

SISTEMA DE CONTROL Y CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS DE POTENCIA (UdP) BASADO EN SOFTWARE LABVIEW

PACS: 43.35.Yd

Roque R. Andrés; Alfonso Blanco; Enrique Riera; Víctor M. Acosta; Ignacio Martínez; Alberto Pinto; Ángel Guinot.

Dpto. Sensores y Sistemas Ultrasónicos (DSSU), ITEFI, CSIC, Serrano 144, E28006-Madrid, España, roque.andres@csic.es

ABSTRACT

It has been proved that the use of power ultrasounds (UdP) has brought many advantages in industrial processes. Due to the nature of UdP transducers and its working regime, it is crucial to have a control and characterization system with a high process capacity and high resolution.

The aim of this work is to introduce a new system that is able to perform simultaneous tasks like control, characterization, monitoring and analysis of UdP transducers, allowing also new Labview-based functionalities and a high versatility in the excitation system and in the result processing.

RESUMEN

Numerosos procesos industriales se están viendo beneficiados por la aplicación ultrasonidos de potencia (UdP). Debido a la naturaleza de los transductores UdP y al modo de funcionamiento requerido, es fundamental disponer de un sistema de control y caracterización con alta capacidad de proceso, y elevada resolución.

El objetivo de este trabajo es presentar un nuevo sistema que efectúa simultáneamente tareas de control, caracterización, monitorización y análisis de transductores UdP, disponiendo de una serie de nuevas funcionalidades basadas en Labview, y permitiendo una alta versatilidad en el sistema de excitación y en la fase de procesado de los resultados.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la aplicación de ultrasonidos de potencia (UdP) de baja frecuencia (entre 20 y 50 kHz) está considerada como una nueva tecnología verde con un alto potencial para su aplicación industrial en diferentes procesos como transferencia de materia (extracción, deshidratación y secado de alimentos [1]), aglomeración de partículas [2], cirugía [3],

despumación, limpieza, etc... Entre los beneficios de esta tecnología se sitúan la disminución de la energía requerida para completar los procesos y la calidad de los productos resultantes.

La generación de UdP en medios multifásicos se consigue mediante transductores ultrasónicos formados por un vibrador tipo Langevin, consistente por un número determinado de cerámicas piezoeléctricas, una masa y una contramasa metálicas; un amplificador mecánico (horn) y un radiador de gran superficie, con un diseño circular, cuadrado, rectangular o cilíndrico [4-6].

Para generar el campo acústico de alta intensidad, necesario para producir los efectos deseados, es necesario aplicar altas tensiones eléctricas (de varios centenares de voltios) a las cerámicas piezoeléctricas, de forma que se originen grandes desplazamientos, en base el efecto piezoeléctrico, en el extremo del amplificador mecánico, que excite un modo de vibración adecuado en el radiador, que es el encargado de generar y transmitir este campo acústico de elevada intensidad.

Los requisitos anteriores pueden provocar que el transductor trabaje bajo un régimen no lineal, en el que pueden aparecer fenómenos como generación de armónicos, excitación autoparamétrica, respuestas multimodales, combinaciones de resonancias, modulaciones o histéresis, entre otros [7]. De todos estos efectos, el comportamiento histerético, así como los saltos en frecuencia (frequency drops) se producen en las cerámicas debido a sus pérdidas internas de carácter dieléctrico, elástico y piezoeléctrico, y que se manifiestan mediante un incremento de la temperatura en el stack de cerámicas cuando se aplican valores altos de tensión [8]. Por otro lado, la aparición de armónicos, la excitación autoparamétrica, las respuestas multimodales y la combinación de resonancias son efectos del sistema completo que aparecen al someterlo a altos niveles de potencia [9], y que pueden corregirse mediante modificaciones adecuadas en el diseño del transductor.

Por tanto, es necesario caracterizar cuidadosamente el comportamiento no lineal del transductor cuando se le somete a altos niveles de potencia. Se ha diseñado un sistema capaz de caracterizar este comportamiento no lineal del transductor y de trabajar en condiciones de resonancia con el objetivo de mejorar su eficiencia y de poder estabilizar la respuesta dinámica vibracional del sistema [10].

El objeto del presente trabajo es presentar algunas de las principales funcionalidades de este sistema a partir de la caracterización no lineal de un transductor UdP.

SISTEMA EXPERIMENTAL DE MEDIDA

En la figura 1 se representa el esquema del sistema experimental de medida, y en la figura 2 una vista del sistema experimental desarrollado.

Cada uno de los elementos del nuevo sistema está gobernado por la aplicación informática desarrollada en el entorno Labview, y que permite no solo la caracterización no lineal de los transductores, sino que también puede llevar a cabo tareas de aprendizaje, control y protección en tiempo real de cada elemento, manteniendo las variables (tensión, corriente, potencia o temperatura) bajo unos valores máximos admisibles con objeto de evitar la aparición de fallos y grietas en el transductor ocasionados por fatiga a frecuencias ultrasónicas.

El principal objetivo de este sistema es poder llevar a cabo varias tareas de un modo simultáneo (adquisición, análisis, caracterización, control, monitorizado y registro de datos), ofreciendo una mayor efectividad, confort, versatilidad y reducción de errores gracias a la aplicación desarrollada mediante el software Labview, que también permite, entre otras cosas, modificar la configuración de medida sin realizar cambios físicos (conectar una inductancia (L_0) para compensar la capacidad paralelo (C_0) cuando se realice el seguimiento de resonancia.

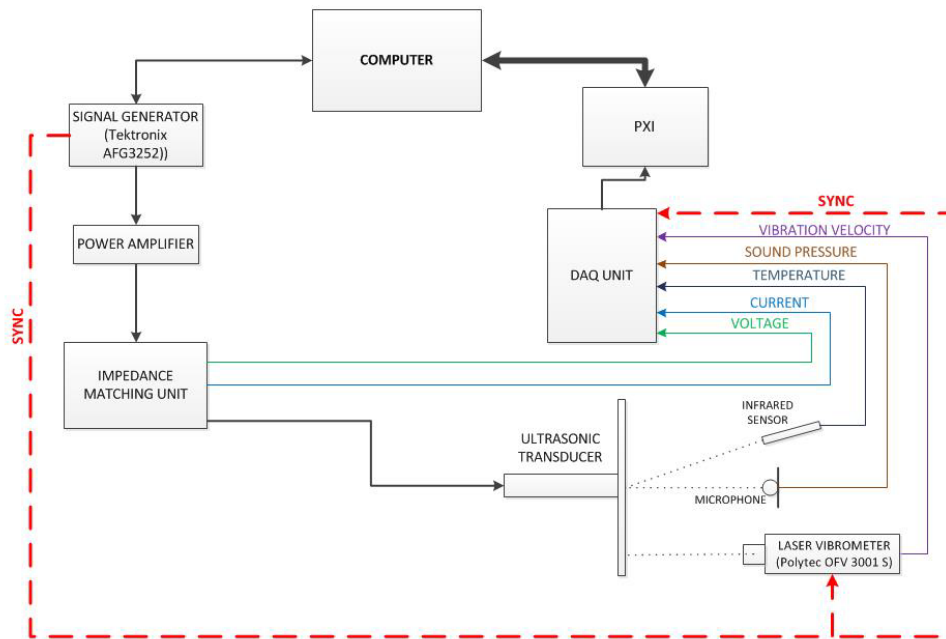


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema experimental de medida.

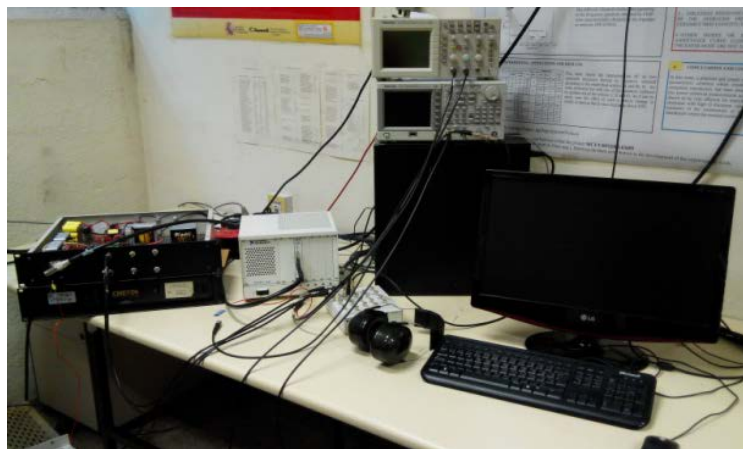


Figura 2. Vista del sistema experimental de medida.

CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES

Mediante este sistema se ha llevado a cabo la caracterización no lineal de diferentes tipos de transductores (tipo Langevin, transductor con placa rectangular y transductor con placa circular), prestando especial atención a algunas de las funcionalidades como la compensación virtual de la C_0 (capacidad interelectrónica paralelo del stack de cerámicas); el seguimiento de la frecuencia de resonancia, o las curvas de interrelación de parámetros y variables. Conviene recordar que en una cerámica piezoeléctrica polarizada existe una relación entre sus propiedades mecánicas y eléctricas. Desde un punto de vista eléctrico, una cerámica delgada se comporta como un condensador plano, donde la capacidad, C , la carga Q , y el voltaje, V , están relacionados entre sí.



Figura 3. a) Transductor UdP con placa rectangular; b) Transductor UdP con placa circular.

Seguimiento de Resonancia

Para que un transductor ultrasónico UdP pueda conseguir los efectos deseados cuando trabaja a alta potencia (efectos como transferencia de masa, aglomeración, despumación, etc.), es necesario que durante el tiempo de operación esté vibrando en resonancia, en el modo de vibración adecuado.

Como consecuencia del calentamiento de las cerámicas piezoeléctricas, se produce un paulatino descenso de la frecuencia de resonancia del sistema ultrasónico, por lo que el sistema de excitación debe variar la frecuencia de acuerdo con estas variaciones. Este seguimiento de la resonancia se suele realizar con un oscilador ultrasónico externo.

Sin embargo, el nuevo sistema permite realizar el seguimiento por software, aplicando algoritmos tradicionales (búsqueda de máximos de potencia y mínimos de fase), de un modo simultáneo al monitorizado de todos los eventos.

Compensación de la Capacidad Interelectrónica Paralelo

Para poder describir y analizar determinados tipos de sistemas se pueden utilizar las analogías electro-mecánicas, es decir su modelo mecánico o su circuito equivalente eléctrico simplificado en condiciones de resonancia.

En el caso de transductores piezoeléctricos, el sistema más simple está formado por un cuadripolo con dos puertas, una eléctrica y una mecánica. En la puerta eléctrica de entrada una fuente de voltaje hace fluir una corriente hacia el transductor. En la puerta mecánica de salida la fuerza aplicada hace vibrar al sistema con una velocidad de desplazamiento. La intensidad en la rama eléctrica está relacionada con la velocidad de desplazamiento en la rama mecánica.

La rama mecánica del transductor cuando trabaja en condiciones de resonancia es equivalente a un oscilador armónico con pérdidas compuesto por una masa (M_m), una compliancia mecánica (C_m) y una resistencia mecánica (R_m); o a un circuito eléctrico equivalente RLC, compuesto por una inductancia (L), una capacidad (C) y una resistencia eléctrica (R). Es decir, que la velocidad de desplazamiento de un oscilador mecánico sometido a una fuerza externa se comporta como una intensidad de corriente de un circuito serie RLC sometido a un voltaje externo con tal que: M_m , C_m y R_m sean análogos a L , C y R , respectivamente.

Por otro lado, y debido al comportamiento capacitivo de cerámicas piezoeléctricas, a este modelo equivalente RLC hay que añadir una capacidad interelectrónica en paralelo (C_0), tal y como se muestra en la figura 4.

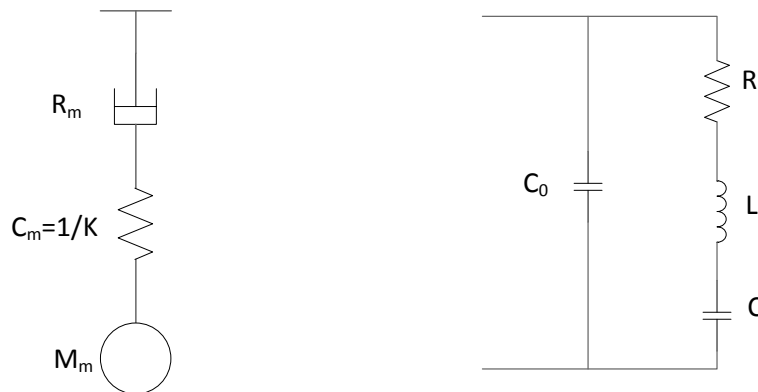


Figura 4. Analogía electromecánica; a) Circuito mecánico; b) Circuito eléctrico (al cual se le añade la capacidad en paralelo C_0).

En el circuito de la figura 4b, los elementos reactivos (C, L) almacenan energía que no es emitida al medio, únicamente se emite energía a través de la resistencia R cuyo valor viene dado por $R = R_p + R_R$. Es decir, la resistencia tiene dos partes: R_p que representa la resistencia de pérdidas por fricción mecánica y R_R que es la resistencia de radiación. La potencia disipada en R_R es emitida al medio en forma de ondas ultrasónicas. Cuando transductor trabaja en resonancia, la capacidad C y la inductancia L de la rama mecánica se compensan y, por tanto, se anulan, por lo que ese circuito RLC se convierte en un sistema puramente resistivo. Sin embargo, la existencia de C_0 , hace necesario intercalar una inductancia paralelo L_0 entre el transductor y el generador para obtener máxima transferencia de potencia, tal y como se muestra en la figura 5.

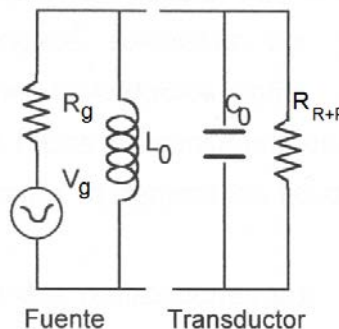


Figura 5 Circuito equivalente de un transductor en resonancia con adaptación al generador para máxima transferencia de energía

El nuevo sistema permite añadir esta inductancia (L_0) virtualmente para tareas de análisis de los resultados obtenidos, determinando el comportamiento del transductor cuando se aplican diferentes compensaciones. De esta manera se puede determinar cuál es la compensación más adecuada para cada configuración.

Se ha realizado el análisis de la compensación virtual para un transductor de placa rectangular compuesto por:

- Un stack con cuatro cerámicas piezoeléctricas tipo PZT 802.
- Amplificador mecánico (horn) de longitud igual a $\lambda/2$.
- Radiador extenso rectangular (308x570x33,5 mm), de duraluminio 7075.
- Frecuencia de resonancia alrededor de 21,5 kHz.
- Factor de calidad aproximado $Q=15000$ (ancho de banda de 1,2 Hz).

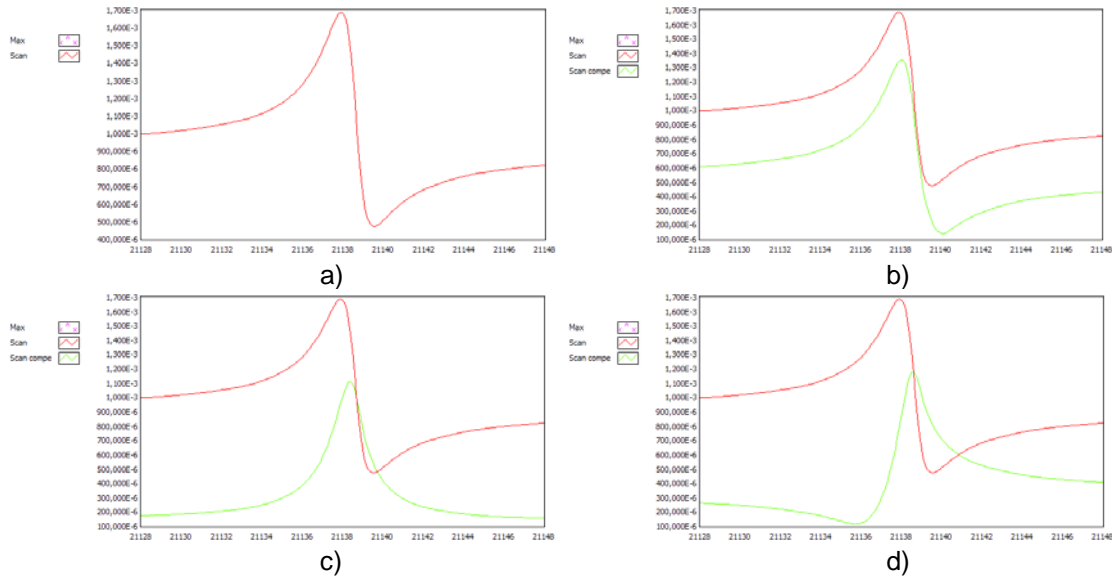


Figura 6. Medida de la admitancia y curva con la compensación virtual. a) Sin compensación; b) Compensación 3 nH; c) Compensación 6 nH; d) Compensación 9 nH.

De la figura anterior, se observa cómo diferentes valores de compensación arrojan diferentes resultados. Se puede deducir, por cuestiones de simetría, que la compensación más adecuada es 6 nH.

Caracterización no lineal del transductor de placa rectangular

En este apartado presentamos a modo de ejemplo la caracterización no lineal del transductor de placa rectangular plana con el objeto de determinar su comportamiento dinámico no lineal (hardening o softening).

Para ello se han realizado barridos 2D alrededor de la frecuencia de resonancia y para diferentes tensiones de excitación. En la figura 7 se muestran las velocidades de vibración ξ obtenidas con el vibrómetro láser apuntando, perpendicularmente, a un punto de la superficie del radiador en una zona de máximo desplazamiento, cerca del borde del radiador.

Se han considerado dos configuraciones diferentes, la primera con una señal de excitación continua y la segunda configuración con excitación tipo burst (o ráfagas), con el objeto de separar el comportamiento no lineal debido a efectos térmicos del comportamiento no lineal real debido al propio transductor.

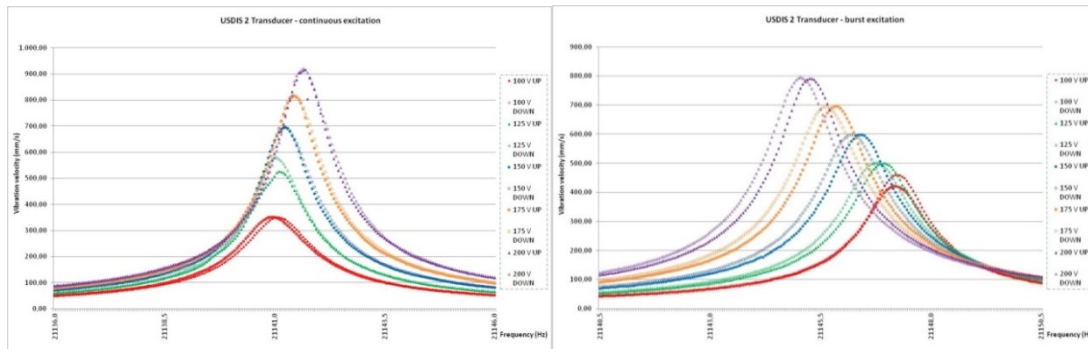


Figura 7. Influencia del tipo de excitación en la respuesta dinámica del transductor a través de la velocidad de desplazamiento a) Excitación continua; b) Excitación tipo burst.

En la figura anterior se muestra la influencia de la forma de excitación en la respuesta dinámica del transductor. La caracterización mediante señal continua muestra un ligero comportamiento tipo hardening -la frecuencia de resonancia aumenta al aumentar la tensión de excitación, aunque en este caso el incremento es inferior a 2 Hz en total. Sin embargo, la caracterización mediante señal tipo burst, minimizando los efectos térmicos, muestra un comportamiento tipo softening. De igual forma, se observa un comportamiento ligeramente histerético, ya aparece un desplazamiento de la frecuencia de resonancia hacia las bajas frecuencias en el barrido descendente.

Interrelación de Parámetros y Variables.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el nuevo sistema permite evaluar las variaciones de las diferentes variables con otros parámetros o variables. En los transductores piezoeléctricos las variaciones de temperatura, por ejemplo, pueden afectar claramente a la eficiencia del sistema, provocando incluso la ruptura elemento radiante del transductor. Por tanto, disponer de una herramienta que automáticamente permita comparar dos variables, y que, incluso, obtenga el modelo analítico que las relacione, puede ser realmente útil para una caracterización más completa que englobe sistemas de protección.

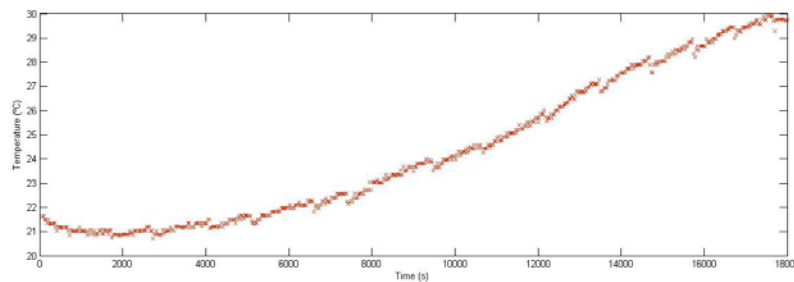


Figura 8. Evolución de la temperatura (°C) con el tiempo (s).

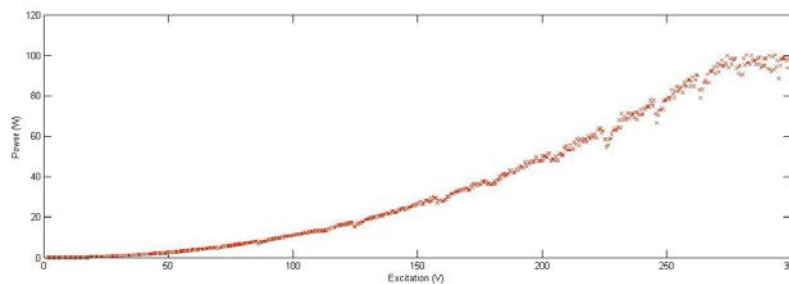


Figura 9. Variaciones de la potencia eléctrica (W) en función de tensión de excitación (V).

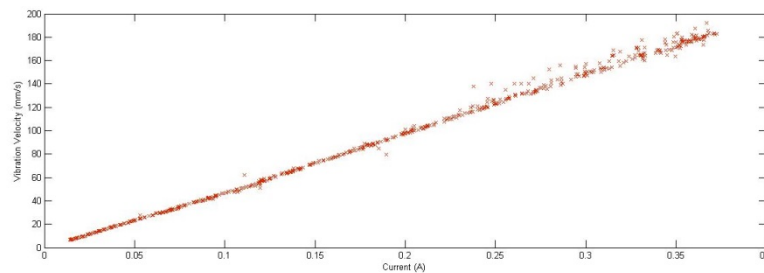


Figura 10. Evolución de la velocidad de vibración (mm/s) en función de la corriente (A).

Las figuras anteriores muestran, a modo de ejemplo, algunos resultados de relaciones entre parámetros y variables obtenidas experimentalmente. En el ejemplo, se muestra la evolución de la temperatura del transductor en función del tiempo (Figura 8), las variaciones de la

potencia eléctrica en función del voltaje (Figura 9) y la evolución de la velocidad de vibración con la corriente (figura 10). El experimento tuvo una duración de 350 minutos con una tensión inicial de 1 V y un incremento secuencial de 1 V cada minuto hasta alcanzar un valor máximo de 350V:

CONCLUSIONES

Se ha presentado el nuevo sistema de control y caracterización de transductores ultrasónicos, que permite llevar a cabo varias tareas de un modo simultáneo, y que presenta avances respecto de otros sistemas anteriores, como el seguimiento de resonancia vía software, la compensación virtual de la capacidad C_0 , o la posibilidad de obtener modelos analíticos que permitan relacionar diferentes variables fundamentales para el adecuado funcionamiento de los transductores UdP, como potencia, temperatura, velocidad de vibración, etc.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MINECO la financiación de este trabajo de investigación realizado en el marco del proyecto DPI 2012-37466-C03-01 (USDIS).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.V. Garcia-Perez, J.A. Carcel, E. Riera, C. Rosselló, A. Mulet, Intensification of Low-Temperature Drying by Using Ultrasound, *Drying Technology*, 30 (2012) 1199-1208.
- [2] E. Riera, I. González-Gomez, G. Rodríguez, J.A. Gallego-Juárez, 34 - Ultrasonic agglomeration and preconditioning of aerosol particles for environmental and other applications, in: J.A. Gallego-Juárez, K.F. Graff (Eds.) *Power Ultrasonics*, Woodhead Publishing, Oxford, 2015, pp. 1023-1058.
- [3] M. Lucas, A. Mathieson, *Ultrasonic cutting for surgical applications*, (2015).
- [4] J.V. García-Pérez, J.A. Cárcel, E. Riera, A. Mulet, Influence of the Applied Acoustic Energy on the Drying of Carrots and Lemon Peel, *Drying Technology*, 27 (2009) 281-287.
- [5] S. de la Fuente-Blanco, E. Riera-Franco de Sarabia, V.M. Acosta-Aparicio, A. Blanco-Blanco, J.A. Gallego-Juárez, Food drying process by power ultrasound, *Ultrasonics*, 44, Supplement (2006) e523-e527.
- [6] V.M. Acosta Aparicio, E. Andrés Gallego, J.A. Gallego Juárez, E. Riera, G. Rodríguez Corral, Application of high-power ultrasound for drying vegetables, in: *Forum Acusticum*, Sociedad Española de Acústica, Sevilla, 2002.
- [7] A. Cardoni, E. Riera, J.A. Gallego Juárez, Nonlinear response in airborne piezoelectric transducer for power ultrasonics, in: *2013 International Congress on Ultrasonics*, Singapore, 2013, pp. 173-178.
- [8] M. Umeda, K. Nakamura, S. Ueha, Effects of Vibration Stress and Temperature on the Characteristics of Piezoelectric Ceramics under High Vibration Amplitude Levels Measured by Electrical Transient Responses, *Japanese Journal of Applied Physics*, 38 (1999) 5581.
- [9] J.A. Gallego-Juárez, E. Riera, V.M. Acosta-Aparicio, Modal Interactions in High-Power Ultrasonic Processing Transducers, *AIP Conference Proceedings*, 1022 (2008) 595-604.
- [10] R.R. Andrés, A. Blanco, V. Acosta, E. Riera, I. Martínez, A. Pinto, New Ultrasonic Controller and Characterization System for Low Temperature Drying Process Intensification, *Physics Procedia* (in press), (2015).