

# Modelado y simulación de sistemas de transducción piezoeléctrica para imagen por ultrasonidos

*J.L. San Emeterio, A. Ramos, P.T. Sanz  
Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas.  
Instituto de Acústica. C.S.I.C. Serrano 144, 28006 Madrid. España.*

PACS: 43.35-c

## Resumen

Se comentan brevemente algunos trabajos de investigación desarrollados en el Departamento de Señales, Sistemas y Tecnologías Ultrasónicas del Instituto de Acústica del CSIC, en torno al modelado y al desarrollo de software de simulación de Sistemas de Transducción Piezoeléctrica. Se hace énfasis en la evaluación de las características de sus respuestas en transmisión. La disponibilidad de modelos teóricos eficaces y precisos para las distintas etapas del proceso de formación de imagen por ultrasonidos desempeña un importante papel predictivo durante el desarrollo y validación de nuevas técnicas y procedimientos. En particular, resulta crucial para la optimización de sistemas de generación/recepción de señales ultrasónicas pulsadas en supuestos específicos de visualización.

## Summary

Research works developed in the Signals, Systems and Ultrasonic Technologies Department of the Institute of Acoustics of CSIC, concerning the modelling of Piezoelectric Transduction Systems, as well as the development of appropriated simulation software, are commented briefly. The evaluation of the characteristics of their transmission response is emphasised. The availability of efficient and accurate theoretical models for the different subsystems in the ultrasonic image formation process plays an important predictive role during the deve-

lopment and validation of new techniques and procedures. It is particularly crucial in the optimization of pulsed ultrasonic signal generation/reception systems.

---

## Transductores Piezoeléctricos

En general, las aplicaciones de los ultrasonidos en procesos de visualización implican excitaciones impulsionales de los transductores centradas en torno a frecuencias del orden de los Megahercios, con el fin de generar pulsos US de corta duración, lo que permite obtener una alta resolución axial.

La mayoría de los dispositivos transductores que vienen siendo empleados en aplicaciones de visualización y detección ultrasónicas están basados en el efecto piezoeléctrico. Al final de la década de los 80, en la que se inician nuestros trabajos en esta temática, se sigue utilizando frecuentemente el circuito equivalente simplificado (Butterworth-Van Dyke o RLC) para analizar el comportamiento de los transductores, aunque se dispone tanto de modelos matriciales como de modelos circuitales más complejos y precisos (Mason, Redwood, KLM). Sin embargo, la utilización de estos modelos más complejos era aun limitada, existiendo incluso dudas importantes sobre su diferente nivel de aproximación [1]. Nuestros trabajos iniciales en esta temática se centraron en profundizar en los principios físicos de funcionamiento de los transductores piezoeléctricos para la generación y recepción de los ultrasonidos así como en desarrollar herramientas software, no disponibles comercialmente, para su simulación y diseño. Se implementaron los modelos, Mason y

KLM, en un "superordenador" CYBER 180/855, desarrollando también el software específico de presentación gráfica, que utilizaba el paquete GPR-100, en un plotter BENSON. Mencionamos estos equipos específicos de cálculo y presentación gráfica para resaltar el distinto grado de dificultad en el desarrollo de software durante esa época en comparación con los ordenadores personales actuales y lenguajes tipo MATLAB que afortunadamente incluyen en una simple instrucción complejas operaciones de cálculo (p.e. fft, ifft).

Los programas desarrollados permitieron analizar el comportamiento de los transductores de banda ancha en función de las características electromecánicas del substrato piezoeléctrico y de los parámetros constructivos del transductor [2-4]. Uno de los requisitos más importantes impuestos a los transductores piezoeléctricos por las aplicaciones de visualización ultrasónica es tener una gran anchura de banda en emisión / recepción. Para conseguirlo existen tres métodos clásicos: a) Amortiguamiento mecánico en la cara trasera del transductor; b) Adaptación de impedancias mecánicas en su cara frontal; y c) Adaptación de impedancias eléctricas. Los programas desarrollados incluyeron también sistemas sencillos de análisis de estos factores, para un funcionamiento en régimen de pulso-eco, proporcionando una herramienta de evaluación en la búsqueda de compromisos entre criterios contrapuestos de diseño. En dos trabajos publicados en Mundo Electrónico [2-3], quizás la revista de habla hispana de mayor impacto en las áreas de electrónica, informática y automática en aquella época, se analizó el origen de los distintos circuitos equivalentes para transductores en banda ancha y se mostró y explicitó su total equivalencia. En el trabajo publicado en Anales de Física [4] se describió y detalló una sencilla metodología para la implementación del modelo KLM. Avances posteriores [6-11] han permitido profundizar en diversos aspectos de modelado y diseño, así como en la relación entre modelos precisos, parámetros circuitales y constantes de transducción.

En la década de los 90, el mejor conocimiento de estos modelos de transducción piezoeléctrica en banda ancha, así como la disponibilidad de lenguajes de simulación más sencillos, ha hecho que su utilización sea frecuente en los grupos especializados. No obstante, en la inmensa mayoría de los casos se supone una excitación en onda continua (cw) o con un tren de pulsos sinusoidales, para evaluar las características de los transmisores piezoeléctricos.

## Un modelo global compuesto por distintos subsistemas

La influencia específica de circuitos prácticos de excitación impulsional, así como las interacciones electromecánicas presentes suelen despreciarse en la práctica totalidad de los casos. La forma temporal de la vibración de la super-

ficie del transductor, su contenido frecuencial, así como la eficiencia del proceso de transducción dependen, no solo de una selección o un diseño adecuados del transductor, sino también de posibles redes eléctricas de adaptación y/o sintonización en banda ancha y de la forma del pulso eléctrico de excitación. Por otra parte, las características del haz ultrasónico emitido dependen fundamentalmente de la vibración y de la geometría de la superficie radiante. Para incluir debidamente estos aspectos, los esfuerzos se centraron posteriormente en la elaboración de un modelo del proceso global de transducción para aplicaciones de visualización ultrasónica. Un modelo global, a nivel de subsistema transmisor, debe integrar distintos modelos parciales: a) la electrónica de excitación impulsional; b) el transductor piezoeléctrico de banda ancha; c) los sistemas de adaptación de impedancias, tanto mecánicas como eléctricas; y d) la difracción ultrasónica en régimen impulsional para evaluar la estructura del haz ultrasónico emitido. Desde el punto de vista científico, en la elaboración de un modelo global de este tipo confluyen varios campos de gran interés: generación electrónica eficiente de "spikes" de AT, transducción piezoeléctrica de AF, difracción ultrasónica en aperturas no convencionales, a los que el carácter impulsional o transitorio de los fenómenos físicos involucrados confieren una relevancia especial.

Por ello, en paralelo con las actividades de simulación de transductores, y para poder analizar con precisión la influencia de la excitación electrónica en la emisión de pulsos ultrasónicos y en la eficiencia ecográfica, hemos ido estableciendo algunos modelos para los subsistemas de generación de "spikes" de alta tensión, con diversos grados de aproximación en función de la necesidad creciente de ir reflejando su incidencia real en las señales de banda ancha resultantes. Ante la ausencia de modelos adecuados para las etapas excitadoras en visualización, propusimos inicialmente modelos circuitales muy básicos [12,13], posteriormente ampliados con la inclusión de nuevos aspectos relevantes para la simulación y optimización de respuestas ultrasónicas temporales en aplicaciones de imagen [14-17]. Como herramienta complementaria en modelización, obtuvimos expresiones analíticas útiles para la descripción frecuencial en aproximación lineal de los pulsos de disparo. Estas expresiones caracterizan bastante bien la excitación en muchos casos prácticos de generación mediante descarga capacitiva donde los pulsos resultan relativamente anchos [15,17]. La simulación de dichos modelos circuitales se ha implementado utilizando programas comerciales de análisis de circuitos (Pspice). Estas implementaciones, unidas a un software específico de desarrollo propio, nos han permitido efectuar simulaciones numéricas de etapas transmisoras tanto en el dominio del tiempo como en de la frecuencia. Con estas herramientas hemos podido analizar en detalle los distintos modelos haciendo especial énfasis en aspectos, como la no linealidad de algunos componentes o ciertos efectos parási-

tos y distorsionantes de origen reactivo, cuyo análisis teórico riguroso resulta singularmente complejo [15,18]. Esta capacidad de evaluación y predicción nos ha permitido también optimizar la configuración de los transmisores piezoeléctricos bajo diversos supuestos de visualización ultrasónica para END y analizar sus respuestas ante transductores diversos.

Por otra parte, complejos fenómenos transitorios de difracción desempeñan un papel muy importante en la forma temporal y la estructura espacial del haz ultrasónico emitido por el transmisor piezoeléctrico en aplicaciones de imagen. Tradicionalmente, los fenómenos de difracción han sido tratados en las aplicaciones de ingeniería por medio de aproximaciones. En particular, en los campos específicos de radar y ciertas aplicaciones sonar, donde se usan excitaciones casi-armónicas, se utilizan normalmente las aproximaciones de Fresnel o Fraunhofer. En el área concreta de la visualización ultrasónica, los problemas de difracción presentan unas características y dificultades específicas: a) la atención se centra frecuentemente en zonas de exploración situadas en el campo cercano de los transductores; b) los pulsos difractados son de banda muy ancha; c) las aperturas de geometría poco convencional, como la rectangular, son frecuentes. En diversos trabajos se abordó el análisis riguroso y la simulación numérica de la difracción ultrasónica en condiciones de campo cercano y bajo excitación en banda ancha, evaluando también la influencia de distintas condiciones de contorno [19-23]. Una parte importante de los trabajos se centró en la problemática específica que se plantea con aperturas rectangulares, de gran interés práctico ya que esta geometría se presenta en monoelementos y bicristales en END, así como en arrays eco-gráficos lineales y matriciales. Como resultado de especial relevancia, se presentó [19,20] la solución analítica exacta, en forma cerrada, sin ningún tipo de aproximación de campo lejano o paraxial, para el campo ultrasónico (campo escalar de difracción) generado por un transductor rectangular bajo excitación impulsional y uniforme de la superficie radiante. Se trata de una solución global y explícita, no disponible previamente, que no utiliza la superposición de soluciones parciales. Es válida para cualquier punto del espacio insonificado, bajo distintas condiciones de contorno (baffle rígido, blando, y campo libre). Esta solución constituye la base de un método de cálculo preciso y eficiente, y permite una interpretación física de las características espacio-temporales del campo ultrasónico generado por transductores rectangulares, tanto en régimen transitorio como estacionario.

#### *Aspectos en exploración ultrasónica multitransductor*

Se han abordado también aspectos de modelado y simulación de transmisores piezoeléctricos en procedimientos de

exploración ultrasónica multicanal, tanto en forma multiplexada como bajo excitación múltiple controlada para focalización electrónica. El campo ultrasónico generado por arrays pulsados se obtiene, normalmente, superponiendo las respuestas individuales de los elementos transductores. Posibles procesos de control de los haces ultrasónicos, tales como la deflexión y la focalización electrónica en emisión (que se realizan controlando digitalmente el instante de disparo de los monoelementos), así como la utilización de apodizaciones, pueden tomarse en consideración mediante la introducción de retardos y pesos adecuados en el proceso de superposición [22]. Con este enfoque cobra especial relevancia la difracción ultrasónica en un monoelemento de array, puesto que constituye la base para analizar el comportamiento de distintos tipos de lentes ultrasónicas generadas electrónicamente con arrays lineales [19,22,23].

En resumen, la utilización de modelos circuitales y computacionales eficaces y precisos, y su simulación por ordenador, permiten predecir el comportamiento de los distintos subsistemas, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Ello ha desempeñado un papel crucial para la optimización de sistemas de generación/recepción de señales ultrasónicas pulsadas en supuestos específicos de visualización [18]. Es de destacar en este sentido que la actuación conjunta sobre los distintos subsistemas en juego abre la posibilidad de mejorar simultáneamente tanto la sensibilidad como la anchura de banda de la respuesta global, cuando se conoce íntimamente la respuesta tiempo-frecuencial de cada una de las etapas que intervienen [14,17,18]. Por ello, el grupo de investigación en "visualización y detección ultrasónicas" ha profundizado en estos temas de modelado y simulación de procesos de excitación electrónica impulsional, transducción piezoeléctrica en banda ancha, y difracción ultrasónica impulsional en aperturas no convencionales. Como consecuencia de estas actividades, se han propuesto nuevos modelos específicos, se han desarrollado nuevos algoritmos y se dispone de software de desarrollo propio para el análisis de algunos procesos en formación de imagen por ultrasonidos.

## Agradecimiento

Expresamos nuestro agradecimiento a todas las personas que han contribuido en distintos momentos a esta temática y muy especialmente a los componentes de la U.E.I. de Ultrasonidos donde se inició. Este trabajo ha sido realizado con financiación del proyecto CICYT TAP1999-0864.

## Bibliografía

- [1] M.G. Silk. "Ultrasonic transducers for Nondestructive Testing", Adam Hilger Ltd., Bristol, p. 40, (1984).
- [2] J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, A. Ramos, E. Riera. "Modelado teórico de transductores piezoeléctricos multicapa para aplicaciones ecográficas: Representaciones circuitales equivalentes". *Mundo Electrónico*, N° 187, pp. 159-165, (1988).
- [3] J.L. San Emeterio, A. Ramos, P.T. Sanz, E. Riera. "Modelado teórico de transductores piezoeléctricos multicapa para aplicaciones ecográficas: Análisis en el dominio de la frecuencia". *Mundo Electrónico*, N° 186, pp. 85-90, (1988).
- [4] J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, E. Riera, A. Ramos. "Una implementación del modelo KLM para transductores piezoeléctricos en modo espesor". *Anales de Física, B*. Vol. 84, pp. 11-19, (1988).
- [5] J.L. San Emeterio Prieto, M.S. Sánchez Sánchez, F.R. Montero de Espinosa. "Circuitos equivalentes de resonadores piezoeléctricos con inclusión de pérdidas mecánicas". *Anales de Física, B*. Vol. 87, pp. 194-207, (1991).
- [6] J.L. San Emeterio Prieto. "A comparative study of one-dimensional models for piezoelectric resonators with mechanical losses". *Ferroelectrics*, Vol. 128, pp. 55-60, (1992).
- [7] J.L. San Emeterio. "Determination of electromechanical coupling factors of low Q piezoelectric resonators operating in stiffened modes". *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, Vol 44, N°. 1, pp. 1-6, (1997).
- [8] A. Ramos, P.T. Sanz, J.L. San Emeterio. "Adaptación eléctrica en régimen transitorio de transceptores piezoeléctricos para formación de imagen ultrasónica". *Revista de Acústica*, Vol. XXVIII, N° 3-4, pp. 33-35, (1997).
- [9] J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, A. Ramos. "Adaptación de impedancias mecánicas en procesos de transducción piezoeléctrica para visualización ultrasónica". *Revista de Acústica*, Vol. XXVIII, N° 3-4, pp. 29-31, (1997).
- [10] J.L. San Emeterio, P.T. Sanz, A. Ramos. "Influence of dielectric losses on the shift of the fundamental frequencies of thickness mode piezoelectric ceramic resonators". *Journal of the European Ceramic Society*, Vol 19, pp. 1165-1169, (1999).
- [11] J.L. San Emeterio, A. Ramos, P.T. Sanz, M. Cegarra. "Definition and measurement of the normalized electrical impedance of lossy piezoelectric resonators for ultrasonic transducers". *Ultrasonics*, Vol 38, pp. 140-141, (2000).
- [12] A. Ramos, P.T. Sanz, F.R. Montero, E. Riera. "Generación eficiente de impulsos ultrasónicos breves con MOS-FET: Análisis temporal del impulso de disparo. Influencia de la carga". *Mundo Electrónico*, N° 168, pp. 117-124, (1986).
- [13] A. Ramos, P.T. Sanz, F.R. Montero. "Broad band driving of echographic arrays using 10ns-500V efficient pulse generators". *Ultrasonics*, Vol. 25, pp. 221-228, (1987).
- [14] A. Ramos, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz. "Electrical matching effects on the piezoelectric transduction performance of a through-transmission pulsed process". *Ferroelectrics*, Vol. 202, pp. 71-80, (1997).
- [15] P.T. Sanz, A. Ramos, J.L. San Emeterio. "Distortions on the output waveforms of high-voltage spike generators induced from piezoelectric loads". *Ferroelectrics*, Vol. 224, pp. 47-54, (1999).
- [16] A. Ramos, J.L. San Emeterio, P.T. Sanz. "Dependence of pulser driving responses on electrical and motional characteristics of NDE ultrasonic probes". *Ultrasonics*, Vol. 38, N° 1-8, Marzo, pp. 553-558, (2000).
- [17] A. Ramos, J.L. San Emeterio y P.T. Sanz. "Different tuning contributions in piezoelectric transceivers improving transient signals for ultrasonic imaging". *IEEE Internat. Symp. Applications of Ferroelectrics*, IEEE Cat. Num. 98CH36245, NJ, USA, pp. 251-254, (1999).
- [18] A. Ramos, J. L. San Emeterio, and P. T. Sanz. "Improvement in Transient Piezoelectric Responses of NDE Transceivers Using Selective Damping and Tuning Networks". *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, Vol. 47, N° 4, Julio (2000).
- [19] L. Gómez-Ullate, J.L. San Emeterio, "A new algorithm to calculate the transient near-field of ultrasonic phased arrays". *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, Vol. 39, N°. 6, pp. 745-753, (1992).
- [20] J.L. San Emeterio, L. Gómez-Ullate. "Diffraction impulse response of rectangular transducers". *Journal of the Acoustic Society of America*, Vol 92, pp. 651-662, (1992).
- [21] F.J. Rodríguez, A. Ramos, J.L. San Emeterio, E. Riera. "Influencia de las condiciones de contorno en la radiación ultrasónica impulsional de un transductor de inmersión". *Anales de Física*, Vol. 89, N° 1, pp. 25-44, (1993).
- [22] L. Gómez-Ullate, A. Ramos, J.L. San Emeterio. "Analysis of the ultrasonic field radiated by time-delay cylindrically focused linear arrays". *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Cont.*, Vol 41, N°. 5, pp. 749-760, (1994).
- [23] J.L. San Emeterio, L.G. Ullate, A. Ramos. "Ultrasonic radiation from echographic linear array transducer elements". *Anales de Física*, Vol. 92, N° 2, pp. 85-93, (1996).