de frecuencias en un rango predeterminado, seleccionar en ese rango la frecuencia de trabajo función de la potencia máxima $V \times I$ y mantenerse constantemente en ese punto siguiendo la frecuencia de resonancia. El sistema de control digital también posee algoritmos de protección del transductor y del amplificador. Además, se ha desarrollado otro software específico mediante un programa lab-view de gráficos en tiempo real para inspección y control del transductor. Variaciones de impedancia fuera de un determinado rango y anomalías en los valores de voltaje y corriente son detectados y corregidos con medidas de seguridad como reducción de potencia aplicada. Finalmente, el programa incluye gráficos de resultados y creación de base de datos que se pueden visualizar y controlar via internet.

6.- Estado actual y perspectivas

El grupo de potencia del Departamento de SST Ultrasonicos, actualmente continúa con el desarrollo de gran-



Transductor tipo placa escalonada con caja de adaptación y generador electrónico.

des transductores con placa biescalonada, para aplicaciones industriales en gases. Al mismo tiempo, se estudia y diseña un nuevo tipo de emisor de potencia focalizado, con placa vibrante rectangular, para eliminación de espumas industriales. También, se están abordando aspectos de ingeniería de detalle en el diseño y construcción de transductores de potencia, así como en elementos complementarios de refrigeración. Esto permitirá, a los dispositivos desarrollados soportar condiciones de trabajo de tipo industrial.

Por otra parte, en un futuro próximo se espera disponer de fuentes de alimentación de potencia, digitales, conmutadas, para alta frecuencia. Esto haría posible obtener generadores más compactos y con una eficiencia electromecánica del 90%.

Para concluir, hay que decir que el desarrollo futuro de transductores de potencia está ligado al de sus posibles aplicaciones industriales. Por esto, se está contemplando reunir en un programa un amplio conjunto de aplicaciones y tecnologías específicas, con transductores de potencia tipo placa vibrante, así como su extensión a casos afines. Esto facilitaría el uso de esta tecnología y su aplicación a problemas industriales concretos en plazos relativamente cortos⁽¹⁰⁾.

Referencias

- 1.- J.A. Gallego Juárez. Generador de Ultrasonidos en aire. INUA - R.T. - Roma 1967.
- 2.- A. Barone and J.A. Gallego Juárez. Flexural vibrating free-edge plates with stepped thicknesses for generating high directional ultrasonic radiation. *JASA* Vol 51, n° 3, 1972, pp. 953-959.
- 3.- J.A. Gallego, L.Gaete and G Rodríguez. Ultrasonic power emitter. British Patent 2029159 (1982)
- 4.-, G. Rodríguez C., J.A. Gallego Juárez, E. Andrés Mejoras introducidas en la patente de invención de emisor ultrasónico de potencia con alto rendimiento y directividad para aplicaciones en gases (Pat. Esp. 459487). Certificado de adición 542694, (1985).
- 5.-G, Rodríguez, J.L. San Emeterio, J.A. Gallego. Focused high-power ultrasonic transducer with stepped radiator for industrial application in gases. *Proc. Ultrasonic International* 87, pp. 794-799 (1987).
- 6.- J.A. Gallego, G. Rodríguez. Análisis mediante circuito equivalente de un emisor ultrasónico con placa vibrante. *Electrónica y Física Aplicada*. Vol. 16, n° 4, 1973, pp. 605 - 615.
- 7.- J.C. Lázaro O; P.T. Sanz S., J.A. Gallego Juárez. Estudio y simulación de transductores piezoeléctricos de potencia mediante circuito equivalente. *Anales de Física* 89 (1993), n° 3, pp. 156-158.
- 8.- J.A. Gallego Juárez. Axisymmetric vibrations of circular plates with stepped thickness. *J. Sound Vib.* 26 (1973) 411-416.
- 9.- J.L. San Emeterio, J.A. Gallego Juárez, G. Rodríguez. High axisymmetric modes of vibration of stepped circular plates. *J. Sound Vib.* V.114, n° 3 (1987), pp. 495-505.
- 10.- G. Rodríguez, C. Campos, V. Acosta, F. Vázquez, J.A. Gallego. Desarrollo de sistemas acústicos para tratamiento de fluidos. Escalamiento de prototipos de laboratorio a sistema industrial. *Tecnicística* 2000, Madrid 16 a 20 Octubre 2000.
- 11.- J.A. Gallego, G. Rodríguez, E. Riera, C. Campos, F. Vázquez, V. Acosta. A macrosonic system for industrial processing. *Ultrasonic* 38 (1999) 331-336.
- 12.- F. Vázquez M., G. Rodríguez C., C. Campos P., L. Elvira S., J.A. Gallego Juárez. Nuevos avances en el desarrollo de transductores macrosónicos de placa escalonada. Congreso Ibérico de Acústica, 14-16 Septiembre 1998, Lisboa. Libro de Comunicaciones, 387-390.
- 13.- J.A. Gallego, G. Rodríguez, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, J.C. Lázaro. An acoustic transducer system for long distance ranging application in air. *Sensors and actuators A*, 1993, Ed. Elsevier Sequoia, (ISBN: 0924-427/93), vol. 37-38, pp. 397-402.
- 14.- Campos P., J.A. Gallego Juárez. Limiting strain of metals subjected to high intensity ultrasound. *Acustica united with. Acta Acústica*, Vol. 82, n°6. 1996, pp.823-828.
- 15.- J.A. Gallego, G. Rodríguez, J.C. Gálvez, T.S. Yang. *Drying Technology*, 17 (3), 597-608 (1999)
- 16.- J.A. Gallego Juárez, G. Rodríguez C., L. Elvira S. Dispositivo ultrasónico para la mejora de procesos de separación sólido-líquido en suspensiones. Patente española PCT/ES 98/00304.
- 17.- J.A. Gallego, G. Nájera, G. Rodríguez, F. Vázquez, P. Van der Vlist. Procedimiento y dispositivo para lavado ultrasónico de textiles en continuo. Patente española, n° 960 2092, Octubre 1996.
- 18.- F. Vázquez, G. Rodríguez, J.A. Gallego J. Improvements in the design of the stepped-plate transducer by the finite element method. *Proceeding of the 11 th International FASE Symposium*. Valencia 15-17 Noviembre 94, pp. 61-64.
- 19.- C. Campo P., A. Lavie, B. Dubus, G. Rodríguez, J.A. Gallego. Numerical study of air-borne acoustic field of stepped-plate high power ultrasonic transducer. *Acústica united with Acta Acústica*, Vol. 84 (1998), n° 6, 1042-1046.
- 20.- A. Ramos, F. Montoya, J.A. Gallego. Automatic system for dynamic control of resonance in high power and high Q ultrasonic transducer. *Ultrasonics*, 4 (1985) 151-156.
- 21.- J.A. Gallego, G. Rodríguez, J.L. San Emeterio and F. Montoya. Electroacoustic unit for generating high sonic and ultrasonic intensities in gases and interphases. *US Patent* 5299175 (1994)
- 22.- F. Montoya, A. Blanco. Memoria Técnica Instituto de Física Aplicada, 2000