

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO VIBRACIONAL NOLINEAL DE LOS
SISTEMAS ULTRASONICOS DE POTENCIA CON RADIADORES DE PLACA
PARA APLICACIONES INDUSTRIALES**

PACS: 43.35.Cz

Andrea Cardoni¹, Enrique Riera², Alfonso Blanco³, Víctor Acosta², David Arroyo², Juan A. Gallego Juárez²

¹ Pusonics SL

Pico Mulhacen 34. E28500 Arganda del Rey (Madrid)

² Grupo de Ultrasonidos de Potencia, CSIC

Serrano 144. E28006 Madrid

³ Instituto de Física Aplicada, CSIC

Serrano 144. E28006 Madrid

ABSTRACT

Among the green technologies that are being introduced, the Power Ultrasonics (UDP) form an emerging field with great potential to produce or improve many processes. A series of new generation systems UDP for applications in the food industry, environmental and manufacturing industries have been developed in the laboratory and semi-industrial scale. For the industrialization of these processes is to influence the expansion of power capacity ultrasonic generators by eliminating and / or control of nonlinear vibration inherent to high intensities own power processes.

In this paper the vibration characteristics of a vibrating circular plate transducer designed for defoaming liquid media has been experimentally characterized by a system of electrical and optical measures. The non-linear effects that affect the operation of ultrasonic systems have been detected and discussed their physical causes. This information can be used to develop more efficient ultrasonic generators.

RESUMEN

Entre las tecnologías "verdes" que se están introduciendo, los Ultrasonidos de Potencia (UdP) constituyen un campo emergente con un gran potencial para producir o mejorar numerosos procesos. Una serie de nuevos sistemas de generación de UdP para aplicaciones en la industria alimentaria, en el medio ambiente y en la industria manufacturera han sido desarrollados a nivel de laboratorio y escala semi-industrial. Para la industrialización de estos procesos se pretende incidir en la ampliación de la capacidad de potencia de los generadores ultrasónicos mediante la eliminación y/o control de las vibraciones no lineales inherentes a las altas intensidades propias de los procesos de potencia.

En este trabajo el comportamiento vibratorio de un transductor con placa vibrante circular diseñado para desespumar medios líquidos ha sido caracterizado experimentalmente mediante un sistema de medidas eléctrica y óptica. Los efectos no lineales que afectan el funcionamiento del sistema ultrasónico han sido detectados y sus causas físicas discutidas. Esta información puede ser utilizada para el desarrollo de generadores ultrasónicos más eficientes.

INTRODUCCION

En el momento presente existe una creciente preocupación sobre la sostenibilidad de los procesos industriales desde el punto de vista ambiental. Como consecuencia, se está generando una legislación cada vez más estricta para la producción industrial. Con el fin de cumplir con las nuevas regulaciones, las industrias están llevando a cabo grandes inversiones para encontrar tecnologías limpias y “ambientalmente amigables” capaces de proporcionar soluciones sostenibles para los procesos a gran escala.

Los Ultrasonidos de Potencia (UdP) constituyen en la actualidad una tecnología emergente por sus especiales características de tecnología “verde” capaz de actuar en muchas aplicaciones. Las energías ultrasónicas generadas a altas intensidades por los dispositivos de UdP pueden causar cambios en el medio de propagación que pueden ser explotados en procesos alimentarios, tratamientos medioambientales, fabricación de productos y salud [1, 2].

La idea de utilizar la energía ultrasónica para la industria y la medicina no es nueva, los primeros sistemas comerciales de UdP datan de los años 50. Sin embargo las perspectivas iniciales del uso de vibraciones ultrasónicas de alta intensidad no tuvo el desarrollo esperado. Existen diversas razones que explican esta situación. Los transductores magnetostrictivos que se empleaban inicialmente para generar ondas ultrasónicas tenían un rango de eficiencia de conversión electromecánica bajo. La electrónica de seguimiento de señal utilizada para la activación de los transductores era rudimentaria. Además, el diseño de los componentes de UdP dependía enteramente de los modelos analíticos que resultaban fiables sólo para sistemas de geometrías sencillas.

Durante los últimos años el desarrollo de potentes paquetes de modelización por elementos finitos, así como los notables avances en los sistemas electrónicos de control y excitación [3], junto a la necesidad de tecnologías “verdes” para los procesos industriales, han contribuido a revivir el interés por explorar y explotar el potencial de los UdP. Un factor importante en el reciente resurgimiento de las aplicaciones industriales de los UdP ha sido la introducción de una nueva generación sistemas ultrasónicos de potencia para uso en fluidos y medios multifásicos basados en un nuevo tipo de transductores de placa [1, 4].

Los principales procesos en los cuales la aplicación de los transductores de placa ha sido probada con éxito incluyen las desespumación y deshidratación de alimentos, extracción de sustancias con fluidos supercríticos, aglomeración de partículas, limpieza de textiles, separación sólido-líquido en el tratamiento de lodos, atomización, y supresión de burbujas durante la aplicación de recubrimientos de barnices y pinturas [1, 4, 5]. Sin embargo la mayoría de estos procesos ultrasónicos investigados están aún en un estado intermedio entre el laboratorio y la industria. Para desarrollar los sistemas de UdP hasta implantarlos a nivel industrial uno de los más importantes problemas a controlar es el del comportamiento no-lineal inherente a los dispositivos cuando trabajan con potencia [6, 7].

En este estudio una topología de efectos no-lineales que pueden perjudicar el eficiente funcionamiento de los generadores ultrasónicos del tipo placa vibrante circular ha sido investigada experimentalmente.

LOS TRASDUCTORES ULTRASONICOS DE PLACA

Los medios fluidos y multifásicos (fluidos con partículas, burbujas o gotas en suspensión y/o sólidos porosos con fluidos en su interior) muestran una baja impedancia acústica específica y una absorción acústica alta. A fin de obtener una transmisión eficiente de la energía ultrasónica a través de estos medios es necesario obtener un buen acoplamiento de impedancias entre la fuente de radiación ultrasónica y el medio, una gran amplitud de vibración, y haces focalizados o con alta directividad para concentrar la energía. Además, para aplicaciones industriales a gran escala, se requiere alta potencia y radiadores de superficie extensa. Los transductores

ultrasonicos de placa se caracterizan por reunir todos estos requisitos en un solo dispositivo [1, 4].

Esto tipo de radiadores pueden ser de geometría rectangular o circulares y se diseñan con un perfil especial con el que se consigue fijar la distribución del campo acústico radiado [5, 8].

1.- DESESPUMACION ULTRASONICA MEDIANTE TRANSDUCTOR DE PLACA

La espuma es un subproducto no deseado en gran variedad de procesos dentro de muy diversos sectores industriales. Entre otros cabe citar las industrias alimentarias (líneas de envasado de bebidas, fermentadores, procesos cárnicos, lácteos, etc.), química (ácidos, plásticos, etc.), farmacéutica (producción de antibióticos, vacunas, procesos biotecnológicos), droguería, minería (procesos de flotación), energía (biocarburantes), metal-mecánica, etc. Los métodos clásicos para controlar espumas se basan, en general, en el uso de anti-espumantes químicos que contaminan el producto. Otros procedimientos como los térmicos y mecánicos son poco efectivos.

Los ultrasonidos de alta intensidad ofrecen una manera efectiva y limpia para romper espuma [1, 4]. En particular, los transductores ultrasónicos de placa circular de alta potencia han demostrado controlar eficazmente el exceso de espuma producido en procesos de fermentación en reactores y en el llenado de bebidas carbónicas en líneas de alta velocidad (Figura 1a).

La figura 1b muestra un transductor de placa circular para la desespumación de medios líquidos desarrollado por el Grupo de Ultrasonidos de Potencia del CSIC y comercializado por la *spin-off* PUSONICS [9]. La estructura básica de este nuevo transductor-emisor consiste esencialmente en un vibrador piezoeléctrico extensional que excita a un radiador en forma de placa circular de superficie escalonada-acanalada, en uno de sus modos flexionales de vibración. Para el proceso de desespumación es necesario focalizar la energía acústica radiada. El foco donde se concentra la energía emitida está situado sobre el eje de simetría del disco radiador, a una distancia aproximada de 40-50 cm de su superficie y en aire puede alcanzar presiones muy elevadas (del orden de 170 dB en una área de pocos centímetros cuadrados). El mecanismo de ruptura de burbujas por ultrasonido se basa en los siguientes efectos: presiones acústicas elevadas, fuerza de radiación, resonancia de las burbujas, cavitación en la película líquida y corrientes acústicas.

Los transductores de placa focalizados se pilotan mediante un sistema electrónico que controla y sigue la frecuencia de resonancia. Los sistemas de desespumación ultrasónica ("Ultrasonic Defoaming System, UDS") actualmente comercializados operan a frecuencias de 21 y 25 kHz [9].

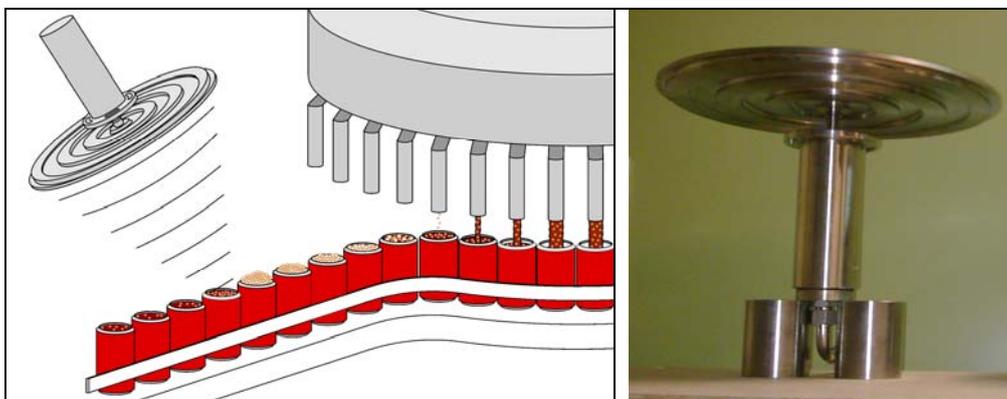


Fig. [1].- (a) Desespumación ultrasónica en una línea de envasado, (b) transductor-emisores ultrasónico de placa circular con perfil escalonada-acanalada (UDS)

2.- PROBLEMAS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS TRANSDUCTORES DE PLACA

Los sistemas ultrasónicos de geometrías complejas muestran, cuando están excitados con alta potencia, una amplia gama de fenómenos no lineales, tales como cambios de frecuencia, respuestas multi-modales, modulaciones de frecuencia y amplitud, histéresis, saturación, etc. [6, 7, 10]. Estas no linealidades afectan a la eficacia de los sistemas de UdP causando ruidos, amplitudes de vibración inadecuadas, baja fiabilidad y fallos de los componentes [11, 12].

Aunque los principios básicos del diseño lineal de los dispositivos ultrasónicos se pueden encontrar en la literatura, faltan recomendaciones específicas para eliminar o reducir su comportamiento no lineal a alta potencia. Como resultado, a pesar de que el número de empresas que desarrollan sistemas de UdP ha incrementado a lo largo de los últimos años, los dispositivos comercializados son, en la mayor parte de los casos, inapropiados para grandes instalaciones industriales. Para avanzar en el diseño de soluciones que puedan ampliar la aplicabilidad de los UdP, es necesario entender las dinámicas no lineales de los dispositivos de potencia. En particular en los transductores ultrasónicos de placa que aprovechan distintas formas de vibración y poseen una estructura sofisticada, los problemas de dinámica no lineal tienen una especial incidencia.

CONDUCTA VIBRACIONAL DE UN SISTEMA ULTRASONICO PARA DESESPUMACION

Para detectar, caracterizar y clasificar los efectos de la dinámica no lineal que limita el correcto funcionamiento de los transductores ultrasónicos de placa, es importante identificar inicialmente los parámetros modales (frecuencias propias, formas de los modos y amortiguamiento modal) de los sistemas mediante pruebas de baja potencia ejecutadas en un amplio rango de frecuencias. Subsecuentemente se mide la respuesta de los transductores en potencia, con el fin de obtener información sobre su *nivel de no linealidad* y sobre los efectos específicos que se manifiestan durante el funcionamiento.

1.- PRUEBAS VIBRACIONAL DE BAJA POTENCIA

En este estudio los datos modales del transductor-emisor de la Figura 1b diseñado para operar en una frecuencia de resonancia de 25 kHz han sido detectados en un rango de 1-80 kHz a través de una combinación de medidas eléctricas y vibratorias realizadas con puente de impedancias (HP 4192A) y vibrómetro (Polytec CFV055). Las figuras 2 y 3 muestran las curvas de admitancia y velocidad de vibración conseguidas aplicando una tensión de excitación de 1 V entre los elementos piezoeléctricos del transductor. De estas figuras se deduce que las respuestas mecánicas y eléctricas del transductor quedan caracterizadas por una fuerte densidad modal en el rango de frecuencia considerado.

2.- PRUEBAS VIBRACIONAL DE ALTA POTENCIA

Para llevar a cabo una investigación de la dinámica de potencia del transductor de placa seleccionado se ha desarrollado un trabajo experimental de caracterización, aumentando progresivamente la tensión eléctrica sinusoidal aplicada al dispositivo ultrasónico. La excitación se ha realizado con un generador (Agilent 3322A) y amplificador de ondas (QSC RMX 4050HD), mientras que las señales de respuestas eléctrica de las cerámicas piezoeléctricas y mecánica del radiador circular han sido representadas en términos de corriente y velocidad de vibración en un intervalo de 40 Hz centrado en la frecuencia de trabajo del sistema. La velocidad de vibración ha sido medida mediante un vibrómetro en un punto sobre el borde de la placa, y en dirección paralela a su eje de simetría. El diagrama del sistema de medición desarrollado para la caracterización de los sistemas ultrasónicos de potencia está representado en la Figura 4.

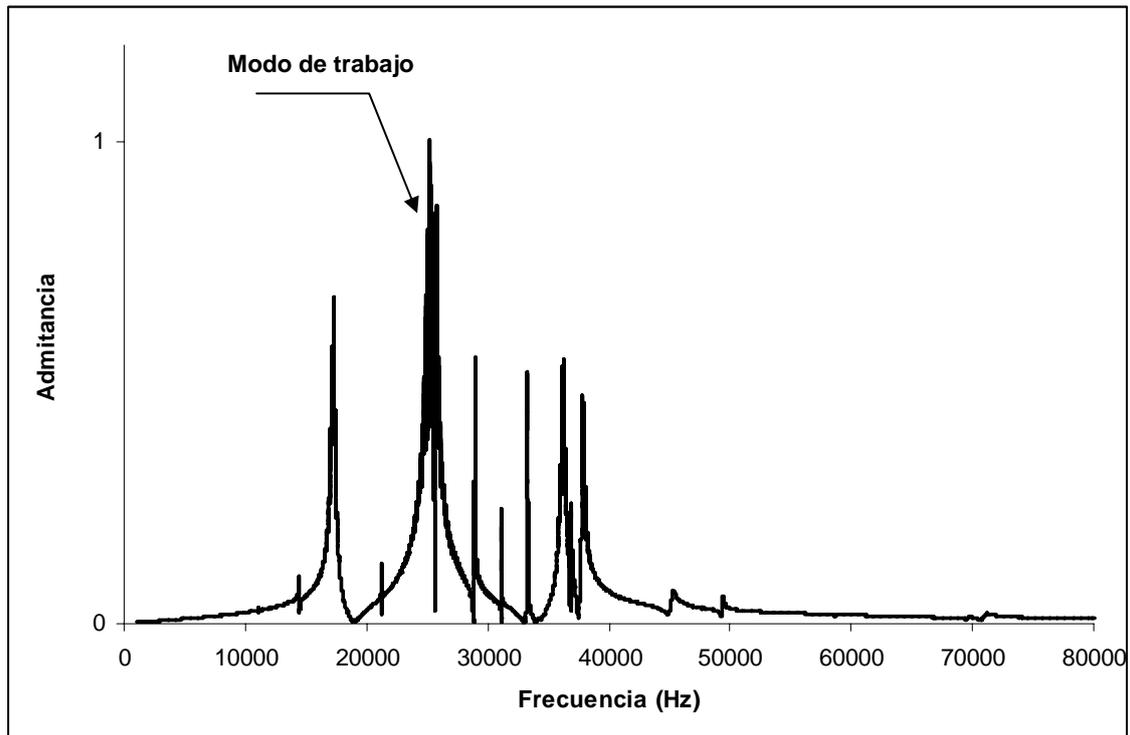


Fig. [2].- Curva de admitancia obtenida en el rango de frecuencia 1-80 kHz aplicand0 una excitación de 1 V

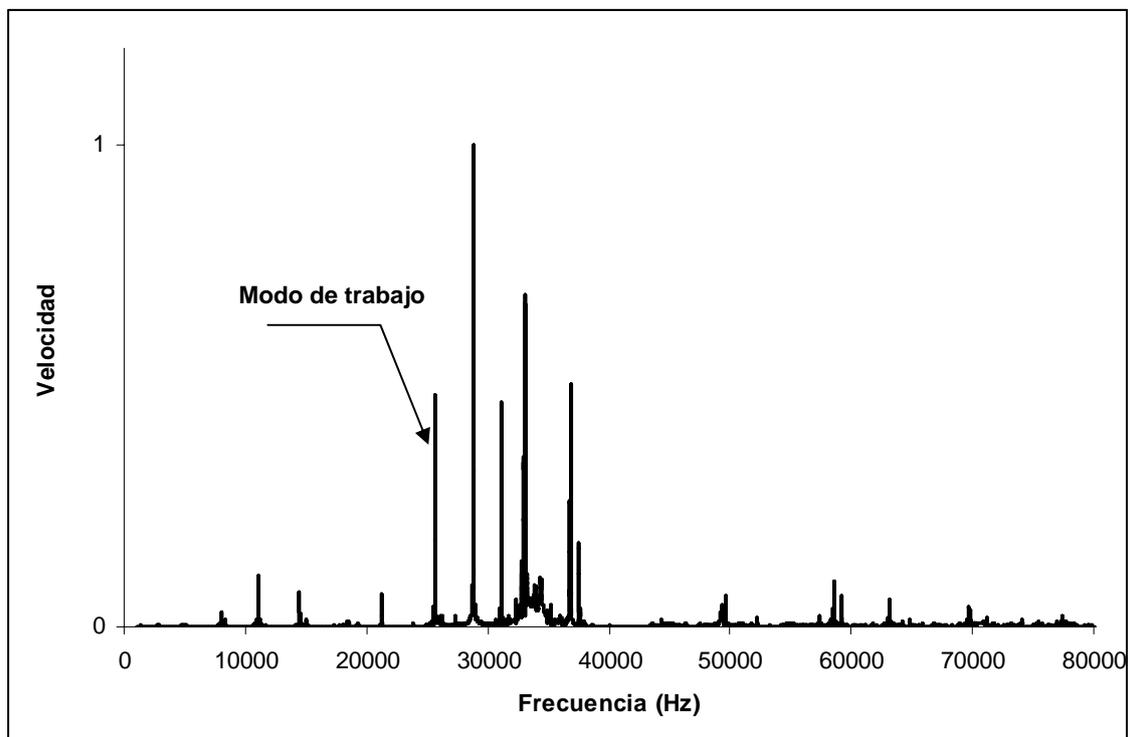


Fig. [3].- Curva de la velocidad de vibración en el rango de frecuencia 1-80 kHz aplicand0 una excitación de 1 V

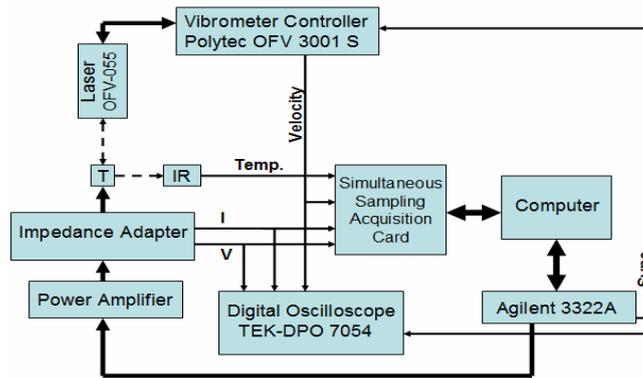


Fig. [4].- Sistema de medida para la caracterización del comportamiento de los sistemas ultrasónicos de potencia

Son hechos conocidos que la temperatura de las cerámicas piezoeléctricas aumenta durante las pruebas de potencia, así como que las condiciones de equilibrio térmico en los dispositivos ultrasónicos se alcanzan tras un cierto tiempo transitorio (que en nuestro caso es considerablemente elevado, fruto de alto valor de Q –factor de calidad- de nuestros dispositivos). Por tanto una señal sinusoidal pulsada ha sido utilizada para excitar el transductor de placa circular sobre el rango de frecuencia deseada, y a distintos niveles de potencia.

Las figuras 5 y 6 muestran las curvas de la respuesta eléctrica y mecánica del sistema excitado mediante barridos bidireccionales de la frecuencia en incrementos de 0,5 Hz. Las curvas obtenidas corresponden a señales de excitación de 10 V (Figura 5a y Figura 5b) y 300 V (Figura 6a y Figura 6b), respectivamente. Durante las pruebas de alta potencia se ha podido percibir una variación en el factor de calidad del dispositivo ultrasónico excitado en su modo nominal, el cual se ha mantenido constante en sucesivas pruebas a baja potencia.

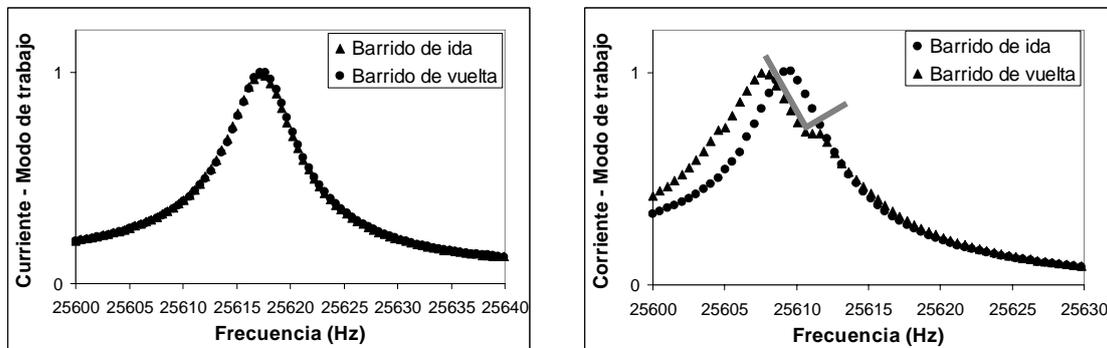


Fig. [5].- Curvas normalizadas de corriente en el modo de trabajo obtenida mediante barridos bidireccionales alrededor de la frecuencia nominal obtenidas mediante barridos bidireccionales alrededor de la frecuencia de trabajo: (a) tensión de excitación de 10 V, (b) tensión de excitación de 300 V

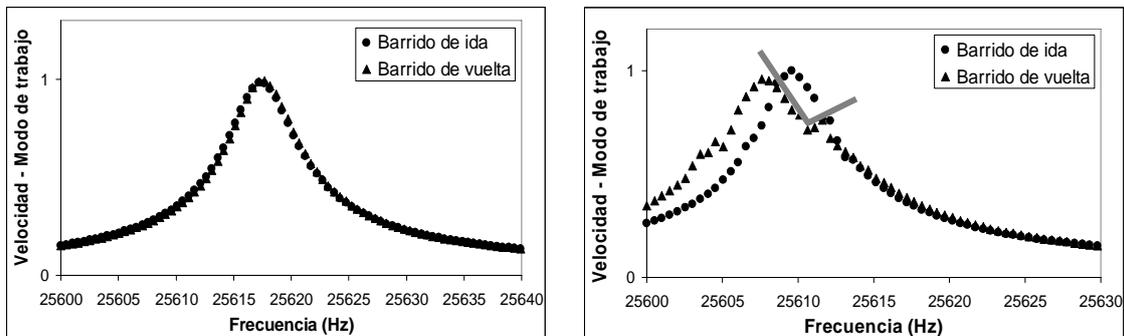


Fig. [6].- Curvas normalizadas de la velocidad de vibración del transductor de placa en el modo de trabajo obtenidas mediante barridos bidireccionales alrededor de la frecuencia nominal: (a) tensión de excitación de 10 V, (b) tensión de excitación de 300 V

En las figuras 5 y 6 se observa como las respuestas eléctricas y vibratorias del transductor de placa varían con el nivel de excitación. En particular, durante las pruebas de alta tensión tanto la corriente como la velocidad de vibración presentan valores distintos en los barridos de ida y vuelta. Una región en forma de “V” aparece en las respuestas obtenidas disminuyendo las frecuencias de excitación (figuras 5b y 6b). Dado que este tipo de comportamiento es una señal típica de interacción modal, los espectros de velocidad del transductor excitado por frecuencias interna y externa a la región marcada con color gris han sido medido a través de un osciloscopio (Tektronix DPO 7054).

La Figura 7a muestra que la respuesta del dispositivo ultrasónico es caracterizada por una sola línea espectral cerca de la frecuencia de trabajo cuando el sistema es excitado fuera de la región “V”. Para frecuencias de excitación internas a tal intervalo se ha observado que dos líneas a frecuencias alrededor de 11 kHz y 14,5 kHz surgen en el espectro de velocidad en adición al pico asociado a la frecuencia de excitación (Figura 7b). La suma de estas dos frecuencias es muy próxima a la frecuencia de excitación del dispositivo (que coincide con su resonancia nominal). Además, de la observación de la Figura 3 se ve que el dispositivo ultrasónico tiene dos modos de vibración con frecuencias vecinas a aquellas de los picos revelados en la Figura 7b y anotado como modos internos.

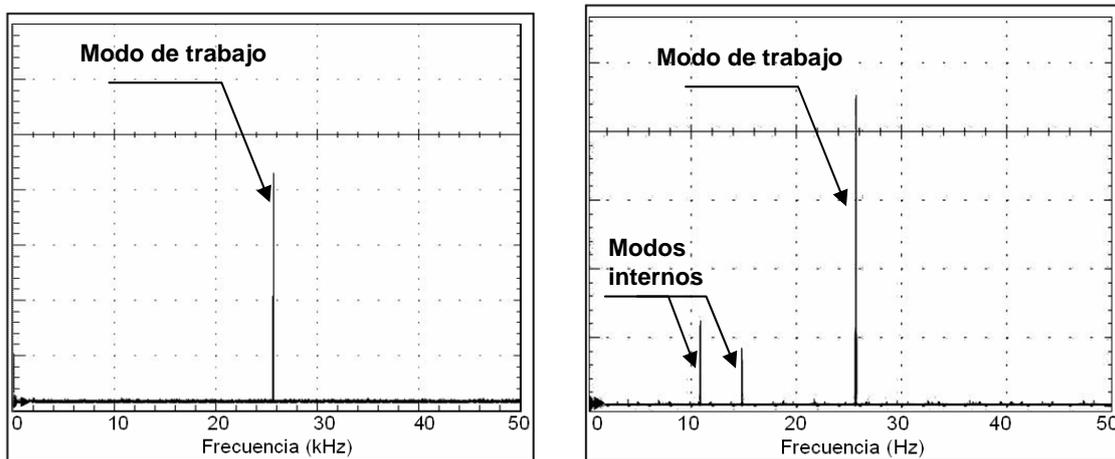


Fig. [7].- Espectros de velocidad del transductor de placa excitado con una tensión sinusoidal de 300 V: (a) respuesta en “single mode”, (b) respuesta multimodal

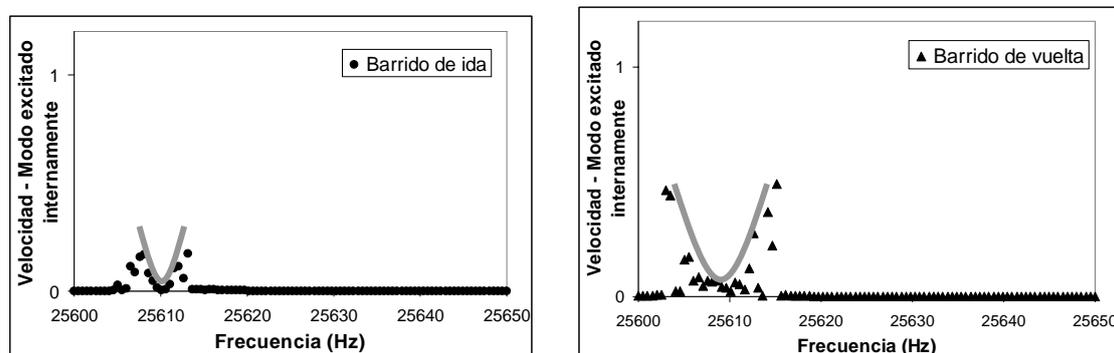


Fig. [8].- Curvas normalizadas de la velocidad del transductor de placa en un modo de vibración excitado internamente mediante barridos bidireccionales alrededor de la frecuencia nominal del transductor de placa: (a) tensión de excitación de 10 V, (b) tensión de excitación de 300 V

La Figura 8 representa las curvas normalizadas de la respuesta mecánica asociada a uno de los dos modos internos del transductor de placa excitados mediante barridos bidireccionales de frecuencia en el rango 25600-25650 Hz. Se infiere que para frecuencias de excitación contenidas en la región marcada por “V” en las figuras 5b y 6b, el modo interno del sistema

ultrasónico responde siguiendo las curvas en forma de “U” evidenciadas en las figuras 8a y 8b. Para frecuencias menores o mayores a tal región de interacción modal la respuesta del modo interno es nula, y el sistema vibra únicamente en el modo de resonancia externamente excitado. Finalmente, se puede observar que el modo internamente excitado es de mayor intensidad durante el barrido de vuelta (Figura 8b). A partir de las figuras 7 y 8 se puede ver como los modos no deseados extraen energía del modo principal, reduciendo su amplitud de vibración y, consecuentemente, la capacidad de potencia del dispositivo.

Las respuestas modales no lineales del transductor de placa obtenida experimentalmente son cualitativamente parecidas a las que se han obtenido precedentemente en modelos teóricos de sistemas autoparamétricos [13].

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

El fenómeno de transferencia de energía entre modos es muy común en sistemas ultrasónicos que trabajan en resonancia, y eso ocurre con más facilidad en los dispositivos multicomponentes que son, en general, sistemas de alta densidad modal [11, 12]. En los transductores ultrasónicos de placa, que aprovechan distintas formas de vibración y poseen una estructura sofisticada, los problemas de dinámica no lineal pueden tener una especial incidencia.

En este trabajo una interacción modal de tipo autoparamétrico entre el modo de trabajo de un emisor acústico para desespumación con placa circular, y dos modos cuyas frecuencias sumadas igualan a aquella del modo de trabajo ha sido detectado y caracterizada experimentalmente. Actualmente se necesitan métodos apropiados para el diseño de transductores ultrasónicos que puedan operar a alta potencia sin que se produzcan transferencias significativas de energía entre los modos.

Una estrategia para mitigar los efectos de las interacciones modales reside en el evitar que las frecuencias modales no deseadas se presenten cerca de relaciones enteras de la frecuencia de trabajo mediante alteraciones geométricas adecuadas de los dispositivos. Una manera más elegante para solucionar/controlar problemas de no linealidad de los dispositivos ultrasónicos de potencia consiste en el desarrollar una electrónica de control adaptable capaz de detectar piezoelectricamente, o mediante otros tipos de sensores, las respuestas multimodales de los transductores y subsecuentemente manipular la señal de excitación para eliminar la manifestación de los modos no deseados. Un proyecto de investigación en esta dirección se está llevando a cabo actualmente por parte del Grupo de Ultrasonido de Potencia del CSIC [14].

Indiscutiblemente, para avanzar en el diseño de equipos ultrasónicos eficientes es crítico detectar sus características dinámicas de potencia. El sistema de excitación y caracterización de dispositivos ultrasónicos resonantes desarrollados para la investigación aquí reseñada constituye una etapa significativa de cara a alcanzar este conocimiento.

AGRADECIMIENTOS

PUSONICS agradece la financiación por parte de MICNN de España a través del Subprograma Torres Quevedo, proyecto PTQ-09-02-01769.

REFERENCIAS

- [1] Gallego-Juarez, J. A., Rodríguez-Corral, G., Acosta-Aparicio, V. M., Riera, E., J. A., ‘Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing’ *Ultrasonics Sonochemistry* vol. 17, 6, Pages 953-964, 2010.

- [2] Patist, A., Bates, D., 'Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production', *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 9, pp. 147-154, 2008.
- [3] Gallego-Juarez, J. A., Rodriguez-Corral, G., San Emeterio Prieto, J. L., Montoya Vitini, F., 'Electroacoustic unit for generating high sonic and ultra-sonic intensities in gases and interphases', US Patent no.: 5,299,175, Assignee: CSIC, 29-03-1994.
- [4] Riera, E., Gallego-Juarez, J. A., Mason T. 'Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams', *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 13, pp. 192-196, 1992.
- [5] Rodriguez-Corral, G., San Emeterio, J.L., Gallego-Juarez, J. A. 'Focused high power ultrasonic transducer with stepped-plate radiator for industrial applications in gases' in Proceedings of the Ultrasonics International Conference, Butterworth Co. Ltd, pp. 794-799, 1987.
- [6] Cardoni, A., Riera, E., Blanco-Blanco, A., Gallego-Juarez, J. A., Acosta-Aparicio, V. M., 'On the nonlinear dynamics of plate-transducers', 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, Rome, September 2009.
- [7] Gallego-Juárez, J. A., Riera, E., Acosta-Aparicio, V. M., 'Modal interactions in high-power ultrasonic processing transducers', AIP Conference Proceedings (18th International Symposium on Nonlinear Acoustics,) Melville, New York, pp. 595-604, 2008.
- [8] San Emeterio, J.L., Gallego-Juarez, J.A., Rodriguez-Corral, G. 'High axisymmetric modes of vibration of stepped circular plates', *Journal of Sound and vibration*, vol. 14, 3, pp. 495-505, 1987.
- [9] www.pusonics.es
- [10] Aurelle, N., Guyomar, D., Richard C., Gonnard, P., Eyraud, L., 'Nonlinear behaviour of an ultrasonic transducer', *Ultrasonics*, vol. 34, pp. 187-191, 1996.
- [11] Lucas, M., Cardoni, A., Cartmell, M.P., Lim, F.C.N., 'Controlling the effects of modal interactions in ultrasonic cutting devices', Proceedings of the World Congress on Ultrasonics, Paris, pp. 49-56, September 2003.
- [12] Cardoni, A., 'Characterising the dynamic response of ultrasonic cutting devices', PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Glasgow (UK), 2004.
- [13] Cartmell, M. P., 'Introduction to Linear, Parametric and Non-Linear Vibrations', Chapman and Hall (London and New York), 1990.
- [14] Arroyo, D., Blanco, A., Riera, E., Cardoni, A., 'Metodología para la caracterización del comportamiento no lineal de una familia de transductores de ultrasonidos de potencia', *Tecniacústica*, 41º Congreso Nacional de Acústica, 6º Congreso Ibérico de Acústica, León, 13-15 Octubre, 2010.