

# Transductor Piezopolimérico para Sistemas Sensoriales Ultrasónicos

A. Jiménez, A. Hernández, J. Ureña, C. De Marziani, M. C. Pérez, F. Álvarez, J. J. García,  
S. Pérez, A. Cañamero, M. Mazo

Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá.  
E. P. S. Campus Universitario s/n, E-28806 Alcalá de Henares (Madrid).

**Abstract** — Recientemente se ha demostrado la utilidad que pueden tener los polímeros celulares cuasipiezoeléctricos en diversas aplicaciones. En este trabajo se describe la fabricación y caracterización de un transductor emisor de ultrasonidos utilizando láminas poliméricas electromecánicas. Se ha comprobado que estos transductores tienen un ancho de banda prácticamente plano en el rango de 30kHz a 140kHz. Ésta es la característica más interesante para los sistemas sensoriales ultrasónicos avanzados, donde la codificación de la emisión con secuencias binarias, y los esquemas de modulación empleados requieren de anchos de banda considerables, de forma que pueda llevarse a cabo la transmisión convenientemente.

## I. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que los materiales poliméricos son firmes candidatos para el desarrollo de transductores acústicos y/o ultrasónicos; probablemente el más conocido es el Polifluoruro de Vinilideno (PVDF) [1] [2]. En los últimos años, el interés científico por el almacenamiento de carga en polímeros celulares y *electrets* inorgánicos porosos ha ido en aumento, lo que ha dado lugar a nuevas alternativas. Una de ellas son los nuevos polímeros eléctricos, que se caracterizan porque su carga almacenada proviene de dipolos generados artificialmente en cavidades o en poros. Estos dipolos de ingeniería son fácilmente deformables, dando lugar a grandes cambios en su momento dipolar, lo que les hace ser muy atractivos para aplicaciones mecánicas, térmicas o eléctricas. El resultado macroscópico es similar al obtenido con polímeros piezo, piro, o ferroeléctricos. Éste es el caso de las láminas electromecánicas (ElectroMechanical Film: EMFi) [3] [4], en las que se centra este trabajo. Diversos autores ya han demostrado las propiedades de dicho material para múltiples aplicaciones [5] [6] [7] [8].

Los sensores ultrasónicos tienen una elevada implantación en aplicaciones de detección de obstáculos y captación en robots móviles debido, en gran medida, a su buena relación entre prestaciones, precio y sencillez [9] [10] [11] [12] [13] [14]. La mayoría de dichas aplicaciones se basan en la determinación de distancias a partir de la medida de tiempos de vuelo (TDV) del eco de una señal ultrasónica [14] [15]. Normalmente, una determinación precisa de los TDVs pasa por el empleo

de técnicas de correlación en la recepción [15] [16] [17]. La correlación de la señal permite aumentar la precisión de la medida y la resolución espacial (pudiendo identificar ecos solapados). Por otro lado, cabe destacar que una codificación adecuada hace posible la emisión simultánea, y la posterior recepción discerniendo las distintas emisiones sin interferencias mutuas (códigos emitidos ortogonales), reduciéndose así los tiempos de exploración. La codificación de la emisión ultrasónica con una secuencia característica, debe ser adaptada a las especificaciones en frecuencia del transductor mediante un proceso de modulación [18]. Dicho proceso puede presentar diversos esquemas dependiendo del número de secuencias a emitir simultáneamente, lo cual determina la longitud del intervalo de emisión. Parece obvio que el ancho de banda del transductor empleado puede limitar la codificación y en mayor medida la modulación a realizar.

Por lo tanto, la evolución de los procesos de codificación y la tendencia a sistemas con emisiones simultáneas, basándose en la técnica de Acceso Múltiple por División de Código mediante Secuencias Directa (DS-CDMA: Direct Sequence Code Division Multiple Access), requiere en ciertas aplicaciones de transductores con elevados anchos de banda. En este sentido, el desarrollo de transductores basados en láminas de EMFi supone una alternativa, ya que los transductores ultrasónicos electrostáticos o piezocerámicos comerciales suelen caracterizarse por un limitado ancho de banda.

En este trabajo se presenta el diseño de un transductor piezoeléctrico polimérico basado en láminas de EMFi, especialmente contemplado para su aplicación en sistemas sensoriales ultrasónicos. En la sección II se describen las láminas de EMFi utilizadas así como la fabricación del transductor propuesto. La sección III detalla el sistema hardware propuesto para el acondicionamiento del transductor y los resultados obtenidos de la caracterización del transductor como emisor. Finalmente, las principales conclusiones son comentadas en la sección IV.

## II. FABRICACIÓN DEL TRANSDUCTOR PIEZOELÉCTRICO

### A. Material piezopolimérico.

La lámina de EMFi es una espuma de polipropileno a la cual se le somete a una elevada tensión biaxial durante su proceso de fabricación para generar láminas delgadas. El resultado es la deformación de las burbujas que adquieren aspecto de lenteja, con diámetros entre 10 y 70 $\mu\text{m}$  y espesores entre 1 y 5  $\mu\text{m}$  [1], [7], como muestra la imagen de la figura 1. Seguidamente se le aplica una alta descarga, superior a 10kV, que polariza la lámina de forma que se alcance la ruptura dieléctrica en las cavidades, quedando así cargadas de forma permanente. Este proceso da lugar a la formación de dipolos macroscópicos permanentes (véase la figura 1) asociados a las distintas oquedades de la estructura. La consecuencia macroscópica de este hecho es un comportamiento cuasi-piezoeléctrico caracterizado por una elevada constante dieléctrica longitudinal ( $d_{33}$ ), cuyo valor oscila entre 90 y 130 pC/N dependiendo de los autores [7] [8]. En cualquier caso estos polímeros porosos cuasi-piezoeléctricos presentan una constante piezoeléctrica longitudinal mucho mayor que otras alternativas, como el PVDF. Este hecho puede deberse al reducido módulo de Young ( $<1\text{MPa}$  [19]) que presentan, lo que justificaría a su vez la baja impedancia acústica que le caracteriza ( $Z=\sqrt{\rho Y}=2.6\cdot 10^4 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ ). Las láminas utilizadas tienen un espesor nominal de 70  $\mu\text{m}$ , y una permitividad relativa de 1.2 según el suministrador [19].

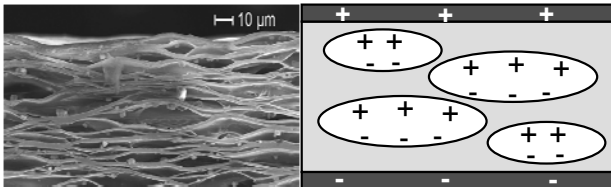


Fig. 1. Micrografía de la sección transversal de una lámina de EMFi por microscopía electrónica de barrido (original de [1]) (a). Representación esquemática de la estructura y distribución asimétrica de la carga (b).

### B. Montaje del transductor

La lámina de EMFi, metalizada por una única cara, fue cortada en trozos rectangulares, los cuales se pegaron con tintura de plata sobre un electrodo de Cu definido sobre un soporte de fibra de vidrio. De esta forma se ha fabricado un sencillo prototipo de transductor con un área activa de 1.5 x 1.3  $\text{cm}^2$ , como se muestra en la figura 2.

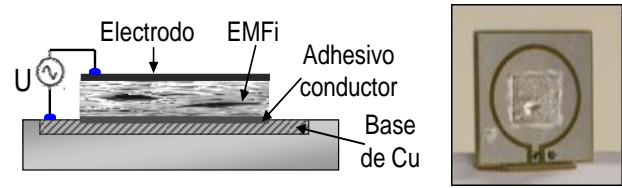


Fig. 2. Representación esquemática del corte transversal del transductor utilizado (a). Fotografía del prototipo de transductor fabricado (b).

El reducido peso y espesor de estas láminas hace a este material una opción muy atractiva para el desarrollo de transductores de diversos tamaños o geometrías, llegando a permitir el diseño de patrones de emisión/recepción específicos. Sin embargo, su rango de trabajo se restringe a temperaturas entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$ , lo que puede limitar su posible aplicación en diversas áreas [3].

## III. CARACTERIZACIÓN DEL TRANSDUCTOR COMO EMISOR

### A. Sistema de acondicionamiento

La caracterización acústica del transductor previamente descrito se ha llevado a cabo en una sala aislada. Como referencia se ha utilizado un micrófono de Brüel and Kjaer (4939: de campo libre de cuarto de pulgada). A. Streicher *et al.* han mostrado que existe una gran dependencia entre la oscilación en modo espesor, es decir, el desplazamiento de la lámina, y la tensión de excitación aplicada [8]. Por lo tanto, para obtener niveles de presión acústica (SPL: Sound Pressure Level) significativos, es necesario excitar al transductor con elevadas tensiones, del orden de 300V<sub>pp</sub>. Además, la caracterización a través de un vibrómetro láser ha demostrado que el desplazamiento de la lámina es estable entre 20kHz y 200 kHz, por encima de los cuales aparece una frecuencia de resonancia [8]. En base a estos datos se han fijado las especificaciones de trabajo del transductor y, por lo tanto, de la etapa de acondicionamiento del mismo.

La etapa de excitación en emisión consta de un primer módulo de control que lleva a cabo la codificación digital de la señal ultrasónica a emitir, seguido de una etapa de acondicionamiento que adecua dicha señal codificada a las características específicas del transductor, tal y como muestra de forma esquemática la figura 3. La codificación y generación de la señal se lleva a cabo en un reducido sistema digital basado en una FPGA [20].

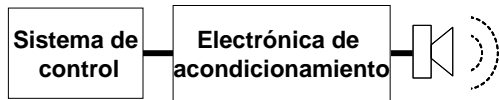


Fig. 3. Diagrama de bloques del sensor.

Como se ha dicho previamente, para el funcionamiento eficiente del transductor de EMFi es necesaria la aplicación de altas tensiones de excitación, concretamente en el rango de 300-600V<sub>pp</sub> [8]. Estas elevadas tensiones no son una característica exclusiva del EMFi, ya que se pueden encontrar en el mercado muchos otros ejemplos, como el caso del transductor electrostático Polaroid [21].

Para el óptimo diseño del sistema de acondicionamiento se debe partir de las exigencias que establece el transductor EMFi, en cuanto a tensión de excitación, ancho de banda, y su capacidad equivalente (en este caso 14pF/cm<sup>2</sup> [3]). Esta etapa recibe la señal procedente de una etapa de conversión D/A, tras haberse generado la codificación en un dispositivo FPGA. La etapa de acondicionamiento amplifica la amplitud de esta señal de 5V<sub>pp</sub> hasta 500V<sub>pp</sub> aproximadamente, minimizando distorsiones y considerando que el equivalente eléctrico ideal del transductor EMFi es un condensador de reducidos valores.

El diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento desarrollado se muestra en la figura 4. Éste se basa en una amplificación previa al transformador de tensión para hacer más asequible el factor de transformación de este último. El circuito consta de una etapa inicial de amplificación (de ganancia 8) a través de un operacional LM318 [22] no inversor, con ancho de banda y *slew-rate* suficientes para la aplicación. Seguidamente la señal pasa a un amplificador de clase B, con transistores bipolares complementarios y una ganancia unidad. Finalmente, la salida amplificada se conecta a la etapa del

transformador.

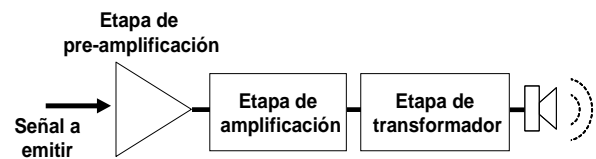


Fig. 4. Diagrama de bloques del sistema de acondicionamiento desarrollado para el emisor con una lámina de EMFi.

El transformador se caracteriza por una relación de transformación de 15,28 y una inductancia del primario y secundario de 3mH y 0.7H, respectivamente. Además, la resistencia óhmica del primario y secundario es de 0.15Ω y de 36.8Ω. El diagrama de Bode del sistema muestra que se ajusta al ancho de banda de trabajo. El esquema eléctrico completo de la etapa de acondicionamiento descrita se muestra en la figura 5.

## B. Resultados de la caracterización

La presión sonora emitida por el EMFi se ha medido situando el micrófono a 25cm y alineado con su eje axial. El transductor es excitado con una señal sinusoidal de 300V<sub>pp</sub>, haciendo un barrido en frecuencia desde 15kHz a 140 kHz. Como puede observarse en la figura 6, la repuesta es estable en el rango de frecuencias estudiado.

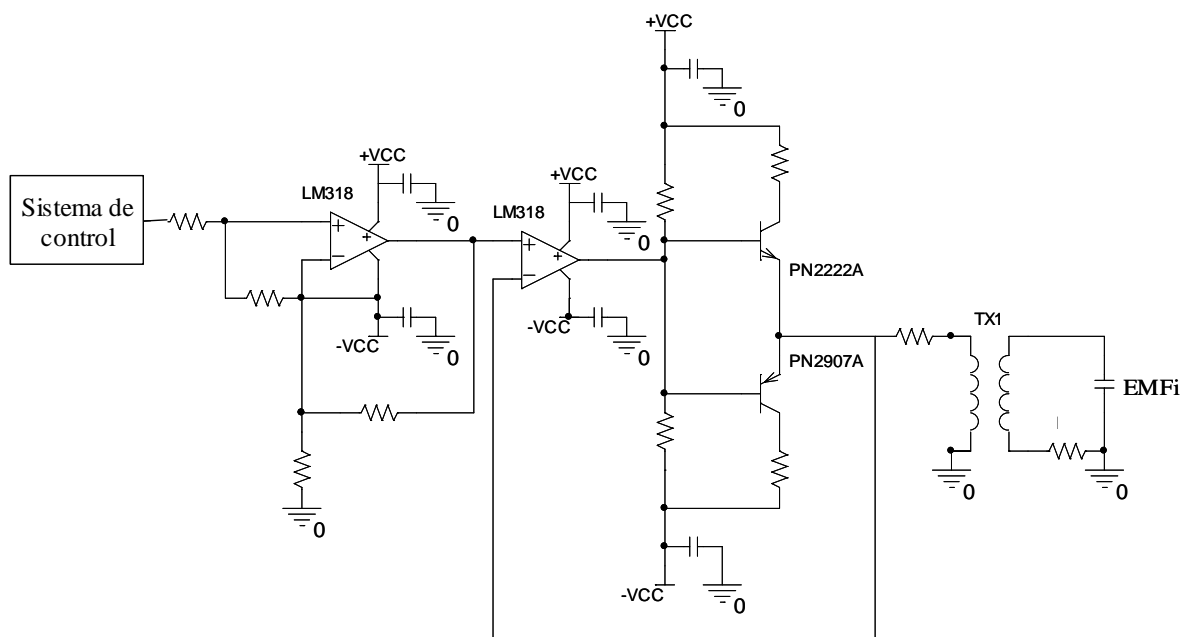


Fig. 5. Esquema eléctrico del circuito de emisión.

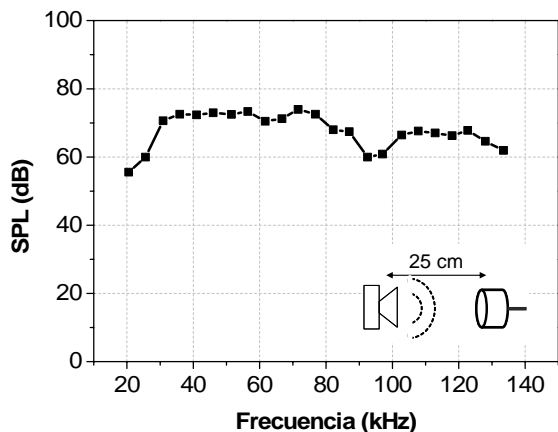


Fig. 6. Nivel de presión acústica (SPL) frente a la frecuencia con el emisor de EMFi y con un receptor de Bruel&Kjaer.

La caracterización del emisor de EMFi se ha completado con el patrón de emisión a distintas frecuencias. En la figura 7 se muestra el patrón obtenido para 30 y 80 kHz. Se observa un lóbulo principal en el eje acústico con uno o dos laterales de menor intensidad dependiendo de la frecuencia. Como puede observarse al aumentar la frecuencia la respuesta es más directiva. La apertura a 30kHz se estima en torno a los 20° para -6dB.

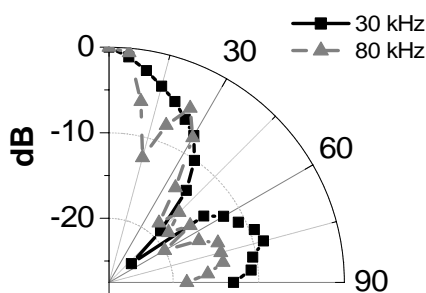


Fig. 7. Patrón de emisión del transductor EMFi a 30 y 80 kHz.

#### IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado la fabricación y caracterización de un transductor de ultrasonidos basado en láminas EMFi. Los resultados han demostrado que estos transductores de polímero celular cuasi-piezoelectrico pueden ser unos candidatos adecuados como sensores de gran ancho de banda en sistemas sensoriales de ultrasonidos. Éstos podrían trabajar en un rango entre 30kHz y 140kHz con una respuesta casi plana. Por otro lado, se ha comprobado que presentan una apertura aceptable a bajas frecuencias (20° a 30kHz). También cabe destacar que la flexibilidad del material facilita la fabricación de transductores con diversas geometrías.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación de la Universidad de Alcalá (proyecto ISUAP PI2004/033), y a la Consejería de Educación de la Comunidad de Madrid (proyecto ANESUS: CAM-UAH2005/016). Así mismo se agradece la colaboración prestada por el CATECHOM de la UAH por ceder sus instalaciones para la caracterización.

#### REFERENCIAS

- [1] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt, G. M. Sessler, "Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers", *Physics Today*, pp.37-43, Febrero 2004.
- [2] E. Fukada "History and Recent Progress in Piezoelectric Polymers", *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 47, n°6, pp. 1277-1290, 2000.
- [3] M. Paajanen, J.Lekkala, K.Kirjavainen, "ElectroMechanical Film (EMFi) – a new multipurpose electret material", *Sensor and Actuators A*, vol. 84, pp. 95-102, 2000.
- [4] G.S. Neugschwandfner, "Larg and broadband piezoelectrectricity in smart polymer-foam space-charge electrets", *Applied Physics Letters*, vol. 77, n°23, pp. 3827-3839, 2000.
- [5] G. Evreinov, R. Raisamo, "One-directional position-sensitive force transducer based on EMFi", *Sensors and Actuator A*, 123-124, pp. 204-209, 2005.
- [6] M. Antila, J. Kataja, V. Välimäki "Sound directivity control using striped panel loudspeaker", *AES 110th convention*, Amsterdam, The Netherlands, 2001.
- [7] R. Kressmann, "New piezoelectric polymer for air-borne and water-borne sound transducers", *J. Acoustical Society of America*, vol. 109, n°4, pp. 1412-1416, 2001.
- [8] Alexander Streicher, Rolf Müller, Herbert Peremans, Reinhard Lerch, "Broadban Ultrasonic transducer for a Artificial Bat Head", *IEEE ultrasonics Symposium*, pp. 1364-1367, 2003.
- [9] J. Borenstein, Y. Koren, "Obstacle avoidance with ultrasonics sensors", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 2, pp. 213-218, 1988.
- [10] K. Audenaert, H. Peremans, Y. Kawahara, and J. Van Campenhout, "Accurate ranging of multiple objects using ultrasonic sensor", *Proc. 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1733-1738, Nice, 1992.
- [11] H. R. Everett, *Sensors for mobile robot*, Ed. A K Peters, Ltd., 1995.
- [12] L. Kleeman, R. Kuc, "Mobile robot sonar for target localization and classification", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 14, no. 4, pp. 295-318, 1995.
- [13] J. Borenstein, Y. Koren, "Error Eliminating Rapid Ultrasonic Firing for Mobile Robots Obstacle Avoidance", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 11(1), pp. 132-138, 1995.
- [14] H. Hamadene, H. Colle, "Optimal estimation of the range for mobile robots using ultrasonic sensors", *Proc. 3rd IFAC Symposium on Intelligent Components and Instrument for Control Applications (SICICA'97)*, pp. 141-146, Annecy (France), 1997.
- [15] H. Peremans, A. Koenraad, J. Van Campenhout, "A High-Resolution Sensor Based on Tri-aural Perception", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 1, pp. 36-48, 1993.

- [16] S. A. Hovanesian, *Radar system design and analysis*, Artech house, Inc. Norwood, 1984.
- [17] J. Ureña, M. Mazo, J. J. García, A. Hernández, E. Bueno, "Correlation detector based on a FPGA for ultrasonic sensors", *Microprocessors and Microsystems*, no. 23, pp. 25-33, 1999.
- [18] F. J. Álvarez, J. Ureña, J. J. García, Manuel Mazo, C. de Marziani, A. Hernández, J. M. Villadangos, "A comparative analysis of two modulation schemes for the efficient transmission of complementary sequences in a pulse compression ultrasonic system", *IADAT-tcn2004 International Conference on Telecommunications and Computer Networks*, San Sebastián (Spain), 2004.
- [19] EMFi Ltd., [www.emfit.com](http://www.emfit.com).
- [20] A. Hernández, J. Ureña, J. J. García, M. Mazo, J. P. Dérutin, J. Serot, "Estudio comparativo de arquitecturas para el tratamiento en tiempo real de la información procedente de transductores ultrasónicos con funcionamiento multi-modo", *Actas del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'02)*, vol. 2, pp. 201-204, Alcalá de Henares, 2002.
- [21] Polaroid Corporation, *Ultrasonic ranging systems*, 1991.
- [22] National Semiconductor, "LM118/LM218/LM318 Operational Amplifiers", *Datasheet Document*, 2000.