

Un estudio de la eficiencia de operación del transductor multicapas piezocerámico excitado en modo espesor

Orlando R. Rodríguez Rúa
Departamento de Física Aplicada
Instituto de Cibernética, Matemática y Física (ICIMAF)
La Habana, Cuba
e-mail: reyrua@yahoo.com

Resumen—En la actualidad existe un interés creciente por el uso de ultrasonido de potencia de alta frecuencia en numerosas aplicaciones, incluyendo industriales y de desarrollo sostenible. Este trabajo presenta un estudio numérico de la eficiencia de operación del transductor multicapas piezocerámico de potencia excitado en modo espesor. El transductor se compone de un conjunto de capas o anillos piezocerámicos con masas frontal y trasera metálicas, dispuestos concéntricamente y acoplados acústicamente. Teniendo en cuenta el modo de excitación, las dimensiones laterales del dispositivo resultante deben ser mucho mayores que su espesor. Se demuestra como una ventaja importante la posibilidad de un incremento significativo de la eficiencia del transductor cuando es operado a la frecuencia de antirresonancia, en contraposición al funcionamiento tradicional de éste a la frecuencia de resonancia, pese a que el mismo resultado no es alcanzado por el transductor compuesto de una sola capa piezocerámica y diseñado para iguales propósitos. Cuantitativamente, se calculó que un transductor multicapas piezocerámico excitado en modo espesor a la frecuencia de antirresonancia, disminuye las pérdidas internas de potencia en aproximadamente 47% en referencia a su operación a la frecuencia de resonancia, para una aproximación lineal del sistema de generación de ultrasonido.

Palabras Claves: ultrasonido; transductor piezocerámico; transductor de potencia multicapas; pérdidas piezoeléctricas; piezoelectricidad; desarrollo sostenible

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas el ultrasonido (US) de potencia ha sido empleado con éxito en numerosas aplicaciones industriales, como en limpiadores ultrasónicos y para la soldadura de plásticos. En la actualidad, nuevos usos son encontrados a esta técnica.

Al presente, valiosas reservas de aguas están en riesgo de contaminación o se hallan francamente contaminadas. La desactivación de no pocos productos químicos contaminantes del medio ambiente resulta un verdadero reto para la tecnología en uso. Otros importantes contaminantes son de carácter biológico, muchos de los cuales son resistentes a su eliminación por los métodos tradicionales, básicamente empleando la cloración. Se reporta además, que la desinfección del agua por cloración genera variados DBPs (disinfection by products) potencialmente cancerígenos, lo que puede

constituirse sin dudas en un problema serio para la salud humana [1]-[6]. Es en este escenario donde han sido propuestas diferentes alternativas para el tratamiento del agua de consumo humano y de otros residuales acuosos, por medio de distintos procesos de oxidación avanzada o AOP (advanced oxidation processes), siendo uno de estos implementado a través del US [3].

Entre las ventajas de la aproximación se encuentra la no introducción de productos químicos contaminantes ni generados por la acción del US; la no afectación del método cuando en el líquido se encuentran sólidos en suspensión, a diferencia por ejemplo de la ozonificación; la posibilidad del uso combinado de la técnica ultrasónica con otros AOP, lográndose una notable acción sinérgica.

Dentro del contexto mencionado, la utilización de US de potencia de alta frecuencia (>100 kHz) es reportado en numerosos trabajos como una modalidad eficaz de sonificación en disímiles aplicaciones, incluyendo industriales y de desarrollo sostenible. Entre otras se señalan la desintegración de flósculos en lodos, la remoción de surfactantes contenidos en estos y la liberación a la fase líquida de materia orgánica soluble [7]; el incremento de la digestión anaeróbica de lodos y el aumento de la producción de biogás [8], la degradación de pesticidas y compuestos aromáticos [9]-[10]; el tratamiento de residuales industriales [11]; la desactivación de virus [12], bacterias [13], [14] y oocitos de *Cryptosporidium parvum* [4], [5]; la sonólisis de medicamentos disueltos en aguas [15]; el incremento de conversión de biomasa a biocombustible [16]; el empleo de limpiadores ultrasónicos de alta frecuencia [17].

Actualmente, un área activa de investigación es la optimización de los sonoreactores utilizados en muchas de las aplicaciones señaladas. En este sentido, cuantiosos esfuerzos son dedicados al desarrollo de transductores ultrasónicos más robustos y eficientes. No obstante, poca atención se le ha dado al estudio de las pérdidas internas en los elementos piezocerámicos empleados para la generación de las ondas acústicas en los transductores. Estos materiales piezocerámicos se caracterizan por relaciones mecánico-eléctricas únicas.

Es considerado en piezoelectricidad, que las pérdidas internas de potencia son generadas por tres mecanismos acoplados: dieléctrico, elástico y piezoeléctrico. Aunque los

factores de pérdidas dieléctricas y elásticas son reportados comúnmente en los catálogos de los fabricantes de materiales piezocerámicos, sin embargo no ocurre así con el factor de pérdida piezoeléctrica. La consideración de este factor en los cálculos teóricos puede explicar los resultados experimentales obtenidos de los factores de calidad mecánicos correspondientes a las frecuencias de resonancia y antirresonancia, respectivamente [18].

Este trabajo presenta un estudio numérico de la eficiencia de operación del transductor multicapas piezocerámico de potencia excitado en modo espesor, con el objetivo de investigar regímenes de estimulación optimizados en una aproximación lineal del problema.

II. TEORÍA

Un esquema de un transductor piezocerámico multicapas de potencia operado en modo espesor se muestra en Fig. 1. La geometría más común de los elementos es en forma de disco. Se asume que las dimensiones laterales del dispositivo resultante son mucho mayores que su espesor, por lo que puede ser considerado como mecánicamente sujeto lateralmente. La condición es necesaria para poder asumir oscilaciones en modo espesor. El transductor incluye un número de cerámicas piezoeléctricas idénticas, polarizadas y arregladas según se indica. \vec{P} representa al vector de polarización. Usualmente el número de piezocerámicas es par, con el objetivo de facilitar las conexiones. De tal modo, las masas metálicas terminales pueden ser conectadas al mismo nodo y aterradas conjuntamente. Esto es especialmente conveniente cuando el transductor es sujeto centralmente por un tornillo, en cuyo caso, los elementos deberán ser en forma de anillos. En el transductor multicapas piezocerámico sujeto por un tornillo central o por pegamento, existe la necesidad de electrodos interpuestos adecuadamente para el suministro de la energía eléctrica de estimulación a cada piezocerámica. Ordinariamente, cuando el espesor de los electrodos es mucho menor que la longitud de la onda acústica a la frecuencia de trabajo, éstos pueden ser ignorados en las simulaciones. En caso contrario, deberán ser incluidos. Con las restricciones impuestas, el comportamiento del transductor piezocerámico presentado puede ser descrito en 1D [19].

Un circuito electromecánico equivalente, Fig. 2, que puede ser usado para modelar el comportamiento del transductor en el espacio de las frecuencias, es presentado por [19] sobre la base del circuito ofrecido inicialmente por W. P. Mason [20], [21].

En el circuito de la Fig. 2:

$$Z_{1p} = Z_0 \tanh(P\gamma/2) \quad (1)$$

$$Z_{2p} = Z_0 / \sinh(P\gamma) \quad (2)$$

$$Z_0 = \rho c_t S \left[1 - kt^2 \frac{\tan(kl/2)}{kl/2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

siendo,

$$\sinh(\gamma/2) = j \left[\frac{\sin^2(kl/2)}{1 - kt^2 \sin(kl)/kl} \right]^{1/2} \quad (4)$$

Además, P es el número de capas piezocerámicas contenidas en el dispositivo, ρ es la densidad del material piezocerámico, $k = \omega/c_t$ es el número de onda para

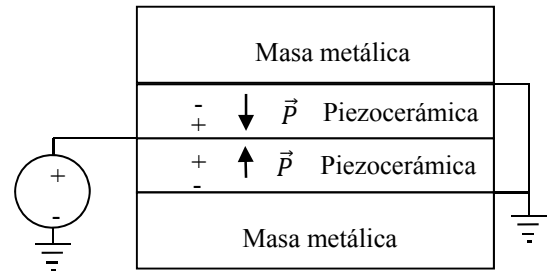


Fig. 1. Esquema del transductor piezocerámico multicapas de potencia.

vibraciones en modo espesor, $c_t = (c_{33}^D/\rho)^{1/2}$ es la velocidad del sonido para igual modo, $C_0 = S/\beta_{33}^S l$ es la capacidad de las capas piezocerámicas sujetas lateralmente, l es el espesor de éstas, $N = h_{33} C_0$ es el coeficiente de conversión electromecánico, $k_t = h_{33}/c_{33}^D$ es el coeficiente de acoplamiento electromecánico en modo espesor y S es el área frontal de las capas. Para anillos, $S = \pi(R_2^2 - R_1^2)$ donde R_1 y R_2 son los radios internos y externos de los anillos, respectivamente. $j = \sqrt{-1}$ y $\omega = 2\pi f$.

Adicionalmente,

$$Z_{1f} = jZ_f \tan(k_1 l_1/2) \quad (5)$$

$$Z_{2f} = Z_f / j \sin(k_1 l_1) \quad (6)$$

donde $Z_f = \rho_1 c_1 S$ es la impedancia acústica, ρ_1 la densidad, l_1 es el espesor y c_1 la velocidad del sonido para ondas longitudinales, todas para la masa frontal. $k_1 = \omega/c_1$. Análogas relaciones se aplican para las impedancias, Z_{1b} y Z_{2b} , correspondientes a la red de la masa trasera,

Por otra parte, Z_{fl} y Z_{bl} son las cargas acústicas frontal y trasera, respectivamente.

Las pérdidas internas de potencia son introducidas en el modelo matemático presentado, sustituyendo las constantes β_{33}^S , c_{33}^D y h_{33} por sus correspondientes expresiones complejas, quedando entonces como:

$$\bar{\beta}_{33}^S = \beta_{33}^S (1 + j \tan \delta) \quad (7)$$

$$\bar{c}_{33}^D = c_{33}^D (1 + j \tan \phi) \quad (8)$$

$$\bar{h}_{33} = h_{33} (1 + j \tan \theta) \quad (9)$$

donde $\tan \delta$, $\tan \phi$ y $\tan \theta$ son los tangentes de pérdidas extensivas dieléctricas, elásticas y piezoeléctricas, respectivamente [18].

Las pérdidas internas de potencia relativas, P_{re} , son obtenidas en el trabajo acorde a la siguiente expresión;

$$P_{re} = \frac{Pot_{en} - Pot_{sal}}{Per_{max}} \quad (10)$$

donde Pot_{en} es la potencia eléctrica promedio suministrada al transductor, Pot_{sal} es la potencia acústica promedio entregada por el transductor a sus cargas acústicas y Per_{max} es el máximo de $Pot_{en} - Pot_{sal}$ para el espectro de frecuencias analizado.

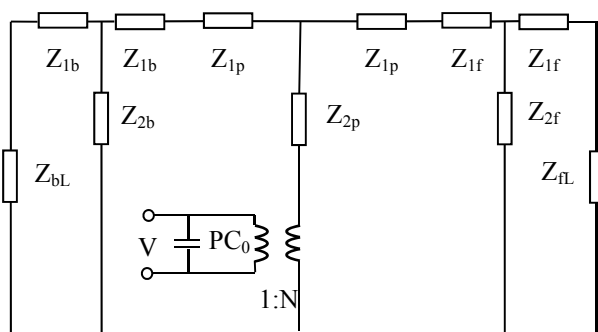


Fig. 2. Circuito equivalente del transductor multicapas operado en modo espesor [19]. P es el número de capas piezoeléctricas contenida en el dispositivo.

III. RESULTADOS

En la conducción del estudio numérico de los transductores ultrasónicos se empleó el método de la matriz de transferencia [22]. El radio (r) del área frontal de los elementos fue de 12,5 mm ($S=\pi r^2$) y el material piezocerámico seleccionado fue uno de bajas pérdidas ampliamente usado en aplicaciones de potencia (APC-841, APC International, Ltd.), caracterizado acorde a la Tabla I ($\beta_{33}^S = 1/\epsilon_0 K_{33}^S$). Para el transductor multicapas, las masas tanto frontal como trasera fueron asumidas como de aluminio, donde se tiene que $\rho_1 = 2,7 \text{ kg/m}^3$ y $c_1 = 6420 \text{ m}$. Adicionalmente, se estableció $P=2$.

Fueron simulados dos tipos de transductores. Un tipo formado por una sola capa piezocerámica y el otro multicapas. En ambos tipos, uno fue diseñado para operar a la frecuencia de resonancia y el otro a la de antirresonancia (cuatro en total). Los transductores fueron cargados posteriormente con impedancias acústicas de 400 rayl (aire) y frontalmente con 1,5 Mrayl (agua). La relación entre el espesor de las piezocerámicas y de ambas masas fue 0,25 para el tipo multicapas. La frecuencia de operación de todos los transductores fue de 300 kHz (armónico fundamental).

En la Fig. 3 se muestran los espectros de frecuencias de las pérdidas internas de potencia relativas, para los transductores formados por una sola capa piezocerámica, donde Per_{max} es en este caso, el máximo de las pérdidas de ambos espectros. En la Fig. 4, información análoga para el transductor multicapas. Fue asumido una velocidad constante de la cara en contacto con la carga externa de agua para todos los transductores, a la frecuencia de operación.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Diversas aproximaciones han sido propuestas en la literatura con el fin de obtener regímenes de operación optimizados para los transductores ultrasónicos [23], [24]. Una es la utilización como frecuencia de trabajo la correspondiente a la antirresonancia en contraposición a la tradicional de resonancia, tomando como referencia la disminución de las pérdidas internas de potencia [23].

No obstante, se puede apreciar que para el transductor formado por una sola capa piezocerámica, Fig. 3, en verdad la disminución relativa de las pérdidas a la frecuencia de

Tabla I. Valores de los parámetros característicos del material piezoeléctrico APC-841 usados en los cálculos numéricos.

APC-841	Valor	Unidades
h_{33}	$23,1 \times 10^8$	V/m
K_{33}^S	681	-
d_{33}^D	$15,19 \times 10^{10}$	N/m^2
ρ	$7,6 \times 10^3$	kg/m^3
$\tan \delta$	31×10^{-4}	-
$\tan \phi$	$5,4 \times 10^{-4}$	-
$\tan \theta$	15×10^{-4}	-
kt	0,46	-
k_{33}	0,68	-

antirresonancia son marginales, apenas 5% inferiores que las correspondientes a las de resonancia. En otras palabras, ninguna ventaja real fue obtenida.

En el transductor analizado, la dirección del campo eléctrico de excitación y las oscilaciones mecánicas inducidas coinciden. En estos transductores, una disminución notable en las pérdidas térmicas por medio de la estimulación del transductor a la frecuencia de antirresonancia solamente se logra en la práctica, cuando se cumplen determinadas condiciones. Concretamente, debe satisfacerse que por lo menos $Q_a/Q_r > 1.5 \dots 2$, siendo Q_a y Q_r los factores de calidad mecánicos correspondientes a las frecuencias de antirresonancia y resonancia, respectivamente [23]. Esta condición no se cumple ciertamente para el transductor formado por una sola capa piezocerámica y operado en modo espesor, como el estudiado.

Este trabajo demuestra en cambio, Fig. 4, que para el transductor multicapas piezocerámico operado en modo espesor, sí se puede conseguir una reducción significativa en las pérdidas internas de potencia, o expresado de otra forma, un incremento importante de la eficiencia de operación de transductor, cuando éste es estimulado a la frecuencia de antirresonancia en contraposición a la frecuencia de resonancia, aun cuando esto mismo no puede ser alcanzado por el transductor conformado por una sola capa piezocerámica y diseñado para iguales propósitos, Fig. 3. De esta forma se extiende el trabajo presentado por [23] a transductores multicapas piezocerámicos excitados en modo espesor.

Puede ser necesario señalar, que los resultados presentados fueron derivados de una cerámica comercial, por lo que no pueden ser considerados como optimizados y pudieran ser más o menos favorables empleando otros materiales piezocerámicos, o diferentes al aluminio para las capas frontal y trasera. En general, los resultados pueden ser extrapolados para la utilización de otros materiales piezocerámicos.

Cuantitativamente, se calculó que la operación del transductor multicapas piezocerámico excitado en modo espesor a la frecuencia de antirresonancia disminuye las pérdidas internas de potencia en aproximadamente 47%, en relación a su operación a la frecuencia de resonancia, empleando un modelo lineal para el sistema de generación de US. Los resultados reportados pueden constituir un aporte al desarrollo teórico de los transductores multicapas piezocerámicos de potencia para US de alta frecuencia.

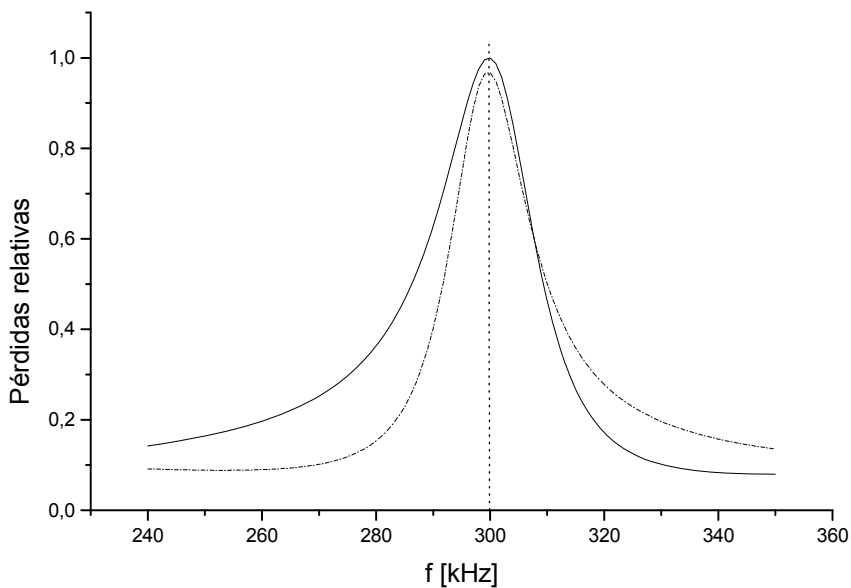


Fig. 3. Espectros de frecuencias de las pérdidas internas de potencia relativas de los transductores formados por una sola capa piezocerámica. — Diseñado para operar a la frecuencia de resonancia, - - - - diseñado para operar a la frecuencia de antiresonancia.

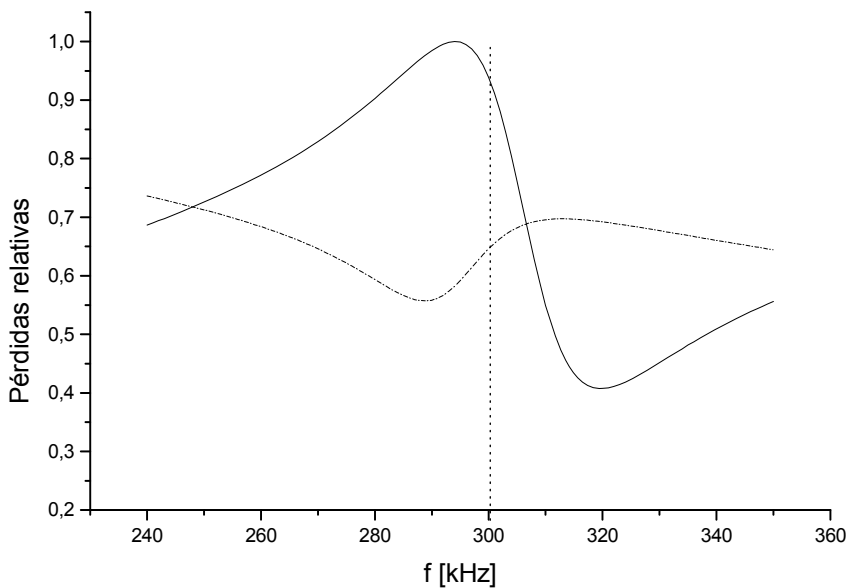


Fig. 4. Espectros de frecuencias de las pérdidas internas de potencia relativas de los transductores multicapas. — Diseñado para operar a la frecuencia de resonancia, - - - - diseñado para operar a la frecuencia de antiresonancia.

REFERENCIAS

- [1] J. González-García, V. Sáez, I. Tudela, M. I. Díez-García, M. D. Esclapez and O. Louisnard, "Sonochemical treatment of water polluted by chlorinated organocompounds. A review," *Water*, vol. 2, pp. 28-74, 2010.
- [2] M. A. Matouq, Z. A. Al-Anber, T. Tagawa, S. Aljbour and M. Al-Shannag, "Degradation of dissolved diazinon pesticide in water using the high frequency of ultrasound wave," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 15, pp. 869-874, 2008.
- [3] A. H. Mahvi, "Application of ultrasonic technology for water and wastewater treatment," *Iranian J. Publ. Health*, vol. 38, no. 2, pp. 1-17, 2009.
- [4] M. Olvera, A. Eguía, K. Ilangovan, O. Rodríguez, E. Chong and S. D. Pillai, "Ultrasound as a sustainable technology for disinfection," *Memorias del 37° Congreso de Investigación y Desarrollo del Tecnológico de Monterrey, Campus Estado de México, México*, pp. 91-97, 2005.
- [5] M. Olvera, A. Eguía, O. Rodríguez, E. Chong, S. D. Pillai and K. Ilangovan, "Inactivation of *Cryptosporidium parvum* oocysts in water using ultrasonic treatment," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, pp. 2046-2049, 2008.
- [6] R. Balaji and O. B. Yaakob, "Emerging ballast water treatment technologies: A review," *J. Sustain. Sci. Manage.*, vol. 6, no. 1 pp. 126-138, 2011.
- [7] A. Gallipoli and C. M. Braguglia, "High-frequency ultrasound treatment of sludge: Combined effect of surfactants removal and floc disintegration" *Ultrason. Sonochem.*, vol. 14, no. 4, pp. 864-871, 2012.
- [8] C. M. Braguglia, M. C. Gagliano, S. Rossetti, "High frequency ultrasound pretreatment for sludge anaerobic digestion: effect on floc structure and microbial population," *Bioresour. Technol.* 2012 vol. 110, pp. 43-49.
- [9] R. A. Torres, C. Pétrier, E. Combet, M. Carrier and C. Pulgarin, "Ultrasonic cavitation applied to the treatment of bisphenol A. Effect of sonochemical parameters and analysis of BPA by-products." *Ultrason. Sonochem.*, vol. 15, pp. 605-611, 2008.
- [10] W. L. Peng, G. Xinxin and M. J. K. Bashir, "Ultrasound irradiation on the treatment of aromatic compounds in wastewater," *Wastewater Engineering: Advanced Wastewater Treatment Systems*. Available online at <http://www.ijsrpub.com/books>. ©2014 IJSRPUB (fecha de consulta: 24 abril de 2014).
- [11] E. Gonze, N. Commenges, Y. Gonthier and A. Bernis, "High frequency ultrasound as a pre- or a post-oxidation for paper mill wastewaters and landfill leachate treatment" *Chem. Eng. J.* vol. 92, pp. 215-225, 2003.
- [12] C. V. Chrysikopoulos, I. D. Manariotis and V. I. Syngouna, "Virus inactivation by high frequency ultrasound in combination with visible light," *Colloids and Surf. B Biointerfaces*, vol. 107, pp. 174-179, 2013.
- [13] T. J. Mason, E. Joyce, S. S. Phull, J. P. Lorimer, "Potential uses of ultrasound in the biological decontamination of water," *Ultrason. Sonochem.*, vol. 10, pp. 319-323, 2003.
- [14] E. Joyce, S. S. Phull, J. P. Lorimer and T. J. Mason, "The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured bacillus species," *Ultrason. Sonochem.* vol. 10, pp. 315-318, 2003.
- [15] I. Quesada-Peñate, C. Julcour-Lebigue, U. J. Jáuregui-Haza, A. M. Wilhelm and D. Henri, "Sonolysis of levodopa and paracetamol in aqueous solutions," *Ultrason. Sonochem.* vol. 16, pp. 610-616, 2009.
- [16] J. Luo, Z. Fang and R. L. Smith Jr, "Review: Ultrasound enhanced conversion of biomass to biofuels" *Progress in Energy and Combustion Science* (2013) <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2013.11.001>.
- [17] S. Shwartzman, A. Mayer and W. Kem W, "Megasonic particle removal from solid-state wafers," *RCA Rev.* vol. 46, pp 81-105, 1985.
- [18] K. Uchino and S. Hirose, "Loss mechanisms in piezoelectrics: how to measure different losses separately," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, vol. 48, pp. 307-321, 2001.
- [19] S. Lin and H. Tian, "Study on the sandwich piezoelectric ceramic ultrasonic transducer in thickness vibration," *Smart Mater. Struct.*, vol. 17, pp. 1-9, 2008.
- [20] W. P. Mason. *Electromechanical transducers and wave filters* (2nd ed), New York: Van Nostrand, 1942.
- [21] D. A. Berlincourt, D. R. Curran and H. Jaffe. *Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducer*. In: *Physical Acoustic*, vol. 1, Mason WP (eds). New York: Academic Press., pp. 169-270, 1964.
- [22] P. E. Bloomfield, "Multilayer transducer transfer matrix formalism," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.*, vol. 49, no. 9, pp. 1300-1311, 2002.
- [23] A. V. Mezheritsky, "Efficiency of excitation of piezoceramic transducers at antiresonance frequency," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.*, vol. 49, no. 4, pp. 484-494, 2002.
- [24] E. Moreno, G. González, L. Leija, O. Rodríguez, M. Castillo and M. Fuentes, "Performance analysis of ultrasono-therapy transducer with contact detection," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, vol. 50, no 6, pp. 743-747, 2003.