

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO NO LINEAL DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS DE POTENCIA PARA EL PROCESADO DE ALIMENTOS

PACS: 43.25.Vt, 43.40.At, 43.40.Ga

E. Riera¹, A. Cardoni², V.M. Acosta¹, G. Rodríguez¹, J.A. Gallego-Juárez¹

¹ Grupo de Ultrasonidos de Potencia, CSIC,

Serrano 144, 28006 Madrid, España

E-mail: enrique.riera@csic.es; vacosta@ia.cetef.csic.es; grodriguez@ia.cetef.csic.es;

jgallego@ia.cetef.csic.es

² Pusonics S.L.

Pico Mulhacén 34, 28500 Arganda del Rey, Madrid, España

E-mail: a.cardoni@pusonics.es

ABSTRACT

One of the areas where the use of power ultrasound (PU) has undergone major development over the last two decades is food science and technology. Nowadays, PU is considered as one of the most promising emerging technologies in food industry together with high pressure processing, pulsed electric fields and ultraviolet radiation. This is because PU is considered as an environmentally friendly energy capable of reducing energy consumption in processes such as dehydration and extraction. To achieve this it is necessary to design, develop and validate efficient power ultrasonic systems, capable of working stably in continuous power conditions.

This paper presents the study of the nonlinear behaviour of a series of prototypes of power piezoelectric transducers developed to work at frequencies between 20 and 25 kHz. These prototypes have been designed and built with large radiating surfaces for application in food processing. We have characterized and identified nonlinear mechanisms that affect transducer behaviour, such as harmonic generation, combination of resonances, or modal interactions, and response saturation. Specifically, we have analyzed energy transfers between modes of the tuned systems as responsible for problems such as heating, noise and instabilities in the transducers.

RESUMEN

Uno de los campos en donde el uso de los ultrasonidos de potencia (UdP) ha experimentado un desarrollo más importante a lo largo de las dos últimas décadas es el de la ciencia y tecnología de alimentos. Hoy en día los UdP son considerados como una de las tecnologías emergentes con mayor potencial dentro de la industria agroalimentaria junto con el procesado a las altas presiones, los campos eléctricos pulsados y la radiación con luz ultravioleta. Ello se debe a que los UdP se consideran como una energía verde respetuosa con el medio ambiente capaz de reducir el consumo energético en procesos como por ejemplo la deshidratación y la extracción. Para conseguir este fin es necesario diseñar, desarrollar y validar sistemas ultrasónicos de potencia eficientes, estables y capaces de trabajar en continuo con alta potencia.

En este trabajo se presenta el estudio del comportamiento no lineal de una serie de prototipos de transductores piezoeléctricos de potencia desarrollados para trabajar a frecuencias comprendidas entre los 20 y los 25 kHz. Dichos prototipos han sido diseñados y construidos con superficie radiante extensa para su aplicación en el procesado de alimentos. Se han caracterizado e identificado los mecanismos no lineales que afectan al comportamiento del transductor tales como generación de armónicos, combinación de resonancias o interacción modal y saturación de la respuesta. Concretamente se han analizado los procesos de transferencia de energía entre modos del sistema como responsables de problemas de calentamiento, generación de ruido e inestabilidades en los transductores.

INTRODUCCION

Durante los últimos años se ha realizado un gran esfuerzo en el desarrollo de sistemas ultrasónicos de potencia a escala de laboratorio y a escala semi-industrial para su aplicación en medios fluidos multifásicos y en sólidos. Entre las aplicaciones se pueden mencionar las siguientes: aglomeración acústica de partículas de aerosoles, atomización, eliminación de burbujas en líquidos, lavado de textiles, deshidratación de materiales porosos, extracción de aceite de almendra y manteca de cacao, corte de materiales sólidos, etc. [1-6]. Como resultado de estos esfuerzos se han ampliado los campos de aplicación de los ultrasonidos de potencia a los sectores industriales, químicos, medioambientales, farmacéuticos y médicos. Aunque algunas de estas aplicaciones tienen un gran potencial, especialmente en procesos industriales, la presencia de la tecnología ultrasónica de potencia es aún limitada. Tal infrutilización se debe a la falta de transductores adecuados para operaciones a gran escala [7], y a la dificultad para controlar el comportamiento vibratorio de los transductores UdP [8].

El escalamiento de los UdP ha sido posible en algunos casos gracias a una nueva familia de generadores ultrasónicos de potencia con radiadores de superficie extensa [1,4]. Por otra parte, no se ha dispuesto hasta hace poco tiempo de una metodología para investigar del comportamiento no lineal de estos dispositivos ultrasónicos. Para ello se ha diseñado un procedimiento experimental para la caracterización dinámica de transductores piezoeléctricos al ser excitados con niveles de potencia elevados, como primera aproximación hacia el desarrollo de una herramienta para el control del comportamiento de todos los indicadores de los sistemas resonantes tales como el voltaje aplicado y la corriente generada, la amplitud de vibración, la temperatura del transductor, y la presión acústica producida [8-11].

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS VIRTUALES EN LABVIEW PARA LA CARACTERIZACIÓN CON POTENCIA DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS

Este trabajo se está realizando en base a la implementación de un dispositivo experimental en los laboratorios del Grupo de Ultrasonidos de Potencia (GUP) del CSIC (ver figura 1) y al desarrollo de un software específico basado en código LabView para la caracterización de transductores ultrasónicos con potencia. Durante el procedimiento de caracterización se mide su respuesta mecánica, eléctrica, térmica y acústica en términos de velocidad de vibración (ξ), corriente eléctrica (I), temperatura (T) y presión acústica (Pa). La velocidad de vibración se mide en un punto de la superficie vibrante exterior del transductor, próximo al borde de la superficie del radiador. Para ello se emplea un vibrómetro láser de barrido (Polytec PSV-100). La corriente eléctrica se mide en bordes del transductor, la temperatura en las cerámicas piezoeléctricas y/o en el punto de unión vibrador ultrasónico – radiador mediante un sensor de infrarrojo, y el campo acústico con un micrófono de 1/8" tipo condensador.

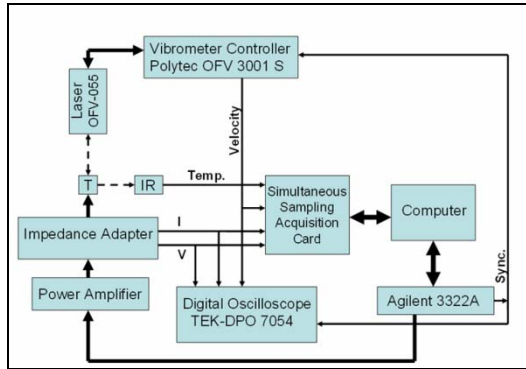


Figura 1. Diagrama del dispositivo experimental desarrollado para la caracterización con potencia de transductores ultrasónicos

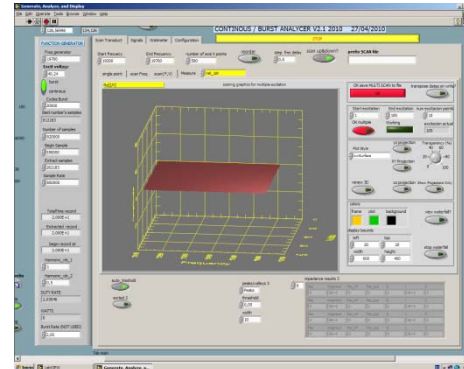


Figura 2. Vista de página de herramienta software desarrollada para la caracterización con potencia de transductores ultrasónicos

El dispositivo experimental mostrado en la figura 1 consta de las siguientes partes: un transductor ultrasónico de potencia, una unidad de adaptación de impedancias, un generador de potencia (Agilent 3322A y un amplificador de potencia), un conjunto de sondas, un sistema de adquisición de señales y un ordenador para la monitorización, control y análisis de las señales. El dispositivo permite la determinación simultánea del voltaje (V), corriente (I) y desfase (θ) entre ambas señales muestreadas a la salida de la unidad de adaptación de impedancias. Ambas señales son usadas para controlar la frecuencia e impedancia de la excitación. La unidad de adaptación de impedancias es específica para cada transductor con objeto de transferir la máxima energía desde el generador electrónico al transductor. Las representaciones en el dominio del tiempo - frecuencia de las señales muestreadas se visualizan en un Osciloscopio Tektronix (TEK-DPO-7054).

Para el estudio del comportamiento con potencia del transductor se han desarrollado una serie de herramientas software basadas en el código LabView tanto para la monitorización y control de los parámetros eléctricos de excitación como para analizar la respuesta del transductor. Estas herramientas permiten en la actualidad dos formas de excitación: una en onda continua y otra mediante ráfagas en la que el número de ciclos se establece dependiendo del factor de calidad Q del transductor ultrasónico bajo estudio. Esta opción junto con la posibilidad de variar el tiempo entre ráfagas facilita el análisis del comportamiento del transductor sin que se produzca calentamiento alguno en las cerámicas piezoeléctricas, es decir sin que esté presente el efecto de la temperatura en la medida. En la figura 2 se presenta a modo de ejemplo la página para la realización de barridos 2D en los que se varía tanto la frecuencia (f) como la voltaje de la señal de excitación (V). La herramienta software permite además programar barridos en frecuencia "Up and Down" (creciente y decreciente) para cada tensión eléctrica de excitación. De este modo puede determinarse si el comportamiento histerético del transductor debido principalmente a su parte piezoeléctrica es tipo "softening" o "hardening".

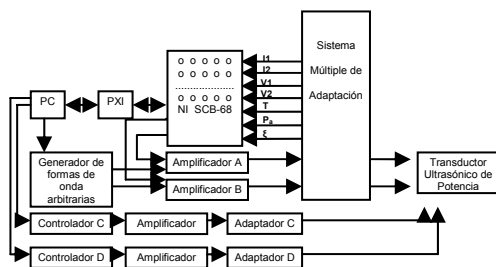


Figura 3. Nuevo sistema de análisis no lineal de transductores de potencia para mejora de procesos de transferencia de materia (en fase de desarrollo)



Figura 4. Vista del la parte de monitorización y control del nuevo sistema de análisis no lineal de transductores de potencia

Los transductores ultrasónicos que se están diseñando y desarrollando en el marco de este trabajo presentan un comportamiento no lineal. Se ha comprobado experimentalmente la existencia de componentes armónicas y subarmónicas, el desplazamiento de la frecuencia de resonancia, así como rutas hacia el caos. Evidencias que informan de un comportamiento que, en caso de no ser debidamente estudiado y controlado, puede comportar una degradación del sistema ultrasónico. Nuestro trabajo futuro consistirá en desarrollar una metodología para identificar el origen de las diversas no linealidades. Como primer paso de este objetivo se muestra en la figura 3 el esquema de un nuevo sistema de análisis no lineal de transductores ultrasónicos de potencia (actualmente en fase de desarrollo) más potente y versátil para la mejora de los procesos de transferencia de materia.

El sistema está constituido por un PC de control y dos tipos de excitación alternativos:

- a) generador de funciones programable (TEK-AFG3252 (2Gs/s), dos amplificadores de salida cuyas señales van a un sistema múltiple de adaptación y de allí a uno o dos transductores de potencia y,
- b) dos sistemas generadores de potencia constituidos por el conjunto controlador – amplificador – adaptador para excitar directamente uno o dos transductores.

En la figura 4 se presenta una imagen del conjunto: ordenador (con ocho procesadores y sistema operativo Windows XP/ SO Real Time), generador de formas de onda programable TEK-AFG3252 (2Gs/s), PXI constituido por bastidor PCI Express Gateway NI-PXIe-1073), tarjeta A/D y D/A con ocho canales de entrada y dos de salida (2Ms/s) y veinticuatro DIO (NI PXIe-6366), FPGA con A/D para procesado con lógica programable para elaborar matrices de coprocesadores (NI PXIe-7962R) y sistema multiconector SCB-68. El nuevo sistema de análisis experimental se encuentra en fase avanzada de realización a falta del montaje y pruebas del Sistema Múltiple de Adaptación. Una vez finalizado el sistema se procederá a su puesta a punto e instalación en los laboratorios del GUP.

COMPORTEAMIENTO DINÁMICO DE TRANSDUCTORES DE POTENCIA

Las figuras 5 y 6 muestran un transductor con radiador cilíndrico y un transductor de placa acanalada objeto de este estudio, junto con sus modos de resonancia vía modelado mediante FEM. Con objeto de medir las características de la respuesta vibracional de los transductores investigados, ambos fueron excitados cerca de su frecuencia de resonancia nominal con voltajes crecientes. La respuesta de cada transductor se obtuvo en términos de la velocidad de vibración utilizando el vibrómetro láser de barrido, y de la corriente que fluye a través de stack de piezocerámicas. La velocidad de vibración del radiador cilíndrico hueco se midió radialmente en un punto próximo a uno de los extremos del radiador, mientras que las oscilaciones ultrasónicas de la placa rectangular acanalada fueron detectadas en el punto de unión entre el lado corto y el lado largo del radiador, como se indica mediante flechas en las figuras.

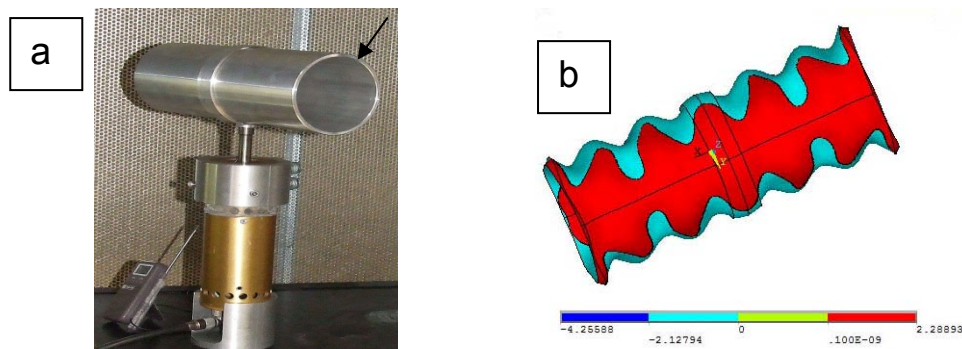


Figura 5. Transductor con radiador cilíndrico, a); y forma modal del radiador con 12 líneas nodales (NL) obtenido mediante FEM, b)

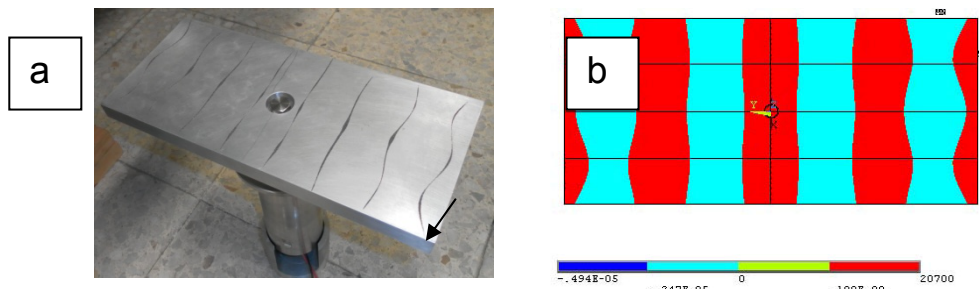


Figura 6. Transductor con radiador de placa acanalada, a); y forma modal del radiador con 8 líneas nodales (NL) obtenido mediante FEM, b)

Transductor con Radiador Cilíndrico

Se ha desarrollado un procedimiento de deshidratación basado en la radiación ultrasónica en aire combinada con un flujo de aire forzado utilizando el transductor con radiador cilíndrico como elemento de un secadero por lecho fluido. La energía ultrasónica en el aire facilita la eliminación del líquido (transferencia de materia) sin producir un calentamiento térmico en el interior de las muestras durante el proceso. Por ello, la aplicación de los UdP tanto en materiales sensibles al calor como en procesos de secado a baja temperatura presenta un gran potencial. El vibrador tiene dos componentes, un transductor piezoeléctrico que consta de un conjunto formado por cuatro cerámicas piezoeléctricas en estructura sandwich entre dos bloques metálicos y un amplificador mecánico de tipo escalón.

Inicialmente se estudió el vibrador ultrasónico por separado (sin estar acoplado al radiador cilíndrico) al excitarlo en un rango de frecuencia entre 0–50 kHz empleando una señal de excitación sinusoidal continua de baja tensión aplicada a las cerámicas. Las características de la respuesta vibracional del transductor se midieron en la punta usando el vibrómetro láser. La figura 7a muestra los tres primeros modos extensionales del vibrador detectados a 14885 Hz, 22668 Hz y 30270 Hz, respectivamente. A continuación se midieron las características de su respuesta dinámica (velocidad de vibración) en un rango de 400 Hz centrados en el modo de trabajo (22668 Hz) usando excitación mediante ráfagas. Por lo tanto, el vibrador fue excitado aplicando una señal sinusoidal para cada frecuencia del margen considerado con un número de ciclos suficiente para alcanzar colecciones de respuestas en el estado estacionario. El tiempo de retardo entre sucesivos incrementos de frecuencia fue de 0,5 segundos.

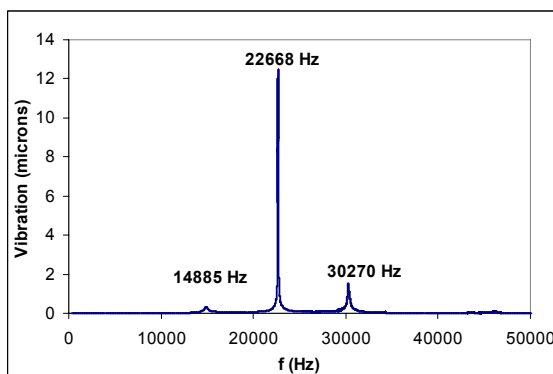


Figura 7a. Respuesta en velocidad del vibrador ultrasónico entre 250Hz y 50 kHz. Voltaje aplicado = 5V, paso en frecuencia = 1 Hz

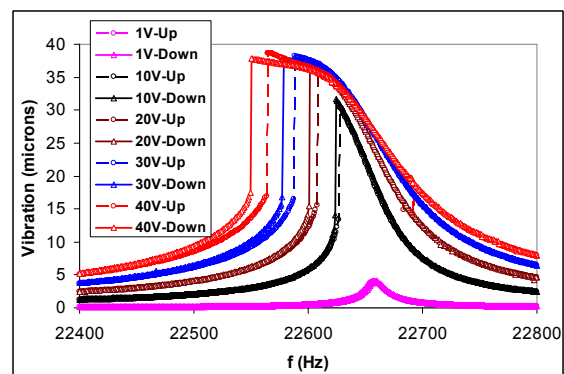


Figura 7b. Respuesta en velocidad del vibrador ultrasónico desde 22,4 kHz hasta 22,8 kHz con voltajes crecientes 1 – 40V; paso en frecuencia = 1 Hz ; tiempo de retardo = 0,5s

La figura 7b muestra las curvas de la velocidad de vibración en función de la frecuencia de excitación obtenidas vía barridos en frecuencia ascendentes y descendentes (Upward –

Downward) alrededor de la frecuencia de resonancia con voltajes crecientes. Las respuestas de vibración detectadas presentan un comportamiento tipo “softening” caracterizado por un decrecimiento de la frecuencia de resonancia y una saturación en amplitud, para niveles de voltaje crecientes. Es importante comentar que la excitación mediante ráfagas permitió eliminar casi totalmente el efecto térmico de las piezocerámicas a partir de sus respuestas dinámicas. Por tanto, puede decirse que dicho comportamiento no lineal está muy ligado a la no linealidad inherente de las PZT [12-13].

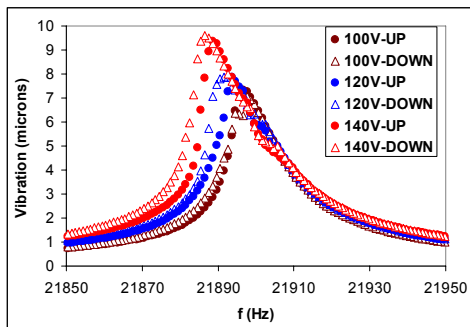


Figura 8a. Respuesta en velocidad del transductor desde 21,85 kHz hasta 21,95 kHz para incremento de 100V-140V; paso en frecuencia = 1 Hz; tiempo de retardo = 0,5s

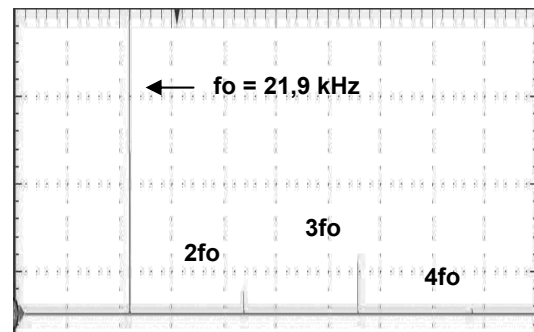


Figura 8b. Respuesta en velocidad del transductor con radiador cilíndrico excitado a 21,95 kHz (voltaje = 120V); margen de frecuencia 0-100 kHz

A continuación el vibrador ultrasónico y el radiador cilíndrico se montaron juntos y se estudió el comportamiento de todo el sistema con niveles de tensión crecientes entre 100 V y 140 V. En la figura 8a se confirma que la medida de la respuesta en velocidad del transductor presenta un comportamiento tipo “softening” Mientras el sistema fue excitado alrededor de su frecuencia de resonancia, las respuestas espectrales de la velocidad fueron monitorizadas en un margen de frecuencia de 0 – 100 kHz. La Figura 8b revela la respuesta espectral de la velocidad cuando se aplicaron 120 V al transductor a su frecuencia de trabajo de 21,9 kHz. Varios armónicos pueblan el espectro (2fo, 3fo y 4fo) sin que se produzca interacción modal alguna.

Transductor de Placa Acanalada

El comportamiento en el proceso de deshidratación ultrasónica de los transductores de placa acanalada colocados en contacto directo con productos sólidos porosos ha demostrado ser una alternativa atractiva para la separación/extracción del líquido en productos agroalimentarios. Una buena adaptación de impedancia entre la cara plana vibrante de la placa del transductor y el material incrementa notablemente la transferencia de energía radiada y consecuentemente acelera la cinética del proceso de deshidratación preservando la calidad de los productos. El transductor consta de una placa acanalada rectangular extensa excitada en su centro por un vibrador ultrasónico. La placa radiante vibra en un modo flexional con ocho líneas nodales (NL) paralelas a su lado corto.

El transductor fue diseñado para trabajar con una capacidad de potencia de 100 W. Las características de la respuesta vibracional del sistema fue medida en el borde de la placa utilizando el vibrómetro láser. La figura 9a muestra la respuesta en velocidad del transductor obtenida en torno a la frecuencia de resonancia con diferentes niveles de excitación (1–100V). Es claro que las curvas de velocidad medidas presentan un comportamiento “softening” con decrecimiento de la frecuencia de resonancia y la aparición de un salto en la respuesta a partir de una tensión de 40 V. La figura 9b muestra el espectro de velocidad medida con excitaciones 30 V caracterizado por la aparición de varios picos además de la frecuencia de 19,5 kHz y de su primer armónico. Es importante indicar que la suma de las frecuencias de los picos excitados internamente que aparecen a 6,75 kHz y 12,8 kHz es casi igual a la frecuencia de

resonancia del transductor, y que el modo de 6,75 kHz excede en amplitud al de la frecuencia de resonancia del transductor.

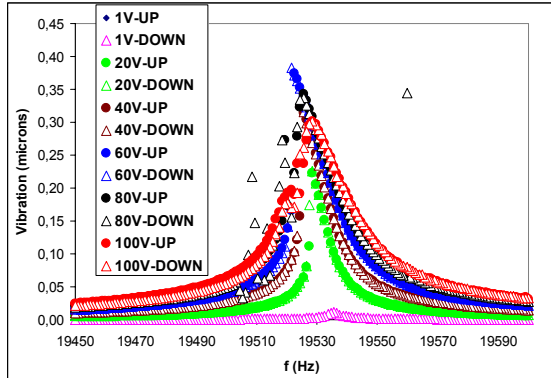


Figura 9a. Respuesta en velocidad del transductor de placa acanalada entre 19,45kHz y 19,6kHz, con voltajes crecientes 1V-100V; tiempo de retardo = 0,5 s

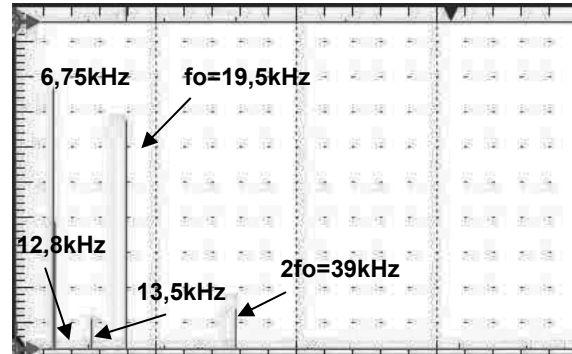


Figura 9b. Respuesta en velocidad del transductor de placa acanalada a 19,5 kHz (voltaje 40V); rango de frecuencia 100 kHz

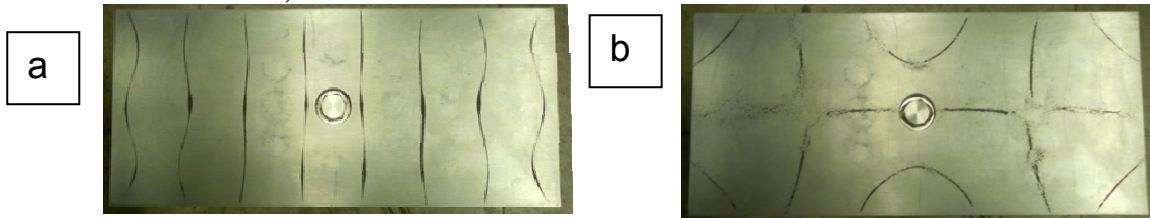


Figura 10. Forma modal del transductor de placa acanalada : a) excitada a $f = 19,5 \text{ kHz}$ y b) excitada no linealmente a 6,75 kHz

Los modos de vibración del sistema, mostrados en la figura 10, fueron identificados depositando partículas metálicas finas sobre la cara plana de la placa rectangular del transductor. De esta manera se ha podido identificar la forma modal con ocho LN a 19,5 kHz, y la forma modal a 6,75 kHz que coincide con el pico de frecuencia mas bajo del espectro de la figura 9b.

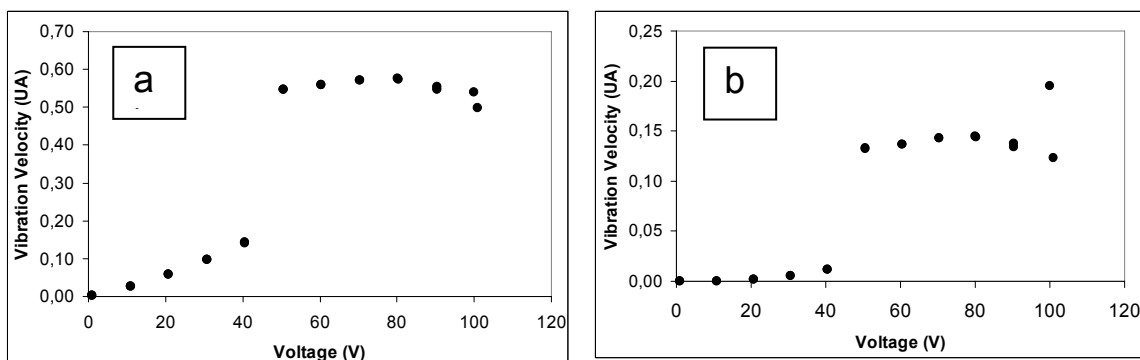


Figura 11. Respuestas del sistema al incrementar el voltaje desde 1 V hasta 100 V: a) a 19525 Hz (respuesta primaria), y b) a 6740 Hz (respuesta secundaria)

Finalmente, se incrementó el voltaje de excitación entre 1 V y 100 V en saltos de 10 V mientras se mantuvo la frecuencia de excitación próxima a la frecuencia de resonancia en 19,5 kHz. Al incrementar el nivel de la excitación la respuesta del modo de resonancia aumenta linealmente hasta los 40 V, como se aprecia en la figura 11a. A 50V se detectó un salto debido a la pronunciada característica softening del sistema. Para voltajes comprendidos entre 50 V y 100 V la respuesta alcanzó un plateau que revela un efecto de saturación. Durante el mismo

experimento la respuesta en velocidad del sistema detectado a 6,75 kHz fue monitorizado (figura 10b). En el rango de excitación 0-40 V no se midió una respuesta significativa a esa frecuencia. Sin embargo, a partir de 50 V un peak de velocidad apareció de repente a 6,75 kHz demostrando la existencia de una transferencia de energía modal entre el modo de resonancia de 19,5 kHz y el modo de baja frecuencia de 6,75 kHz. Este comportamiento es típico de los sistemas autoparamétricos.

Durante las pruebas se detectó además la presencia de una grieta superficial por fatiga paralela al lado corto que comienza a partir de la zona del tornillo de fijación entre vibrador y placa sobre la superficie del radiador. No se sabe si la aparición de la grieta contribuyó a producir la interacción autoparamétrica, o si la interacción modal causó la formación de la grieta. De acuerdo con las predicciones obtenidas con FEM y con los niveles de voltaje utilizados no debería de haber aparecido la grieta. Un rediseño del vibrador piezoeléctrico extensional que excita la placa radiante, basado en los últimos resultados obtenidos por los autores, se implementará para mitigar el comportamiento no lineal del conjunto [14].

CONCLUSIONES

El escalamiento industrial de sistemas ultrasónicos depende significativamente de su comportamiento vibratorio no lineal. Para este fin, se han investigado experimentalmente las características dinámicas no lineales exhibidas por dos transductores ultrasónicos de potencia. Los transductores estudiados han sido diseñados específicamente mediante FEM para asistir en procesos de deshidratación y extracción.

Se han detectado y caracterizado los mecanismos no lineales que afectan el comportamiento de ambos tipos de transductores tales como la aparición de armónicos, la combinación de resonancias o interacciones modales, y la saturación de la respuesta. La correcta formalización de las estrategias de rediseño para mitigar los comportamientos no lineales de los sistemas ultrasónicos depende de la habilidad a la hora de analizar la dinámica de los sistemas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación económica al proyecto DPI2009-14549-CO4-01 del Plan Nacional español de I+D+i. Los autores están igualmente agradecidos a Germán Rodríguez, Alfonso Blanco, Ignacio Martínez y Alberto Pinto por su soporte técnico en el desarrollo y excitación de los transductores de potencia presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- 1 E. Riera, J. A. Gallego-Juárez, T. Mason, *Ultrasonics Sonochemistry* **13** (2006) 107-116.
- 2 G. Rodríguez, J. A. Gallego-Juárez, E. Riera, V. M. Acosta, A. Blanco, *Physics Procedia*, **3** (2010) 135-139.
- 3 I. González, G. Rodríguez, I. Garmendia, J. A. Gallego-Juárez, *Ultrasonics* **44** (2006) e777-e2781.
- 4 J. A. Gallego-Juárez, E. Riera, V. M. Acosta, G. Rodríguez, A. Blanco, *Ultrasonics Sonochemistry* **17**, 234-238 (2010).
- 5 A. Cardoni, P. Harkness, M. Lucas, *Physics Procedia*, **3** (2010) 125-134.
- 6 A. Mathieson, A. Cardoni, *Physics Procedia*, **3** (2010) 767-773.
- 7 J. A. Gallego-Juárez, G. Rodríguez, V. M. Acosta, E. Riera, *Ultrasonics Sonochemistry* **17** (2010) 953-964.
- 8 E. Riera, J. A. Gallego-Juárez, A. Blanco, V. M. Acosta, *Proceedings of the International Congress on Ultrasonics*, Vienna, April 9-13 (2007) Paper ID 1435.
- 9 A. Cardoni, E. Riera, A. Blanco, J. A. Gallego-Juárez, V M Acosta, 2009 *Proceedings IEEE Ultrasonic Symposium*, 19-23 September, Rome, Italy.

- 10 A. Cardoni, A. Mathieson, N. Cerisola, *Proceedings 39th International Congress on Noise Control Engineering, Inter Noise*, 13-16 June (2010) Lisbon Portugal.
- 11 E. Riera, A. Cardoni, A. Blanco, V. M. Acosta, J. A., Gallego-Juárez, *Proceedings 39th International Congress on Noise Control Engineering, Inter Noise*, 13-16 June (2010) Lisbon Portugal.
- 12 N. Aurelle, D. Guyomar, C. Richard, P. Gonnard, L. Eyraud, *Ultrasonics*, **34** (1996) 187-191.
- 13 M. Umeda, K. Nakamura, S. Ueha, *Japan. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 5581-5585.
- 14 A. Cardoni, J. A. Gallego-Juárez, E. Riera, *Book of Abstracts Piezo2011 Electroceramics for End-Users VI*, 28 February – 2 March (2011) Sestriere, Italy.