

MEJORA DEL COMPORTAMIENTO VIBRATORIO NO LINEAL DE TRANSDUCTORES ULTRASONICOS PIEZOELECTRICOS AL TRABAJAR CON POTENCIA

A. Cardoni¹ y E. Riera²

¹Pusonics S. L., Pico Mulhacen, 34, E28500-Arganda del Rey, Madrid, España, Tel.: +34 91 8706882. E-mail: a.cardoni@pusonics.es

²Grupo de Ultrasonidos de Potencia, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), Serrano 144, E28006-Madrid, España, Tel.:+34 91 5618806. E-mail: enrique.riera@csic.es

Resumen

Los ultrasonidos de potencia son una tecnología emergente que aprovecha las ondas ultrasónicas de elevada intensidad para producir diferentes efectos permanentes sobre el medio tratado en aplicaciones industriales y médicas. Los transductores ultrasónicos de potencia son sistemas dinámicos formados por uno o varios componentes sintonizados que normalmente muestran un comportamiento típicamente no lineal. Este comportamiento puede ser la causa de perturbaciones, inestabilidades e ineficiencias en el sistema lo que dificulta el escalamiento de los transductores a escala industrial. Las no linealidades detectadas en el comportamiento vibratorio de los dispositivos ultrasónicos tienen su origen en las características no lineales de las cerámicas piezoeléctricas utilizadas para convertir la energía eléctrica de excitación de los sistemas en oscilaciones o vibraciones mecánicas. Por lo que sabemos hasta ahora, aparte del último trabajo llevado a cabo por los autores, no se ha encontrado ningún trabajo previo en la literatura relacionado con el rediseño de estos sistemas para mejorar la respuesta dinámica de los transductores ultrasónicos de potencia.

Los autores han desarrollado un método experimental para separar el efecto térmico de la respuesta dinámica no lineal de los transductores piezoeléctricos, que generalmente se manifiesta alrededor de su frecuencia de resonancia. Este método está basado en la excitación eléctrica de los transductores mediante ráfagas. El método fue utilizado para investigar el efecto de la posición de las cerámicas piezoeléctricas sobre la respuesta característica tipo “softening” de los transductores de potencia.

Este trabajo trata de mejorar el comportamiento vibratorio de transductores multicomponente de elevado Q para aplicaciones en medios gaseosos. Se estudiarán configuraciones óptimas de transductores tipo Langevin para proporcionar soluciones al diseño encaminadas a disminuir el comportamiento no lineal de estos sistemas sintonizados, y como resultado, permitir su escalamiento para propósitos industriales.

Palabras-clave: transductores ultrasónicos de potencia, vibraciones no-lineales, sistemas dinámicos

Abstract

Power ultrasound is an emerging technology which exploits piezo-electrically generated waves of high intensity to produce and/or assist different industrial and medical applications. Power ultrasonic transducers are dynamic systems made up of one or several tuned components, which typically shows an inherent nonlinear behaviour. Such a behaviour, may be the cause of disturbances, instabilities and system inefficiencies that jeopardize the scalability of tuned transducers at industrial level. The nonlinearities detected in the vibration behaviour of the ultrasonic devices have their origin in the

nonlinear characteristics of the piezoelectric ceramics used to convert the electrical driving energy applied to the tuned assemblies in mechanical oscillations. As far as we know, apart from late work by the authors, no previous research has been found in the literature in alternative designs to enhance the dynamics of power ultrasonic transducers.

The authors have developed an experimental method to separate thermal contributions from the nonlinear dynamic responses of piezoelectric ultrasonic transducers, usually exhibited around tuned resonant frequencies. This method is based on the use of a burst type excitation signal to drive the transducers. The method was employed to investigate the effect of the positioning of the piezoelectric ceramics on the softening response characteristic of power transducers.

This work deals with the enhancement of the vibration behaviour of high Q multi-component resonant ultrasonic transducers used for airborne applications. Optimal configurations of Langevin piezoelectric transducers will be studied to provide design solutions capable of diminishing the nonlinear behaviour of tuned systems, and as a result, allowing their scale-up for industrial purposes

Keywords: power ultrasonic transducers, nonlinear vibrations, dynamic systems.

PACS no. 43.25.Ts, 43.25.Zx, 43.40.Ga

1 Introducción

Los ultrasonidos de potencia (UdP) son considerados hoy en día una tecnología emergente con un gran potencial que ofrece notables ventajas en aquellos procesos donde se necesita una energía limpia no contaminante. La aplicación de los UdP en procesos se basa en la explotación de los efectos no lineales producidos durante la propagación de ondas de elevada amplitud a través de un medio tales como: las variaciones de presión, la cavitación, el calor, la agitación, las turbulencias, el viento acústico, la rotura mecánica, las inestabilidades en las interfases, la fricción, etc. Estos efectos pueden utilizarse para mejorar una amplia gama de procesos, tales como la desespumación, el secado, la deshidratación, la extracción, la aglomeración de partículas en aerosoles, y el corte, el mecanizado de piezas y la soldadura en sólidos [1-4]. Estos procesos requieren del desarrollo de transductores específicos para la generación de ondas ultrasónicas de elevada intensidad.

En la actualidad, la mayoría de los transductores ultrasónicos son dispositivos multicapa en los que la parte activa o corazón de transductor esta formado por un conjunto de pares de cerámicas piezoeléctricas. Otros componentes pasivos complementan la estructura del transductor para mejorar la energía transferida al medio estando constituidos dichos elementos por aleaciones metálicas. Estos dispositivos son sistemas dinámicos formados por una o varias componentes sintonizadas (tales como los transductores de placa escalonada para aplicaciones en gases), las cuales exhiben un comportamiento no lineal al trabajar con potencia. Este comportamiento puede diferir significativamente de la respuesta vibracional lineal predicha mediante el análisis por elementos finitos o las obtenidas experimentalmente al excitar a baja potencia. La aparición de armónicos, ultra-armónicos, pares de frecuencias, combinación de resonancias, modulaciones de frecuencia, saturación de la respuesta etc., junto con la aparición de un número de modos naturales no sintonizados en las repuestas hacen que la dinámica de los transductores al trabajar con potencia sea muy complicada [5,6]. Estas interacciones dan lugar a intercambio de energía entre modos que pueden generar vibraciones de gran amplitud en modos de la estructura no sintonizados causando problemas de calentamiento, ruido e incluso fallos en sus componentes [5,7-9].

Algunos estudios preliminares han demostrado que las vibraciones no lineales detectadas al estudiar el comportamiento vibracional de los dispositivos ultrasónicos de potencia tienen su origen en varios

efectos no lineales observados en los materiales piezoeléctricos. De hecho al excitar los transductores con altos voltajes eléctricos, se alcanza el umbral del dominio no lineal de los elementos PZT. Como resultado, los efectos no lineales tales como el desplazamiento de la frecuencia de resonancia hacia valores de frecuencia mas bajos y los fenómenos de histéresis se observan en la respuesta sintonizada junto con las distorsiones en la corriente y en la velocidad de vibración, de lo que resulta un efecto de saturación en la amplitud [10-12]. Se supone que el cambio en las características piezoeléctricas tales como la compliancia es causada por las tensiones dinámicas producidas en los materiales PZT al ser excitados con elevados niveles de amplitud de vibración y el calor generado por las pérdidas internas. El calentamiento de la PZT puede causar cambios de temperatura que dan lugar a una aparente no linealidad en los transductores, incluso en casos en que no exista [13,16-17]. Para evitar este problema, los autores han desarrollado un método para separar la contribución térmica de la respuesta dinámica no lineal de los transductores ultrasónicos piezoeléctricos exhibidos alrededor de las frecuencias de resonancia [6,10]. Este procedimiento fue empleado en este trabajo para investigar el efecto de la posición de las cerámicas piezoeléctricas en el transductor sobre sus respuestas características.

2 Estructura del transductor de potencia

Los transductores ultrasónicos de placa escalonada representan un diseño novedoso para la generación eficiente de la energía acústica en gases y medios multifásicos. La aparición de este nuevo tipo de transductores ha permitido la implementación a escala semi-industrial e industrial de nuevas aplicaciones. Este tipo de transductores piezoeléctricos desarrollado por el Grupo de Ultrasonidos de Potencia (GUP) del CSIC ha sido transferido recientemente a una empresa de base tecnológica (spin-off) Pusonics S.L. para su comercialización. La estructura básica de estos transductores se muestra en la Figura 1. Consta de un elemento de transducción tipo Langevin en una configuración tipo sándwich y un “horn” que actúa como amplificador mecánico. Este conjunto vibra extensionalmente excitando un radiador de placa escalonada el cual vibra flexionalmente en uno de sus modos flexionales propios.

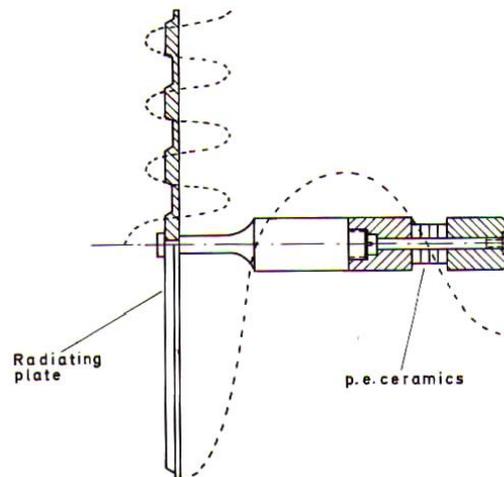


Figura 1. Transductor de placa escalonada para aplicaciones en gases

El transductor Langevin es una estructura resonante a media longitud de onda, la cual, en su versión mas sencilla consta de un disco cerámico, o pares de discos de cerámicas piezoeléctricas intercalados entre dos bloques metálicos idénticos. Cuando se usan en pares, las cerámicas piezoeléctricas están montadas y conectadas en paralelo con su eje de polarización en direcciones opuestas y separadas por

un electrodo conectado al cable de alto voltaje. Normalmente el electrodo se coloca en el nodo de vibración.

En este trabajo, se diseñaron por FEM y se montaron cuatro transductores piezoeléctricos de longitud igual a media longitud de onda. Se construyeron dos tipos de configuraciones de transductores, una formada con un conjunto de dos anillos piezoeléctricos PZT-802 (Morgan Electroceramics, Southampton, U.K.) (conjunto I) y dos cilindros de acero inoxidable (AISI-420), mientras que los otros dos transductores incorporan cuatro anillos piezoeléctricos (conjunto II) del mismo tipo que los usados en el conjunto I entre los cilindros de acero inoxidable (ver Figura 2). El procedimiento más común es colocar el conjunto de anillos cerámicos PZT en la sección central del transductor en la posición del nodo del modo de vibración longitudinal excitado en el dispositivo. En este trabajo se ha investigado el impacto de los posicionamientos alternativos de las cerámicas piezoeléctricas sobre la respuesta “softening” característica de los transductores. Los prototipos que se investigaron fueron sintonizados para vibrar en su primer modo longitudinal a frecuencias de resonancia entre 22 kHz y 27 kHz.

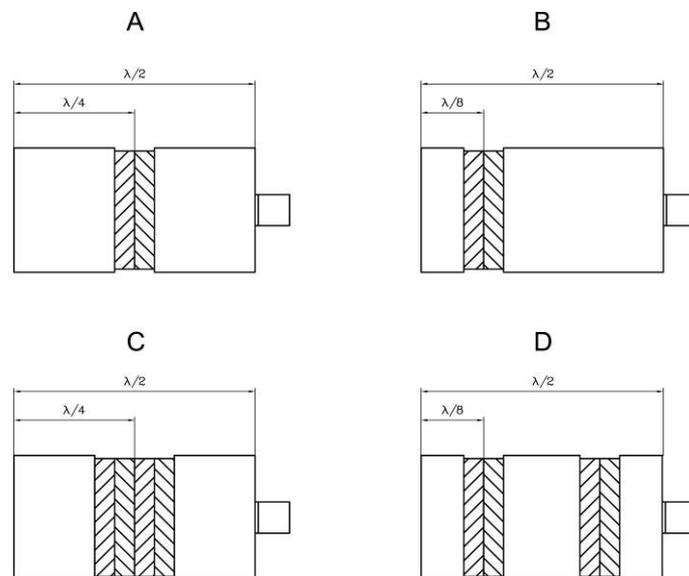


Figura 2. Prototipos de transductores ultrasónicos tipo sándwich con la misma longitud total:
A) 24.7 kHz, B) 26.9 kHz, C) 22.5 kHz y D) 24.7 kHz

3 Método experimental para la medida de respuesta con potencia

Es bien conocido que el comportamiento vibracional de dispositivos ultrasónicos al ser excitados con altos voltajes eléctricos puede ser caracterizado por fenómenos sorprendentes que no pueden predecirse por el método de elementos finitos (FEM) o detectado en pruebas a baja tensión cuando se utiliza un analizador de impedancia. Como se ha mencionado anteriormente, no linealidades tales como la saturación del modo de operación y el desplazamiento de la frecuencia de resonancia hacia valores más bajos son debidos fundamentalmente a la compliancia no lineal de los elementos PZT [11,13]. Además, los incrementos térmicos que tienen lugar en las piezocerámicas debidos a las pérdidas dieléctricas, mecánicas y piezoeléctricas se suman a las características no lineales de los dispositivos [13]. Más recientemente, se ha demostrado que las uniones que conectan las componentes sintonizadas de un montaje ultrasónico son también responsables de los comportamientos no lineales

[20]. Con el fin de separar la respuesta no lineal característica de los sistemas de potencia causados por las no linealidades elásticas y aquellos contenidos en el calentamiento de las PZT, los autores han desarrollado un procedimiento experimental para eliminar las contribuciones térmicas de las respuestas dinámicas no lineales en los transductores ultrasónicos piezoeléctricos al ser excitados mediante ráfagas discontinuas.

La descripción del montaje experimental desarrollado para los ensayos de vibración de transductores ultrasónicos al trabajar con potencia fue descrita en detalle en una publicación anterior [21,22]. A fin de medir la respuesta de vibración característica de los transductores de potencia investigados, estos fueron excitados alrededor de la frecuencia de su primer modo longitudinal con voltajes crecientes. Las pruebas se llevaron a cabo aplicando ráfagas al conjunto de cerámicas (I y II). Se aplicó un número fijo de ciclos a cada frecuencia seleccionada dentro del rango de excitación predefinido. El número de ciclos se eligió lo suficientemente grande como para alcanzar la respuesta del estado estacionario pero lo suficientemente corto para limitar el calentamiento de los elementos piezoeléctricos. Para asegurar que no hay efecto térmico, se incluyó un tiempo de retardo entre ráfagas en cada barrido de frecuencia. De esta manera se asegura que cualquier ligero aumento de temperatura se disipe antes de la medida de la respuesta correspondiente a la frecuencia del punto siguiente. Esta técnica requiere realizar tanto de barridos ascendentes como descendentes de la frecuencia de excitación para asegurar que las respuestas sintonizadas con potencia podían ser medidas y almacenadas cuando se producen en las regiones de histéresis.

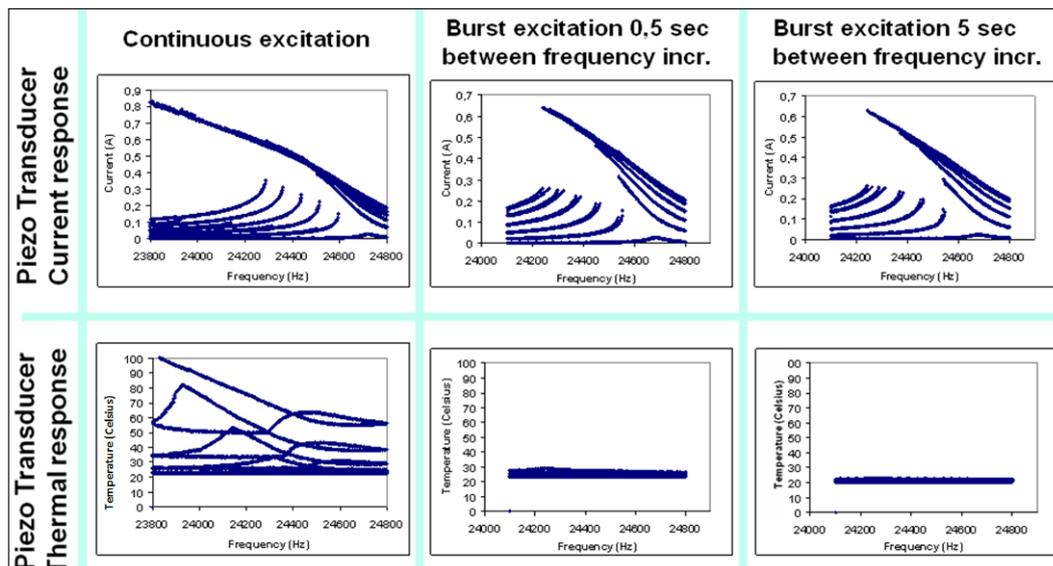


Figura 3. Efecto de la excitación sobre la respuesta del transductor ultrasónico (RTUS)

Para las pruebas se excitó a cada transductor ultrasónico mediante una señal generada por un generador de funciones (Agilent 3322A), la cual fue magnificada por un amplificador de potencia (QSC Audio RMX 4050HD), mientras que la respuesta en velocidad del transductor se midió con un vibrómetro láser de barrido 1D (Polytec PSV-100). Para medir la temperatura superficial de los conjuntos de cerámicas (I y II) se utilizó un sensor de infrarrojos. Para la adquisición de las señales eléctricas (V, I) muestreadas en bornes del transductor, de la señal de temperatura (T) en las cerámicas y de la señal de la velocidad de vibración (ξ) en la masa radiante del transductor se utilizó un hardware de adquisición de datos de National Instruments y una interface en combinación con el software de Labview. Se estableció así el protocolo experimental de adquisición y tratamiento de datos utilizado

en este trabajo. Finalmente, se utilizó un osciloscopio Tektronic (DPO 7054) para ver y almacenar las respuestas de corriente y de voltaje, y el espectro de frecuencia de la respuesta de velocidad.

La Figura 3 muestra el efecto de la excitación sobre la distribución de la temperatura en las cerámicas PZT en el transductor prototipo-A (ver Figura 2A) dibujada en función de la excitación cuando se aplica onda continua y ráfagas con tiempos de retardo de 0.5 s y 5 s, respectivamente. Se puede observar que cuando se aplicó onda continua la temperatura en la PZT aumentó hasta 100 °C, mientras que cuando se usó excitación mediante ráfagas con tiempos de retardo de 0.5 s y 5 s entre ráfagas, la temperatura en las PZT solo aumentaron hasta 29 °C y 22 °C, respectivamente. En la figura se ha incluido también el efecto de la excitación en la respuesta de corriente característica del transductor (RTUS) utilizando el método de ráfagas descrito anteriormente.

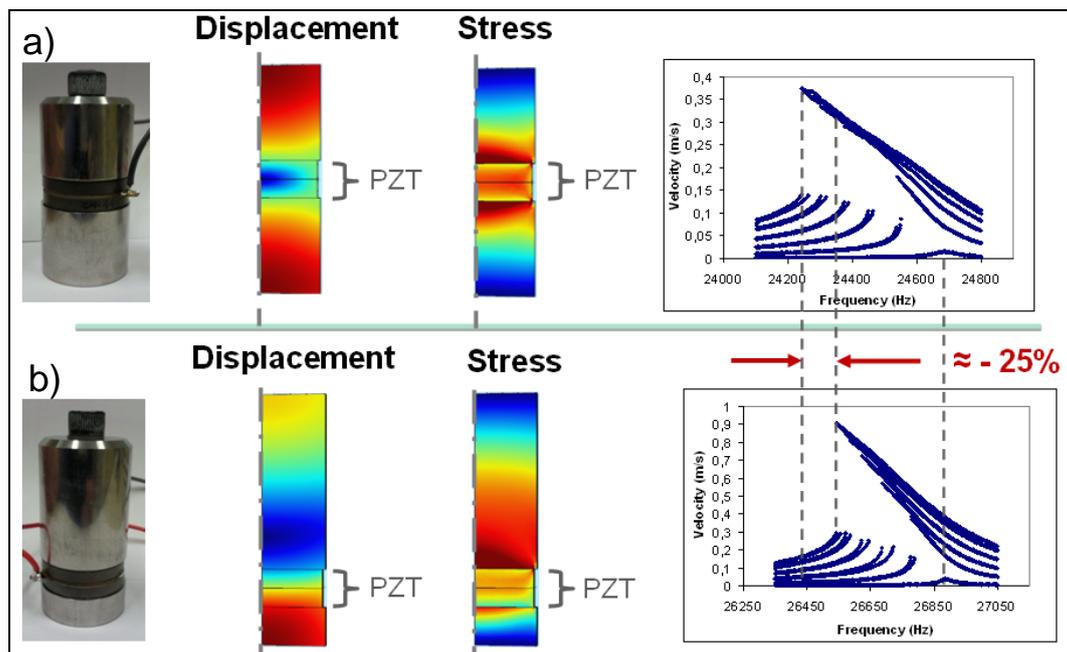


Figura 4. Efecto de la posición de PZT (conjunto I – dos cerámicas) en la RTUS

4 Mitigación de la respuesta no lineal

En la Figura 4 se muestran los prototipos de transductor que incorporan dos discos piezoeléctricos (conjunto I) situados en el centro y a una distancia de un octavo de la longitud de onda de la cara radiante del transductor. En la misma figura se incluyen además las predicciones obtenidas mediante FEM de las distribuciones de desplazamiento y tensión mecánica calculadas junto con la respuesta modal medida con excitaciones crecientes. Para reducir el tiempo de cálculo se modeló la mitad del transductor aplicando condiciones de simetría. Se excitaron los prototipos A y B a lo largo de un rango de frecuencia de 700 Hz aplicando excitación bidireccional mediante ráfagas con voltajes crecientes. Se seleccionaron niveles de voltaje crecientes entre 1 V y 50 V, con incrementos de 10 V. Se aplicaron tiempos de retardo entre ráfagas de 0.5 s para evitar aumento de temperatura. Se midió la respuesta modal característica alrededor de la frecuencia de resonancia apuntando con el vibrómetro láser sobre la cara radiante del transductor. Se puede observar que al mover las cerámicas desde el centro hacia la superficie radiante se obtuvo una reducción del 25% en el desplazamiento de la frecuencia de resonancia. Para explicar este hecho, se debe recurrir a las predicciones de la distribución de la tensión

mecánica obtenida para las configuraciones de ambos transductores. Al mirar a la Figura 4(a) puede observarse que la máxima tensión ocurre en la localización del nodo en donde están situadas las dos cerámicas. Por otro lado, al observar la predicción de la tensión mecánica en la Figura 4(b), puede apreciarse que al desplazar las cerámicas desde el centro, sacamos las cerámicas fuera de la zona de máxima tensión. Se sabe que la dependencia de la no linealidad de la compliancia con el nivel de tensión es mucho mas pronunciado en PZT que en los metales, por tanto, al situar las PZT en la sección de máxima tensión en el transductor resulta un comportamiento no lineal mayor caracterizado por una histéresis mas ancha y una saturación de la respuesta mayor como se aprecia en la Figura 4(a).

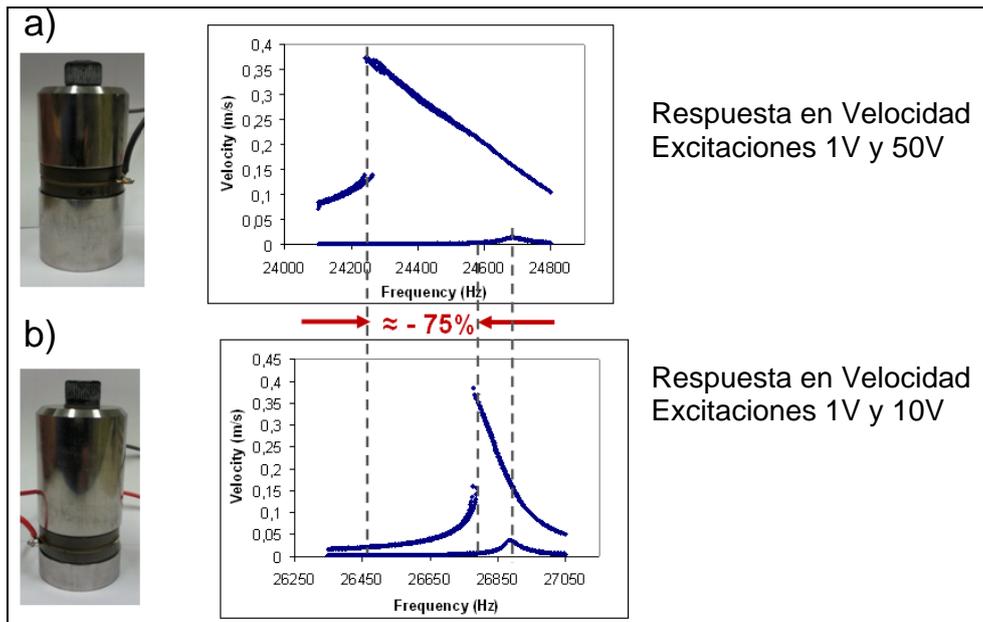


Figura 5. Efecto de la posición de PZT (conjunto I – dos cerámicas) en la RTUS

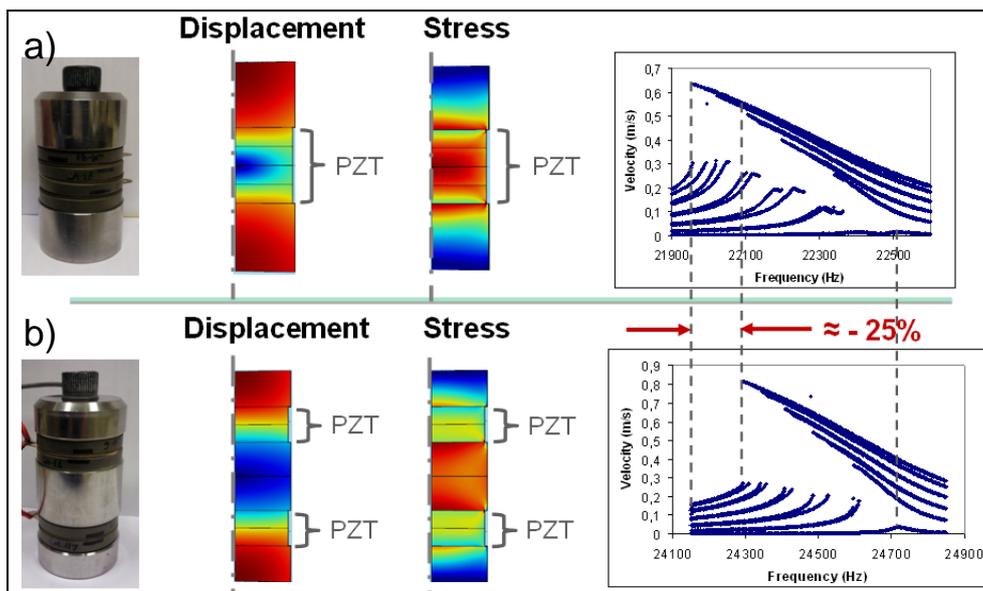


Figura 6. Efecto de la posición de PZT (conjunto II – cuatro cerámicas) en la RTUS

La Figura 5(a) revela que al aplicar una excitación de 50 V al transductor con las PZT en el centro resulta la misma respuesta de velocidad que la obtenida cuando aplicamos 10 V de excitación a la configuración de la Figura 5(b) con las PZT desplazadas. Esto quiere decir que se ha reducido en un 75% el desplazamiento de la frecuencia de resonancia respecto a la configuración de la Figura 5(a).

En la Figura 6 se muestra la diferencia en las respuestas no lineales medidas en las dos configuraciones del transductor que incorporan cuatro anillos cerámicos (conjunto II). En la Figura 6(a) se muestran las predicciones de la tensión mecánica y del desplazamiento, y la medida de la respuesta del transductor con cuatro anillos PZT situados en su centro. Como antes, las respuestas en frecuencia fueron medidas usando el vibrómetro láser, y se obtuvieron aplicando desplazamientos bidireccionales de la frecuencia de la señal de excitación para niveles de voltaje crecientes. Se obtuvo una reducción del 25% en el desplazamiento de la frecuencia de resonancia en la configuración alternativa del transductor que incorpora dos conjuntos de dos anillos cerámicos a una distancia de un octavo de longitud de onda desde ambas caras del transductor.

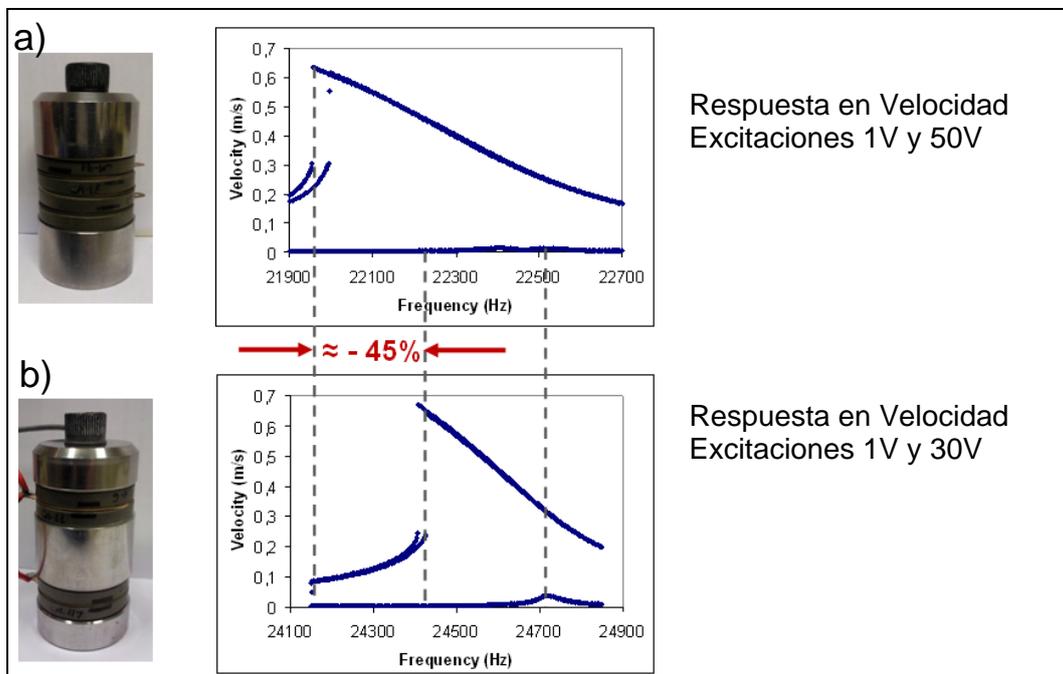


Figura 7. Efecto de la posición de PZT (conjunto II – cuatro cerámicas) en la RTUS

En la Figura 7 se muestra que cuando se aplica una excitación de 30 V al transductor con dos conjuntos de dos PZT separados resulta la misma respuesta que la obtenida en la configuración con las cuatro PZT colocadas en el centro del transductor al ser excitadas con 50 V. Esta observación implica que se obtiene una mitigación del 45% de la no linealidad mediante el adecuado reposicionamiento de las PZT.

5 Conclusiones

En este trabajo se ha investigado el efecto de la posición de los elementos cerámicos utilizados en los transductores ultrasónicos de potencia en su respuesta no lineal característica. Para llevar a cabo este estudio se adoptó un método experimental para eliminar el efecto térmico en la respuesta de los

transductores basado en su excitación mediante ráfagas. Los experimentos mostraron que es posible mitigar la respuesta no lineal característica al trabajar con potencia al desplazar las PZT desde las secciones de mayor tensión mecánica. De hecho se ha demostrado experimentalmente que desplazar los elementos PZT desde la región central de transductores que vibran longitudinalmente, reduce la no linealidad elástica de las piezocerámicas y por tanto permite mitigar su respuesta no lineal.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el proyecto DPI2009-14549-C04-01 del Ministerio Español de Ciencia e Innovación (MICINN). Damos las gracias a Alberto Pinto e Ignacio Martínez por su contribución a los trabajos experimentales.

Referencias

- [1] Gallego-Juárez, J.A., *High power ultrasonic transducers* in Sonochemistry and Sonoluminescence, in: Crum, L.A., Mason, T.J., Reisse, J.L., Suslick, K.S. (Eds.), Kluwer Academic Publishers., Dordrecht, Holland, NATO ASI Series, 259-270. Series C: Vol. 524 (1999).
- [2] Riera, E., Gallego-Juárez, J.A., Mason, T., Airborne ultrasound for the precipitation of smokes and powders and the destruction of foams, *Ultrasonics Sonochemistry*, **13** 107-116 (2006).
- [3] Mathieson, A.C.; Nonlinear characterization of power ultrasonic devices used in bone surgery, Ph.D. Dissertation, University of Glasgow (2011).
- [4] Gallego-Juárez, J.A., Rodriguez, G., Acosta, V., Riera, E., Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing, *Ultrasonics Sonochemistry*, **17**, 953-964 (2010).
- [5] Gallego-Juárez, J.A., Riera, E., Acosta-Aparicio, V.M., Modal interactions in high-power ultrasonic processing transducers, *AIP Proceedings 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics*, 595-604, Stockholm, Sweden, 7-10 July (2008).
- [6] Cardoni, A., Riera, E., Blanco, A., Gallego-Juárez, J.A., Acosta, V., On the nonlinear dynamics of plate-transducers, *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Rome, Italy, 20-23 September, (2009).
- [7] Nayfeh, S.A., Nayfeh, A.H., Energy transfer from high to low frequency modes in a flexible structure via modulation, *J. Vibrat. Acoust.* **116**, 203-207 (1994).
- [8] Cardoni, A., Lucas, M., Enhanced vibration performance of ultrasonic block horns, *Ultrasonics* **40**, 365-369 (2002).
- [9] Lucas, M., Cardoni, A., Cartmell, M.P., Lim, C.N., Controlling the effects of modal interactions in ultrasonic cutting devices, *Proceedings World Congress on Ultrasonics WCU2003*, Paris, France, 7-10 September, 49-56 (2003).
- [10] Guyomar, D., Aurelle, N., Richard, C., Gonnard, P., Eyraud, L., Non linearities in Langevin transducers, *1994 IEEE Ultrasonics Symposium: Proceedings*, Cannes, France, 1-4 November, 925-928 (1994).
- [11] Aurelle, N., Guyomar, D., Richard, C., Gonnard, P., Eyraud, L., Nonlinear behavior of an ultrasonic transducer, *Ultrasonics* **34**, 187-191 (1996).
- [12] Guyomar, D., Ducharme, B. Sebald, G., High nonlinearities in Langevin transducer: A comprehensive model, *Ultrasonics* **51**, 1006-1013 (2011).

- [13] Umeda, M.; Nakamura, K.; Ueha, S., Effects of vibration stress and temperature on the characteristics of piezoelectric ceramics under high vibration amplitude levels measured by electrical transient responses, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**, 5581-5585 (1999).
- [14] Chong, C.P., Che, W.P., Chan, H.L.W., Liu, P.C.K., Nonlinear behaviour of piezoceramics and piezocomposites, *Sensors and Actuators A* **116**, 320-328 (2004).
- [15] Mezheritsky, A.V.; Elastic, dielectric, and piezoelectric losses in piezoceramics: How it works all together, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **51** (6), 695-707 (2004).
- [16] Blackburn, J.F.; Cain, M.G., Non-linear piezoelectric resonance analysis using burst mode: a rigorous solution, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 227-233 (2007).
- [17] Uchino, K.; Zhuang, Y.; Ural, S.O., Loss determination methodology for a piezoelectric ceramic: New phenomenological theory and experimental proposals, *J. Advanced Dielectrics* **1** (1), 17-31 (2011).
- [18] Neppiras, E.A., The pre-stressed piezoelectric sandwich transducer, *Ultrasonics International Proceedings 1973*, 295-302 (1973).
- [19] Radmanovic, M.D., Mancic, D.D., Design and modelling of the power ultrasonic transducer. Le Locle, Switzerland: MP Interconsulting (2004).
- [20] Mathieson, A., Cardoni, A., Harkness, P., Lucas, M., Characterization of nonlinear behaviour of power ultrasonic drilling horn, *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Rome, Italy, 20-23 September, (2009).
- [21] Riera, E.; Cardoni, A.; Blanco, A.; Acosta, V.; Gallego-Juárez, J.; Characterising of nonlinear dynamics of power ultrasonic systems, *Proceedings 39th International Congress on Noise Control Engineering, Inter noise 2010*, 13-16 June 2010 Lisbon, Portugal.
- [22] Cardoni, A., Mathieson, A., Cerisola, N., Reducing the nonlinear behaviour of power ultrasonic transducers for bone surgery, *Proceedings 39th International Congress on Noise Control Engineering, Inter noise 2010*, 13-16 June 2010 Lisbon, Portugal.