

Estudio y desarrollo de un sensor ultrasónico enfocado apto para tomografía optoacústica

Study and development of a focused ultrasonic sensor suitable for optoacoustic tomography

Roberto M. Insabella^{*1}, Martín G. González^{*†}, David Barbieri[‡], Ligia Ciocci Brazzano^{*†}

^{*}Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería,
Grupo de Láser, Óptica de Materiales y Aplicaciones Electromagnéticas (GLOmAe)
Paseo Colón 850, C1063ACV, Buenos Aires, Argentina

[†]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, (CONICET)
Godoy Cruz 2290, C1425FQB, Buenos Aires, Argentina

[‡]Universidad Nacional de la Matanza
Florencio Varela 1903, B1754, San Justo, Buenos Aires, Argentina

¹rinsabella@fi.uba.ar

Recibido: 18/07/20; Aceptado: 08/09/20

Abstract—In this work we present the study, development and characterization of a cylindrical focused ultrasonic sensor based on a piezoelectric polymeric material. For the design and implementation of the transducer, we carried out simulations using the commercial tool k-Wave and we used a construction method with great repeatability and low cost. For the characterization of the detection system (sensor + amplifier), we made electrical and acoustic measurements that allowed to determine its sensitivity and equivalent pressure noise. The results of this work show that the implemented sensor is suitable for optoacoustic tomography.

Keywords: optoacoustic tomography; ultrasonic sensor; piezoelectric polymer.

Resumen— En este trabajo se presenta el estudio, desarrollo y caracterización de un sensor ultrasónico cilíndricamente enfocado basado en un material polimérico piezoeléctrico. Para su diseño se realizaron simulaciones usando la herramienta comercial k-Wave y para su implementación se utilizó un método de construcción que tiene una gran repetibilidad y un bajo costo. Para la caracterización del sistema de detección (sensor + amplificador) se hicieron mediciones eléctricas y acústicas que permitieron determinar su sensibilidad y ruido equivalente de presión. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el sistema de detección implementado es adecuado para ser utilizado en tomografía optoacústica.

Palabras clave: tomografía optoacústica; sensor ultrasónico; polímero piezoeléctrico.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la tomografía optoacústica (TOA) es obtener imágenes a partir de un conjunto señales optoacústicas (OA). El fenómeno OA es la generación de ondas acústicas debido a la expansión termoelástica de la muestra bajo estudio como consecuencia de la absorción de pulsos cortos de luz. Cuando la técnica OA es aplicada a TOA, la variación de presión generada por la excitación óptica es detectada por sensores ultrasónicos que rodean el área de interés.

Una configuración OA consiste de tres elementos básicos: una fuente de luz, un sistema de detección para obtener las señales acústicas y un sistema de procesamiento para reconstruir la imagen. Usualmente, el sistema de detección

está compuesto por un transductor ultrasónico sumergido en un recipiente con agua. El agua permite tener un buen acople acústico entre la muestra y el sensor. En TOA es posible agrupar a los sensores ultrasónicos en dos grandes categorías: i) piezoeléctricos (o capacitivos), en los cuales la señal eléctrica medida es directamente proporcional a la presión; ii) ópticos, los cuales son sensibles a los cambios de longitud del camino óptico producidos por las ondas de presión [1]. Los detectores piezoeléctricos son los más comúnmente utilizados y están basados en materiales poliméricos (banda ancha o no resonantes) o cerámicos (resonantes). En la actualidad, en comparación con los sensores ópticos, la tecnología piezoeléctrica otorga una gran sensibilidad a un bajo costo. Entre los polímeros piezoeléctricos, el más popular es el fluoruro de polivinilideno (PVDF) y sus copolímeros.

La forma y el tamaño de los detectores usados en TOA juegan un rol importante en la reconstrucción de la imagen. Un sensor puntual posee una gran resolución espacial. Sin embargo, transductores piezoeléctricos pequeños con zonas activas de detección en el rango de los micrómetros son difíciles de construir y poseen una baja sensibilidad. Una manera de sobrellevar este problema es usar detectores extensos (de gran área) y tomar en cuenta su forma y tamaño en los algoritmos usados para obtener la imagen [2]. Se considera que un sensor es extenso si el tamaño del detector es más grande que el tamaño del objeto bajo estudio. De esta forma, la señal recibida a un cierto tiempo está dada por el valor instantáneo de la integral del campo acústico sobre el área activa del sensor. Por lo tanto, la forma del sensor tiene una fuerte influencia en el perfil temporal de la señal OA medida.

En trabajos previos [3], [4] se ha implementado y caracterizado un sensor ultrasónico extenso lineal de banda ancha basado en una película delgada de PVDF. En [4] se demostró que este detector, en combinación con un amplificador de transimpedancia (TIA) de bajo ruido, es apto para su utilización en TOA. El método de construcción descrito en [3] posee muchas ventajas: fácil implementación, repetibilidad y bajo costo. Estas características lo vuelven

una opción interesante para el desarrollo de sistemas de detección formados por arreglos de sensores que permitan obtener imágenes en tiempo real.

En este trabajo se presenta el estudio, desarrollo y caracterización de un detector ad-hoc ultrasónico cilíndricamente enfocado usando el método de construcción descrito en [3]. En este sentido, un sensor enfocado tiene un gran ángulo de recepción en una dirección y uno estrecho en la dirección perpendicular a la anterior. Para su diseño se realizaron simulaciones usando la herramienta comercial k-Wave [5]. Para caracterizarlo se hicieron mediciones eléctricas y acústicas que permitieron determinar la sensibilidad y el ruido equivalente de presión del sistema de detección (sensor + amplificador). Para resaltar las características inherentes del sensor detecto enfocado (gran sensibilidad en la región de enfoque), los resultados obtenidos se comparan con aquellos provenientes de un sensor no enfocado (lineal) de características constructivas similares. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos para establecer si el sensor enfocado implementado es apto para TOA.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección II se presentan las simulaciones realizadas para diseñar el sensor enfocado y se describen los detalles principales de su construcción. En la sección III se muestran los esquemas experimentales implementados y los resultados obtenidos al realizar la caracterización eléctrica y acústica del sistema de detección (sensor + TIA), así como también se muestran las mediciones para un transductor no enfocado con geometría lineal. Finalmente, en la sección IV, se encuentran las conclusiones de este trabajo.

II. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR

Para el diseño del sensor se utilizó la herramienta numérica k-Wave que permite realizar simulaciones de ondas acústicas y de ultrasonido en medios complejos en el dominio del tiempo [5]. Las funciones que emplea esta herramienta están basadas en el método pseudoespectral del espacio k. Cabe destacar que es posible utilizarla con una unidad de procesamiento gráfico (GPU, por sus siglas en inglés). En la Fig. 1 se encuentra el esquema adoptado en las simulaciones, donde se puede apreciar un recipiente con agua (25 °C, $v_s = 1497$ m/s) que contiene también una fuente acústica esférica de radio $a = 100 \mu\text{m}$ y un sensor enfocado. El origen de coordenadas se encuentra en la fuente acústica. El recinto está representado por una grilla de $54 \times 926 \times 832$ puntos con una separación entre ellos de $25 \mu\text{m}$, lo que fija una frecuencia máxima en 30 MHz. El sensor simulado posee un radio de curvatura $R_s = 22.5$ mm, un espesor $d = 0.8$ mm, un perímetro de 24 mm y una profundidad $\delta = 25 \mu\text{m}$. El algoritmo devuelve la señal de presión en función del tiempo para los puntos seleccionados. El detector está representado por $N_d = 24704$ puntos, distribuidos uniformemente sobre su superficie. La presión acústica captada por el sensor es la suma de las N_d señales y un filtro pasa bajos emula la respuesta en frecuencia del sistema de detección.

Para obtener la sensibilidad del sensor en función de la distancia respecto de la fuente acústica, se usó el parámetro energía de señal detectada (ESD), definida como la integral en el tiempo del cuadrado de la presión acústica captada por

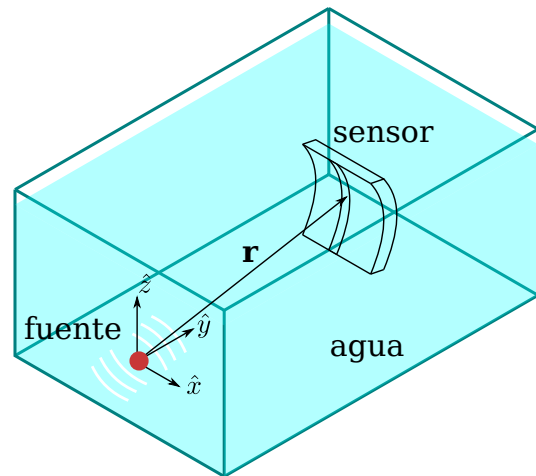


Fig. 1. Esquema utilizado para la simulación.

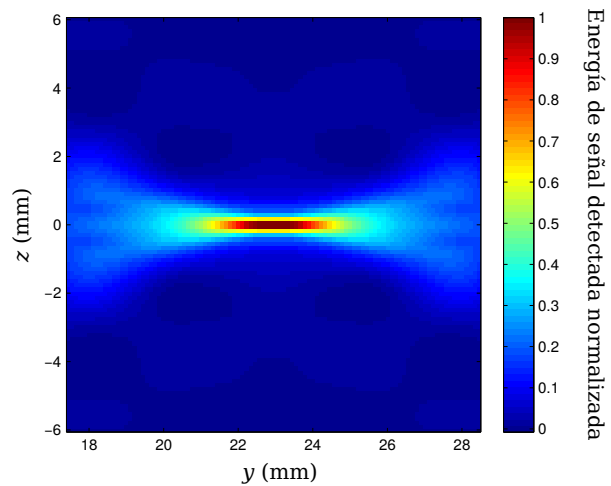


Fig. 2. Simulación de la energía de señal detectada (ESD) por un sensor enfocado en el plano YZ. El sensor tiene un radio de curvatura de 22.5 mm y un área activa de sensado de 24 mm x 0.8 mm. La fuente acústica es una esfera de radio $100 \mu\text{m}$ ubicada en el origen de coordenadas.

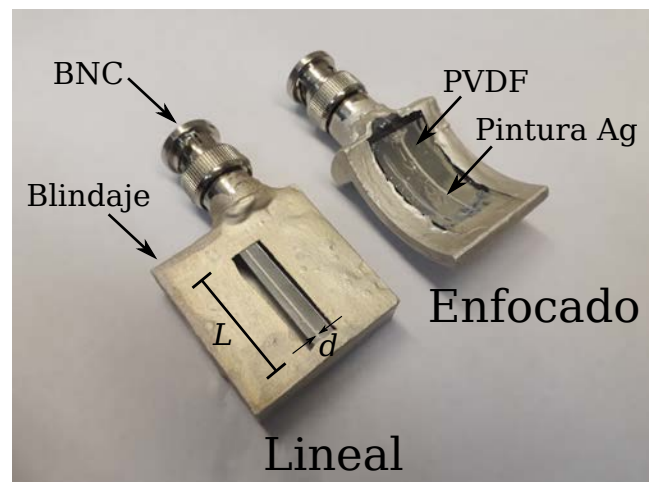


Fig. 3. Imagen de los sensores piezoeléctricos implementados.

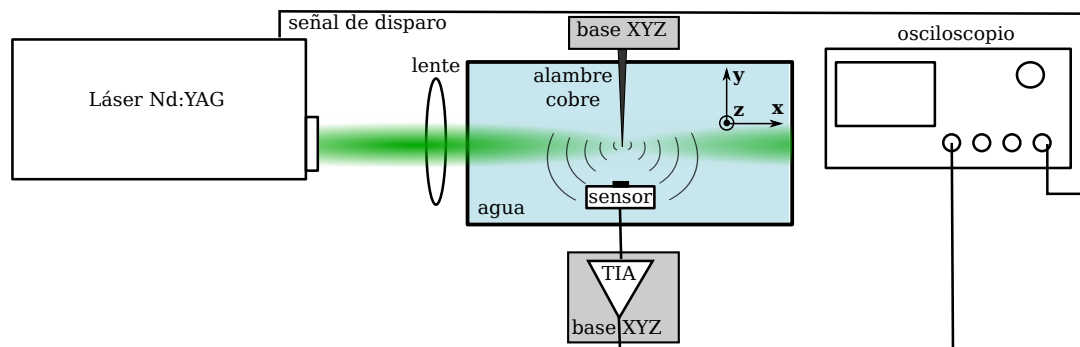


Fig. 4. Esquema experimental usado en la caracterización acústica de los sensores. El origen de coordenadas se encuentra en la fuente acústica (blanco de cobre).

el transductor [6]. En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos para el plano YZ. Se puede observar que existe una región de gran sensibilidad con centro en el foco del sensor (22.5 mm). Considerando una buena sensibilidad aquella con valores mayores a 0.5 de la *ESD* normalizada, la región tiene un área de (4 x 0.3) mm². En el plano XZ se tiene un perfil similar. Por lo tanto, la región de mayor sensibilidad tiene un volumen de (4 x 4 x 0.3) mm³. El hecho de que esta región asemeje un plano denota el comportamiento de enfoque cilíndrico del detector y lo vuelve muy útil para la obtención de imágenes 2-D [7].

La Fig. 3 muestra una imagen de los sensores piezoeléctricos extensos construidos y estudiados en este trabajo: lineal y enfocado. Para la construcción de los detectores se utilizó el método descrito en [3]. Ambos sensores consisten en una película delgada de PVDF (25 μ m de espesor) pegada sobre un sustrato de acrílico. Para el caso lineal el sustrato es un paralelepípedo rectangular de 30 mm x 30 mm x 10 mm. Por otro lado, para el sensor enfocado, el sustrato es un tramo angular de un tubo cilíndrico con un radio interno de 22.5 mm y un espesor de 3 mm. En ambos casos, el polímero se encuentra conectado eléctricamente por dos electrodos. El electrodo que se encuentra en contacto con el sustrato fue metalizado con aluminio. El otro electrodo fue realizado con pintura de plata, lo que permitió conseguir, para ambos detectores, un área activa de detección de aproximadamente 0.8 mm (*d*) x 22 mm (*L*). La forma y tamaño de los detectores fue elegida con el objetivo de maximizar su sensibilidad y minimizar su capacitancia. Ésta última es muy importante dado que la capacitancia del detector influye fuertemente en la respuesta en frecuencia y ancho de banda del sistema de detección [8]. Por otro lado, para prevenir que el medio de acople acústico (agua) cambie las propiedades dieléctricas del PVDF, se usó una pintura acrílica transparente no conductiva (Electroquímica Delta S.R.L.) colocada sobre la superficie del detector. Finalmente, se realizó un blindaje eléctrico utilizando pintura de plata.

III. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA Y ACÚSTICA

Para la caracterización eléctrica se usó el método de medición detallado en [3] que se describe brevemente a continuación. En primer lugar, se midió la capacitancia del sensor en el rango entre 10 Hz y 10 MHz con un circuito tipo puente capacitivo excitado con un generador de señales. Los

resultados arrojaron que los dos sensores poseen idénticas capacitancias (~ 60 pF a 10 kHz) y que la dependencia con la frecuencia ajusta bien con la función Havriliak-Negami [9]. En segundo lugar, se determinó la respuesta en frecuencia del sistema (sensor + TIA) hasta 200 MHz con un analizador de redes. Con los dos sensores, para amplificar la corriente entregada por los mismos, se utilizó un amplificador TIA (FEMTO HCA-100MHz-50K-C). En ambos casos se midió una frecuencia de corte (-3 dB) de (63 \pm 4) MHz.

La caracterización acústica del sistema de detección fue llevada a cabo siguiendo el método detallado en [10], que permite generar pulsos de presión cuasi-unipolares de sub-microsegundos de duración. En la Fig. 4 se presenta el esquema experimental. El sensor piezoeléctrico y un blanco metálico, usado como fuente acústica, son sumergidos en un recipiente que contiene agua destilada. Un láser Q-Switch Nd:YAG doblado en frecuencia (Continuum Minilite I, 532 nm, 5 ns, 10 Hz) irradia un alambre de cobre. Una lente convergente enfoca el haz láser sobre el alambre de cobre en un spot con un diámetro similar al del blanco de cobre (100 μ m) proporcionando así un volumen irradiado más o menos esférico. La energía del pulso láser se midió con un detector piroeléctrico (Coherent J-10MB-LE), resultando ser en todo los casos (42 \pm 0.3) μ J. Esta energía permite generar pulsos de presión acústica con picos de ~ 160 Pa. Dos bases de traslación XYZ ajustan la posición de la fuente acústica y el sensor piezoeléctrico, respectivamente. Finalmente, la salida del sistema de detección (sensor + FEMTO HCA-100MHz-50K-C) es digitalizada por un osciloscopio (Tektronix TDS 2024, 2 GS/s, 200 MHz) para su posterior procesamiento. La señal de disparo del osciloscopio se obtuvo del pulso Q-Switch del láser. Se determinó la velocidad del sonido en el agua midiendo su temperatura con una termocupla calibrada. Para todas las mediciones llevadas a cabo en este trabajo el valor de la temperatura fue de 24°C, lo que da una velocidad del sonido de 1494 m/s [11].

Usando las bases de traslación XYZ se obtuvieron los valores de energía de señal detectada del sistema de detección para diferentes distancias con respecto a la fuente acústica (alambre de cobre). Se escogió como origen de coordenadas la posición del blanco. En las Figs. 5-7 se muestran los resultados obtenidos para los sensores lineal (círculos azules) y enfocado (cuadrados verdes) en función de la variación de la distancia sobre cada uno de los ejes cartesianos *x*, *y* y *z*, respectivamente.

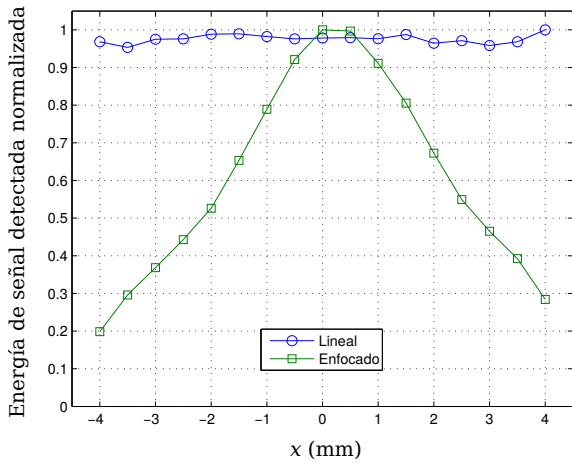


Fig. 5. Energía de señal detectada (ESD) por el sistema de detección para las posiciones $\mathbf{r} = (x\hat{i} + 22.5\hat{j} + 0\hat{k})$ mm. La unión entre puntos es para mostrar tendencias.

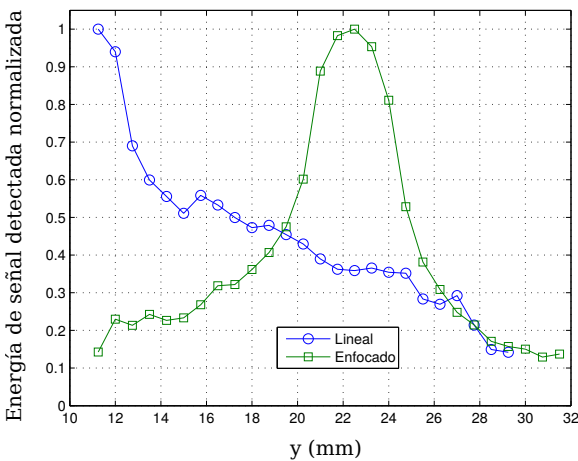


Fig. 6. Energía de señal detectada (ESD) por el sistema de detección para las posiciones $\mathbf{r} = (0\hat{i} + y\hat{j} + 0\hat{k})$ mm. La unión entre puntos es para mostrar tendencias.

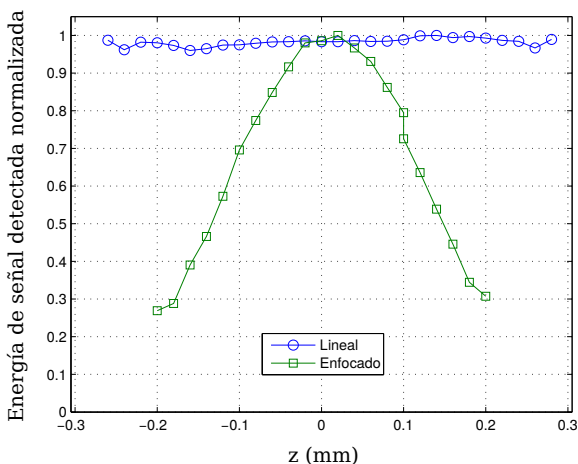


Fig. 7. Energía de señal detectada (ESD) por el sistema de detección para las posiciones $\mathbf{r} = (0\hat{i} + 0\hat{j} + z\hat{k})$ mm. La unión entre puntos es para mostrar tendencias.

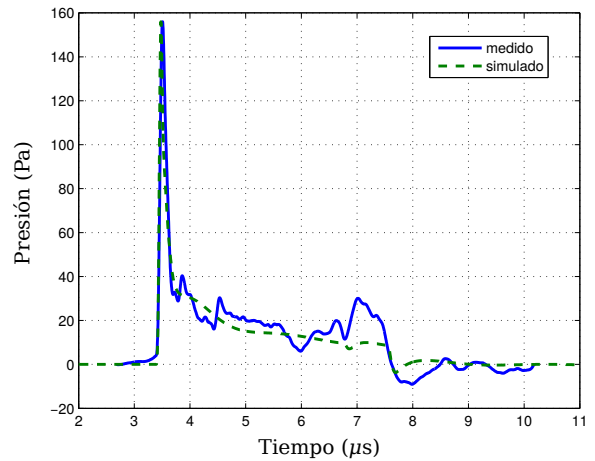


Fig. 8. Señal acústica medida (línea sólida azul) y simulada (línea de trazos verde) por sistema de detección basado en el sensor lineal en la posición $\mathbf{r} = (0\hat{i} + 4\hat{j} + 0\hat{k})$ mm. Los valores ajustados fueron: $L=20$ mm; $d=0.8$ mm; $\mathbf{r}_{adj} = (0\hat{i} + 3.95\hat{j} + 0\hat{k})$ mm; $AB=58$ MHz.

En las Figs. 5-7 se puede observar que el sensor enfocado presenta una notable variación de la ESD en función de la posición con respecto a la fuente. En concordancia con el diseño del detector enfocado, se obtiene la mayor sensibilidad cuando la fuente se encuentra en el foco del sensor $\mathbf{r} = (0\hat{i} + 22.5\hat{j} + 0\hat{k})$ mm. En el caso particular del eje z (Fig. 7) se puede apreciar una dependencia más marcada con la posición, lo que refleja el aspecto cilíndrico del sensor. Para valores de ESD normalizada mayores a 0.5 se observó una muy buena relación señal a ruido. Teniendo en cuenta esto, se puede definir la región de enfoque del detector la cual en este caso posee un volumen aproximado de $(4 \times 5 \times 0.25)$ mm³, muy similar al obtenido con la simulación presentada en la sección II.

Para el caso del sensor lineal se puede ver que no hay una variación apreciable de la energía con respecto a los eje x y z . Esto se debe a que $|\mathbf{r}|$ varió poco, o sea, los valores de x y z medidos fueron mucho menores que el valor de $y = 22.5$ mm. En la Fig. 6 sucede lo opuesto, donde se observa la dependencia con respecto a la inversa de la distancia ($1/|\mathbf{r}|$), propia de un sensor que se aleja de una fuente esférica. Por lo tanto, es conveniente utilizar este transductor lo más cerca posible de la fuente.

La sensibilidad y el NEP del sistema fueron obtenidos para los casos más favorables: en el centro de la región de enfoque (sensor enfocado) y lo más cerca posible de la fuente (sensor lineal). En las Figs. 8 y 9 se presentan las señales acústicas medidas para los sensores lineal y enfocado, respectivamente.

Para determinar la sensibilidad de los sistemas de detección se usaron los valores medidos de la tensión pico a pico entregada por el sistema (lineal = 0.256 V; enfocado = 1 V) y el valor pico de los pulsos de presión generados por la fuente (160 Pa). Los resultados para los detectores lineal y enfocado fueron 1.6 mV/Pa y 6.5 mV/Pa, respectivamente.

La densidad de ruido equivalente de presión se calcula como $NEP=NEV/(S \cdot AB^{1/2})$, donde NEV es el ruido equivalente de tensión, (3 ± 1) mV para ambos detectores y S y AB son la sensibilidad y ancho de banda eléctrico

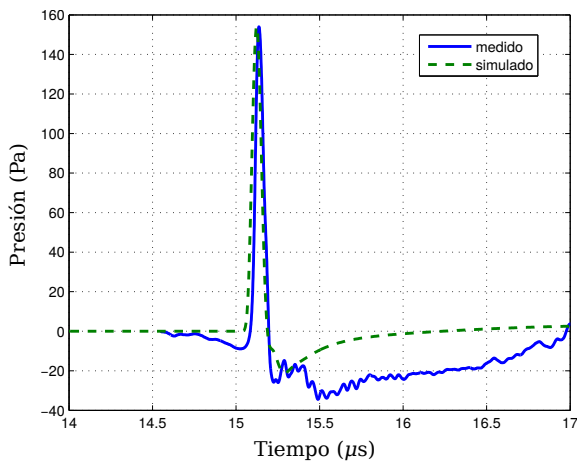


Fig. 9. Señal acústica medida (línea sólida azul) y simulada (línea de trazos verde) por sistema de detección basado en el sensor enfocado en la posición $\mathbf{r} = (0 \hat{i} + 22.5 \hat{j} + 0 \hat{k})$ mm. Los valores ajustados fueron: $d = 0.8$ mm; $\mathbf{r}_{adj} = (0 \hat{i} + 22.5 \hat{j} + 0 \hat{k})$ mm; $AB = 56$ MHz.

del sistema de detección, respectivamente. Los valores obtenidos para los sistemas con detector lineal y enfocado fueron $240 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$ y $80 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$, respectivamente.

Para verificar el desempeño del método de diseño presentado en la sección II se realizaron simulaciones para ajustar los parámetros característicos del sistema de detección: el largo (L) y ancho del sensor (d), ancho de banda del sistema (AB) y la distancia y localización con respecto a la fuente acústica (\mathbf{r}). Los resultados de estas simulaciones se muestran en la Figs. 8 y 9 (líneas punteadas verdes). En los dos sensores, los valores ajustados son muy próximos a los medidos y también se puede apreciar una buena concordancia entre las señales, salvo por las variaciones de presión observadas luego del pico principal. Éstas son causadas por reflexiones acústicas en las caras laterales del film de PVDF [12] y que no fueron tenidas en cuenta en la simulación.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el estudio de un sensor extenso, cilíndricamente enfocado basado en un polímero piezoeléctrico. Para su diseño se realizaron simulaciones usando la herramienta numérica k-Wave y para su implementación se usó un método de construcción decripto en un trabajo previo [3]. Por medio de mediciones eléctricas y acústicas se obtuvieron la sensibilidad (6.5 mV/Pa), el ancho de banda (60 MHz) y el NEP ($80 \mu\text{Pa}/\sqrt{\text{Hz}}$) del sistema de detección. Además, teniendo en cuenta el mapa de la ESD medida, la región de mayor sensibilidad del sensor enfocado es aproximadamente una superficie de $(4 \times 5) \text{ mm}^2$. En esta zona, la sensibilidad obtenida es 4 veces mayor que la del sensor lineal y, como se mantuvo el mismo nivel de ruido de tensión, se logró un menor valor de NEP. Una ventaja adicional del detector enfocado con respecto al lineal es que las señales OA se miden a una mayor distancia de la muestra, lo que da una gran flexibilidad en la elección del sistema de iluminación.

Comparando los valores de sensibilidad, ancho de banda y NEP obtenidos con el sensor enfocado con otros detectores

extensos usados en sistemas para TOA reportados en la bibliografía [13]–[15], se pudo establecer que el sensor en cuestión es apto para ser usado para la obtención de imágenes OA.

Finalmente, es importante destacar que el sensor enfocado de este trabajo no solo posee las ventajas inherentes de los detectores piezoeléctricos (gran sensibilidad a un bajo costo) sino que también presenta mejores características que otros detectores extensos con geometría lineal basados en tecnología óptica [13], [16]–[18].

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por los subsidios de la Universidad de Buenos Aires (UBACyT 20020160100052BA) y de la ANPCyT (PICT 2016-2204 y PICT 2018-04589).

REFERENCIAS

- [1] C. Lutzweiler and D. Razansky, "Optoacoustic imaging and tomography: reconstruction approaches and outstanding challenges in image performance and quantification," *Sensors*, vol. 13, pp. 7345–7384, 2013.
- [2] G. Paltauf, R. Nuster, and P. Burgholzer, "Characterization of integrating ultrasound detectors for photoacoustic tomography," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, 2009.
- [3] A. Abadi, L. C. Brazzano, P. Sorichetti, and M. G. Gonzalez, "Sensor piezoeléctrico con geometría lineal para tomografía optoacústica: Implementación y caracterización eléctrica," *Revista Elektron*, vol. 1, no. 2, pp. 53–57, 2017.
- [4] M. G. Gonzalez, B. Abadi, L. C. Brazzano, and P. Sorichetti, "Linear piezoelectric sensor for optoacoustic tomography: electroacoustic characterization," in *Proc. IEEE Argencón*, 2018, pp. 1–4.
- [5] B. Treeby and B. Cox, "k-wave: Matlab toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave-fields," *J. Biomed. Opt.*, vol. 15, p. 021314, 2010.
- [6] P. Burgholzer, C. Hofer, G. Paltauf, M. Haltmeier, and O. Scherzer, "Thermoacoustic tomography with integrating area and line detectors," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, vol. 52, pp. 1577–1583, 2005.
- [7] D. Queiros, X. L. Dean-Ben, A. Buehler, D. Razansky, A. Rosenthal, and V. Ntziachristos, "Modeling the shape of cylindrically focused transducers in three-dimensional optoacoustic tomography," *J. Biomed. Opt.*, vol. 18, p. 7, 2013.
- [8] M. G. Gonzalez, P. Sorichetti, and G. Santiago, "Reducing the capacitance of piezoelectric film sensors," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 87, p. 045003, 2016.
- [9] M. G. Gonzalez, P. A. Sorichetti, L. C. Brazzano, and G. D. Santiago, "Electromechanical characterization of piezoelectric polymer thin films in a broad frequency range," *Polym. Test.*, vol. 37, 2014.
- [10] M. G. Gonzalez, L. Riobo, L. C. Brazzano, F. Veiras, P. Sorichetti, and G. Santiago, "Generation of sub-microsecond quasi-unipolar pressure pulses," *Ultrasonics*, vol. 98, pp. 15–19, 2019.
- [11] K. Mackenzie, "Nine-term equation for sound speed in the oceans," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 70, pp. 807–812, 1981.
- [12] A. F. Vidal, L. C. Brazzano, C. Matteo, P. Sorichetti, and M. G. Gonzalez, "Parametric modeling of wideband piezoelectric polymer sensors: design for optoacoustic applications," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 88, no. 9, p. 095004, 2017.
- [13] R. Nuster, S. Gratt, K. Passler, H. Gruen, T. Berer, P. Burgholzer, and G. Paltauf, "Comparison of optical and piezoelectric integrating line detectors," *Proc. of SPIE*, vol. 7177, pp. 71770T–1–8, 2009.
- [14] G. Wissmeyer, M. Pleitez, A. Rosenthal, and V. Ntziachristos, "Looking at sound: optoacoustics with all-optical ultrasound detection," *Light: Science and Applications*, vol. 7, pp. 1–16, 2018.
- [15] G. Paltauf, P. Hartmair, G. Kovachev, and R. Nuster, "Piezoelectric line detector array for photoacoustic tomography," *Photoacoustics*, vol. 8, pp. 28–36, 2017.
- [16] L. Riobo, F. Veiras, M. T. Garea, and P. Sorichetti, "Software-defined optoelectronics: Space and frequency diversity in heterodyne interferometry," *IEEE Sensors*, vol. 18, pp. 5753–5760, 2018.
- [17] J. Bauer-Marschallinger, K. Felbermayer, and T. Berer, "All-optical photoacoustic projection imaging," *J. Biomed. Opt. Express*, vol. 8, no. 9, pp. 3938–3951, 2017.
- [18] G. Paltauf, R. Nuster, M. Haltmeier, and P. Burgholzer, "Photoacoustic tomography using a mach-zehnder interferometer as an acoustic line detector," *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 16, pp. 3352–3358, 2007.