

Parlante Superdireccional de Matriz Paramétrica

Superdirectional Parametric Array Loudspeaker

Axel Montes de Oca ^{#1}, Santiago A. Verne ^{*2}, Nilda Vechiatti ^{&3}, Carlos H. Muravchik ^{*4}

[#] Universidad Nacional de Tres de Febrero, Valentín Gómez 4828, (1678) Caseros, Pcia. De Buenos Aires, Argentina
¹axelmdo@gmail.com

^{*} Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales (LEICI), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata y CONICET, calle 49 y 118 s/n, La Plata, Argentina

² santiago.verne@ing.unlp.edu.ar

⁴ carlosm@ing.unlp.edu.ar

[&] Laboratorio de Acústica y Luminotecnia, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Centenario y calle 506, (1897) Gonnet, Pcia. de Buenos Aires, Argentina
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Paseo Colón 850, C.A.B.A., Argentina

³ nvechiatti@fi.uba.ar

Recibido: 29/10/18; Aceptado: 02/07/19

Abstract— In this work, a directional loudspeaker, also known as a parametric array loudspeaker (PAL), is designed and constructed. The operation is based on the phenomenon called self-demodulation that happens when high-frequency beams interact in a viscous medium, due to its non-linear properties. The sound obtained after the self-demodulation is formed in the beam of the ultrasonic carrier signal propagating beyond the absorption distance in which the carrier has been sufficiently attenuated. This generates a focused audible signal and therefore a directional polar pattern of narrow angle. In this paper two modulation methods are evaluated: double-sideband amplitude (AM-DBL) and pulse-width modulation (PWM). Its effect on directionality, sound pressure level and harmonic distortion is experimentally analyzed.

Keywords: Parametric array; directional; speaker.

Resumen— Este trabajo trata sobre el diseño y construcción de un altoparlante direccional, también conocido como parlante de matriz paramétrica (PAL). El funcionamiento del mismo se basa en los principios de un fenómeno denominado autodemodulación que sucede cuando haces de alta frecuencia interactúan en un medio viscoso, debido a las propiedades no lineales del mismo. El sonido obtenido luego de la autodemodulación se forma en el haz de la señal portadora ultrasónica propagándose más allá de la distancia en la que la portadora ha sido suficientemente atenuada. Esto genera una señal audible focalizada y por ende un patrón polar direccional de ángulo angosto. En el presente trabajo se evalúan dos métodos de modulación: en amplitud con doble banda lateral (AM-DBL) y por variación de ancho de pulso (PWM). Se analiza experimentalmente su efecto en la direccionalidad, nivel de presión sonora y distorsión armónica.

Palabras clave: Matriz paramétrica; direccional; parlante.

1. INTRODUCCIÓN

El altavoz de matriz paramétrica (PAL) es un dispositivo para propagar audio de manera direccional, basado en el concepto de arreglo paramétrico acústico expuesto en [1]. Westervelt demostró en [2], a principios de los años sesenta, que dos haces de alta frecuencia colimados podían generar en un medio fluido un haz de sonido de baja frecuencia como resultado de efectos acústicos no lineales. Dicho efecto fue denominado autodemodulación. En [1] por primera vez se probó experimentalmente la idea usando el aire como medio de propagación.

Berktagy estudió el fenómeno de autodemodulación causado por los mismos efectos acústicos no lineales [3]. Descubrió que cuando una onda de ultrasonido modulada en amplitud se autodemodulaba, generaba una onda de baja frecuencia que seguía a la envolvente de la portadora. A pesar del efecto relativamente débil de la autodemodulación, como el sonido producido se propaga en un haz estrecho, el dispositivo puede generar un sonido audible.

Como se mencionó, la autodemodulación ocurre cuando dos o más haces de ultrasonido interactúan con la no linealidad de un medio compresible, en un fenómeno similar a la amplificación paramétrica [4] y de ahí proviene la denominación de “arreglo paramétrico”. Esta mezcla genera señales cuyas frecuencias resultan

ser sumas y diferencias de las frecuencias de la portadora y sus bandas laterales, dando lugar a la formación de subproductos audibles que pueden ser considerados como emitidos por fuentes dentro del haz ultrasónico. Esto sucede en campo lejano, más allá de una distancia de propagación de unos cm desde el emisor de ultrasonido.

A su vez, y de forma parecida a lo que sucede con los haces de ultrasonido emitidos por cada transductor del arreglo, las fuentes audibles dentro del haz ultrasónico o “parlantes virtuales” interactúan entre sí resultando en interferencias constructivas y destructivas, produciendo un haz de audio direccional. La descripción matemática de este fenómeno se conoce como solución de campo lejano de Berkta [5], [6]. Más aún, el sonido demodulado que se forma en el haz de la señal portadora ultrasónica se propaga, como audio, más allá de la distancia en la que la portadora ya se ha atenuado considerablemente.

La naturaleza misma de la autodemodulación sugiere que si no se toman precauciones la señal audible queda distorsionada de manera significativa. Entonces, mitigar el efecto de la distorsión a través de procesamiento adecuado de las señales es de suma importancia para el desarrollo del PAL. Una variedad de métodos de procesamiento han sido considerados con ese propósito. Yoneyama et al. [7] por ejemplo, propusieron el uso de la modulación convencional de amplitud con doble banda lateral. Kamakura et al. sugirieron la operación de raíz cuadrada para procesar la envolvente del método de modulación en amplitud de doble banda lateral, que podría reducir sustancialmente la distorsión por segunda armónica [8], [9].

El presente trabajo describe la construcción y evaluación de un PAL, con fines puramente experimentales. Su matriz paramétrica está integrada por 75 transductores piezoeléctricos (Fig. 1), y para su evaluación se exponen dos métodos de modulación: AM-DBL o modulación de amplitud de doble banda lateral, utilizando un amplificador lineal, y PWM o modulación por ancho de pulso mediante un amplificador con llaves conmutadas. Se muestran mediciones de directividad y distorsión efectuadas para ambas modulaciones.

En la sección II se detallan aspectos del funcionamiento y construcción del PAL. En la III se describen las modulaciones empleadas y en la

IV se presentan las mediciones realizadas, y se discuten los resultados en la sección V.



Fig. 1: Matriz de transductores

II. FUNDAMENTOS

Para explicar el principio de la autodemodulación, se puede aplicar el análisis realizado por Berkta [3], [5], [6]. En él se establece que una onda de presión modulada en AM $p_1(t)$, de amplitud P_1 , con envolvente de modulación $E(t)$, y frecuencia de portadora f_c , a la que se denomina onda primaria, se demodulará en el aire creando una onda secundaria $p_2(t)$ a distancia (axial) z del emisor, dada por:

$$p_1(t) = P_1 E(t) \text{sen}(2\pi f_c t) \quad (1)$$

$$p_2(t) = \frac{\beta P_1^2 A}{16\pi \rho_0 c_0^4 \alpha z} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E^2(\tau) \quad (2)$$

donde $\beta = (\gamma+1)/2$ es el coeficiente de no linealidad del aire (que es aproximadamente 1,25), γ es la tasa de calor específico, ρ_0 es la densidad del medio en el que se propaga la onda, c_0 es la velocidad de propagación de la señal, A es el área de la sección transversal del haz a la distancia z , α es el coeficiente de absorción del medio de propagación (adimensional) para la frecuencia f_c , y $\tau = t - \frac{z}{c_0}$ es el tiempo retardado por la propagación de la onda durante el recorrido de la distancia z . La onda secundaria es la que en el caso del PAL produce el sonido audible.

A partir de estas ecuaciones se observa que la amplitud de la onda de presión secundaria (o demodulada), es proporcional a la derivada segunda del cuadrado de la señal modulante. Es decir, que al doblar la amplitud de la envolvente, se cuadruplica el sonido audible. Asimismo,

también es proporcional al área de los transductores, pues esta influye en el área A .

Dado que la presión sonora audible es proporcional al cuadrado de la envolvente de modulación, si se modulara con la raíz cuadrada de la señal de audio, se reduciría la distorsión significativamente. Sin embargo, también debe incluirse una pre-distorsión de la señal modulante integrándola dos veces para compensar la derivada segunda. Esta aproximación fue sugerida en [8]. En este trabajo no se incluye por sus pobres resultados, como se muestra en [10].

Para dar una idea de los niveles de presión que resultan, podemos citar el trabajo de Pompei [11], en el que con modulación AM-DBL con portadora, un nivel de presión de 130 dB (ref. $20\mu\text{Pa}$) de ultrasonido modulado con una señal de 1 kHz, $\alpha=0,7$, $A=0,2\text{ m}^2$, produce un nivel de presión de 66 dB de sonido audible a 1 m de distancia.

En nuestro caso, el parlante construido está compuesto por un arreglo de 75 transductores de ultrasonido dispuestos en una matriz cuadrada. Se utilizaron los del tipo T40-16 [12], en conexión paralelo, manteniendo una distancia de 16 mm entre centros. Este montaje hace que la dirección de máxima ganancia del arreglo sea perpendicular al plano del mismo. Si bien la distribución espacial del arreglo y el desfase eléctrico entre los transductores tienen influencia en el patrón de radiación, su optimización y el efecto del acoplamiento entre transductores están fuera del alcance del presente trabajo.

A lo largo del estrecho haz de ultrasonido generado y donde su potencia instantánea es suficiente, se produce autodemodulación y por lo tanto se genera la mezcla que da origen a la señal audible. De manera que se puede ver al fenómeno como un arreglo lineal de generadores de audio cuyas señales se componen en la dirección principal del haz ultrasónico. Por eso a veces se describe esto como un arreglo de “parlantes virtuales” de audio dispuestos en la línea principal de propagación del ultrasonido, en la disposición llamada “end-fire” [13]. Cabe acotar que las no linealidades del sistema de recepción del audio pueden generar un incremento de productos de intermodulación debidos a la demodulación cercana de las ondas primarias. Por ello modernamente se ha sugerido aplicar un filtro acústico para atenuar el ultrasonido cercano al

punto de recepción del audio [13]. La disposición de la línea de parlantes virtuales en arreglo “end-fire” le proporciona al audio generado sus características especiales de direccionalidad. Por simplicidad, en este trabajo no se incluyó ningún filtrado acústico como el mencionado.

III. MODULACIONES UTILIZADAS

En vista de lo expuesto, es necesario considerar modulaciones para las que el efecto de la no linealidad sea aceptable. En este trabajo se emplean dos esquemas de modulación: AM de doble banda lateral y modulación de ancho de pulso. Sin embargo, otros esquemas son posibles, algunos de ellos estudiados experimentalmente en [10].

A. Modulación en amplitud de doble banda lateral

En 1983, Yoneyama et al. [6] propusieron un sistema de altavoces de matriz paramétrica, que utiliza modulación de amplitud de doble banda lateral AM-DBL. La envolvente de la modulación propuesta en [7] y utilizada en el presente trabajo tiene la forma:

$$E(t) = 1 + m g(t) \quad (3)$$

donde m es el índice de modulación y $g(t)$ es la señal de entrada acotada a $|g(t)| < 1$.

El diagrama en bloques de este esquema se presenta en la Fig. 2, en la que $sen(\omega_c t)$ es la señal portadora, con $\omega_c = 2\pi f_c$. La modulación se realizó por software, y la señal resultante se aplicó en la entrada de un amplificador de potencia lineal implementado con un circuito integrado LM3886 cuya salida alimentó al PAL. El espectro de la señal de salida del amplificador, para un tono modulante puro de frecuencia f_m se esquematiza en la Fig. 3(a). Este sistema de PAL fue caracterizado experimentalmente en [7] donde se reporta un nivel significativo de distorsión armónica (THD).

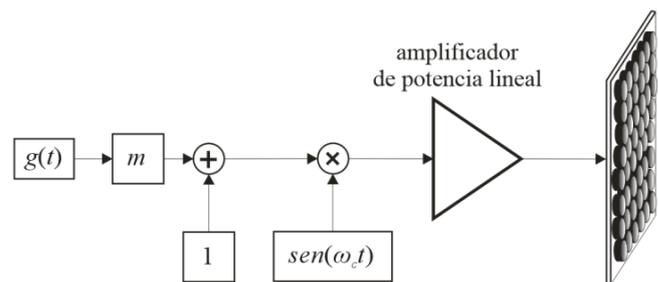


Fig. 2: Diagrama en bloques de la modulación AM-DBL

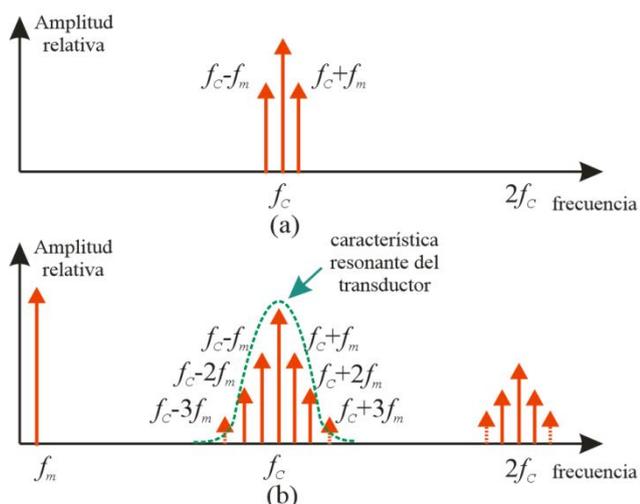


Fig. 3: Espectros frecuenciales. a) Modulación AM-DBL, b) Modulación PWM

Se constata en dicho trabajo que, para una modulación de amplitud con un tono puro e índice de modulación alto, el segundo armónico de dicho tono alcanzó, luego de la autodemodulación, un nivel similar al de la frecuencia fundamental.

Además, este método requiere un alto índice de modulación para producir una señal demodulada con un nivel apreciable de presión sonora, pero a expensas de una mayor distorsión. Por el contrario, reduciendo el índice de modulación la distorsión disminuye pero a expensas de una caída en la presión sonora de la señal demodulada. En este sentido, Hladký [14] y Mikulka [15] establecen un compromiso aceptable entre THD y nivel de presión sonora utilizando un índice de modulación de 0,7. Este resultado brinda una pauta que facilita la utilización de este método de modulación.

B. Modulador de ancho de pulso (PWM)

En este caso el circuito incluye tres etapas (Fig. 4). Luego de la preamplificación de la señal se realiza la modulación por ancho de pulso (PWM) que consiste en comparar la señal modulante (audio) con una portadora diente de sierra de frecuencia f_c superior a la frecuencia máxima de la modulante. Esto se realiza mediante un comparador analógico cuya salida, a su vez, excita dos transistores MOSFET funcionando en conmutación, dando como resultado una tensión pulsada de alta frecuencia, de forma similar a [16]. Si la señal que modula dicha portadora es un tono puro de frecuencia f_m , el espectro de la señal pulsada presenta una componente en banda

base de frecuencia idéntica a la modulante y componentes laterales múltiples de f_m alrededor de frecuencia de portadora (Fig. 3(b)). Un modulador PWM utilizado como parte de un amplificador de potencia de audio clase D posee un filtro pasabajos a la salida, el cual deja pasar sólo la señal de baja frecuencia hacia el altavoz. A diferencia de esto, la excitación del PAL se lleva a cabo haciendo coincidir la frecuencia de portadora con la frecuencia central de resonancia de los transductores ultrasónicos. Los mismos, al poseer una respuesta pasabanda (representado en la Fig. 3(b) en línea de trazos) transfieren al aire la potencia contenida en la portadora y parte de las bandas laterales, rechazando tanto la señal de banda base como los múltiplos de la portadora y sus respectivas bandas laterales. Como se puede apreciar en la Fig. 3(b) una modulante sinusoidal produce múltiplos de sí misma a ambos lados de la portadora, a diferencia del caso de modulación de amplitud (Fig. 3(a)), en el cual una única frecuencia modulante produce sólo dos tonos laterales. Esto sugiere que en el proceso de autodemodulación la técnica PWM presenta mayor distorsión que la modulación en amplitud dado que de por sí, el proceso de modulación genera tonos laterales a frecuencias adicionales a la frecuencia modulante. Además, la distribución del espectro depende de la relación entre las frecuencias portadora y modulante, y del índice de modulación [17].

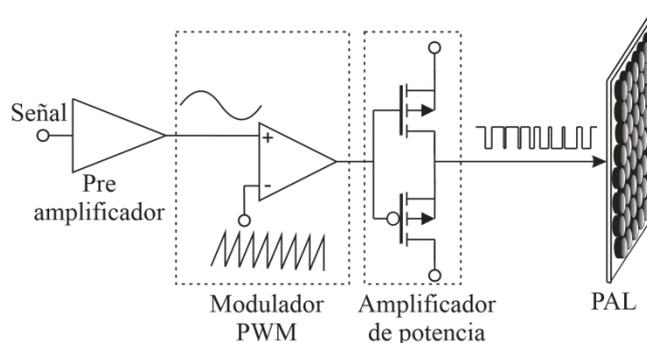


Fig. 4: Diagrama en bloques del circuito excitador PWM del PAL

IV. MEDICIONES Y RESULTADOS

Con el objetivo de caracterizar las señales de audio generadas con el PAL, se realizaron mediciones en la cámara anecoica del Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (LAL-CIC) [18]. En la Fig. 5 se

muestra el PAL ubicado sobre la mesa de mediciones. Se utilizó un sonómetro analizador de espectros en tiempo real marca Brüel & Kjaer modelo 2250, con su micrófono B&K modelo 4189. Las señales fueron grabadas desde la salida de línea del sonómetro, a través de una placa de sonido marca EMU modelo 0404, con una frecuencia de muestreo de 192 kHz, una resolución de 24 bit, y respuesta en frecuencia de 20 Hz a 20 kHz con ripple +0.0/-0.16 dB. Cabe mencionar que este instrumento no tiene una respuesta plana para las frecuencias de ultrasonido, motivo por el cual, lo medido para esas frecuencias está atenuado. De todos modos, la caracterización del nivel de presión ultrasónica no es objeto de este trabajo.



Fig. 5: PAL situado en la cámara anecoica del LAL-CIC

A. Metodología de validación y análisis de resultados

Las señales de audio fueron procesadas con programas desarrollados como parte de este trabajo. Dichos programas permiten obtener los datos necesarios para el cálculo de respuesta en frecuencia, directividad y THD.

Para corroborar los resultados obtenidos mediante las rutinas desarrolladas, los mismos fueron comparados con los valores medidos utilizando el instrumento B&K 2250. La señal emitida por el parlante fue analizada espectralmente usando filtros de bandas de tercios de octava, en 4 posiciones distintas: a 0° , 45° , 90° y 180° con respecto al eje de emisión.

Para verificar los niveles de presión sonora calculados, se utilizó como fuente de señal un ruido rosa de 15 s de duración. Los resultados

calculados fueron similares a los brindados por el sonómetro.

B. Metodología de medición de respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia del PAL fue medida a distintas distancias. Para ello, se colocó el PAL en una esquina de la cámara anecoica y se midió sobre la diagonal de la sala.

Se emitió un barrido frecuencial de 15 s entre las frecuencias de 30 Hz y 12 kHz utilizando las diferentes técnicas de modulación.

Para la obtención de resultados se tuvo en cuenta el aporte energético del ruido propio de la sala, comprobándose que no era necesario hacer corrección por ruido de fondo.

Condiciones de medición:

Sonómetro Brüel & Kjaer modelo 2250.

Micrófono Brüel & Kjaer modelo 4189.

Distancia de micrófono a la fuente (Fig. 6):

- Posición 1: 1 m
- Posición 2: 1.5 m
- Posición 3: 2 m
- Posición 4: 2,5 m
- Posición 5: 3 m
- Posición 6: 4 m
- Posición 7: 5 m

Condiciones ambientales:

- Temperatura $20,4^\circ\text{C}$
- Humedad relativa ambiente 53%
- Presión atmosférica: 1016,5 hPa

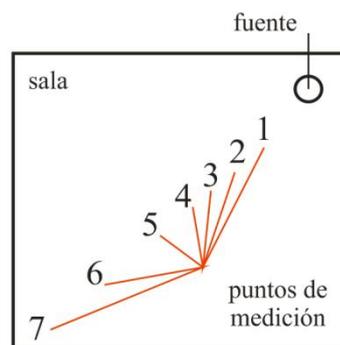


Fig. 6: Puntos de medición en la sala anecoica

C. Respuesta en frecuencia de las distintas modulaciones

Para evaluar la respuesta en frecuencia y el comportamiento durante la propagación en campo libre para los dos tipos de modulación utilizados, se realizaron mediciones de nivel sonoro continuo equivalente con ponderación Z a diferentes

distancias, todas sobre el eje central, sobre el que hay máxima directividad.

Para la modulación AM-DBL, que se muestra en la Fig. 7, se encontró que las curvas presentan un decaimiento de nivel de presión sonora de 17 dB entre las distancias de 1 m y 1,5 m en las bajas frecuencias, mientras que entre 1,5 m y 5 m se obtiene un decaimiento de 9 dB en dichas frecuencias. En las altas frecuencias, se obtiene un decaimiento de aproximadamente 6 dB al duplicarse la distancia.

En el caso de la modulación PWM (Fig. 8), se aprecia un comportamiento diferente. La señal de audio que se logra es de menor ancho de banda, y muestra su mayor nivel de presión sonora alrededor de los 4 kHz. En las bajas frecuencias se observa un decaimiento de nivel de 13 dB al duplicar la distancia.

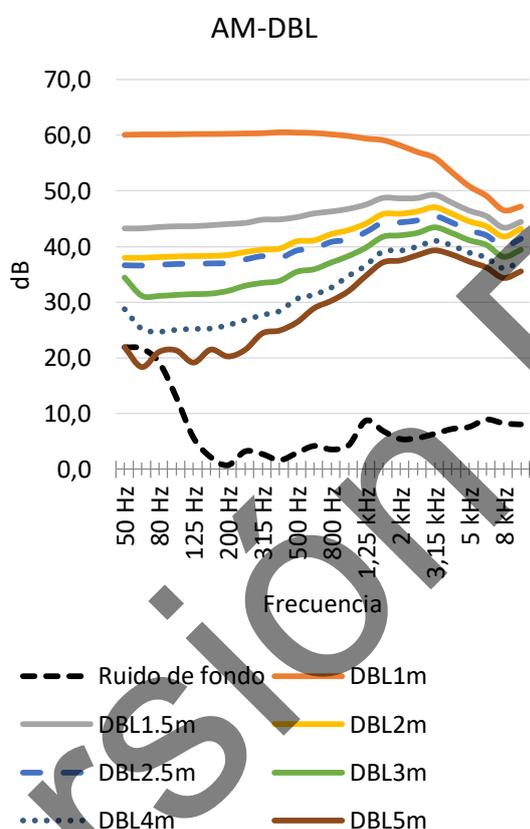


Fig. 7: Nivel de presión sonora según distancia de la modulación DBL

D. Metodología de medición de patrón polar

Para medir el comportamiento espacial de los sonidos emitidos por la fuente en términos de niveles de presión sonora y frecuencia, se emitió una señal de barrido frecuencial, con componentes entre 30 Hz y 12 kHz, y se realizaron mediciones cada 10° en el eje

horizontal. El PAL fue ubicado sobre la mesa central de mediciones de la cámara anecoica.

Condiciones de la medición:

- Sonómetro Brüel & Kjaer modelo 2250.
- Micrófono Brüel & Kjaer modelo 4189.
- Distancia de micrófono a la fuente 1,5 m
- Puntos cada 10°

Condiciones ambientales:

- Temperatura 19.7° C
- Humedad relativa ambiente: 42%
- Presión atmosférica: 1020 hPa

Para evaluar la directividad en función de ambos tipos de modulación utilizados, se realizaron mediciones de nivel sonoro continuo equivalente con ponderación Z a 1,5 m de distancia de la fuente, cada 10°. En la Fig. 9 en la Fig. 10 se muestran los niveles sonoros generados por el PAL según las distintas modulaciones, cada 10° y a niveles de presión sonora cada 6 dB.

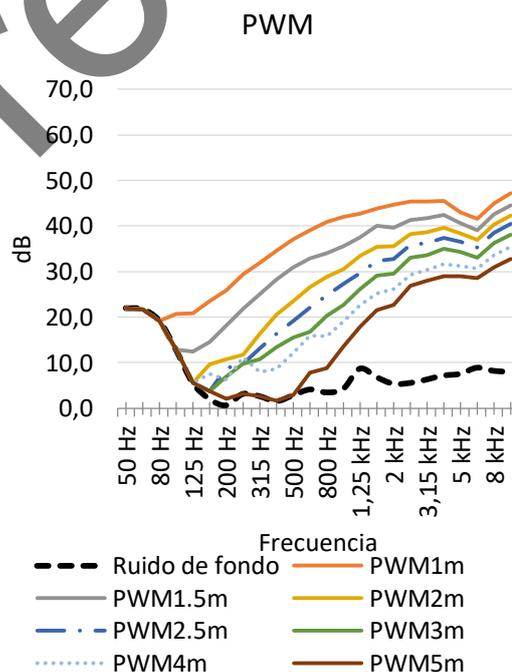


Fig. 8: Nivel de presión sonora según distancia de la modulación PWM

La Fig. 11 muestra el gráfico de directividad de un parlante convencional. Dicho gráfico pertenece al parlante 5FCX44 de B&C Speakers (medición realizada en el Laboratorio LAL-CIC). Comparando la Fig. 10 y la Fig. 11, puede observarse claramente la mayor direccionalidad del PAL.

Para caracterizar la distorsión de ambos esquemas de modulación se eligió como cifra de mérito el índice THD+N debido a que es necesario incluir las componentes generadas por el PAL como consecuencia de la no linealidad de la autodemodulación.

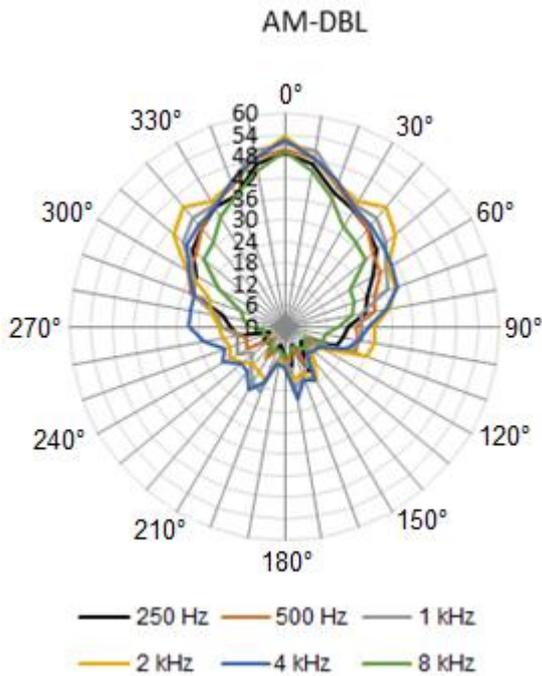


Fig. 9: Directividad del PAL utilizando modulación AM-DBL.

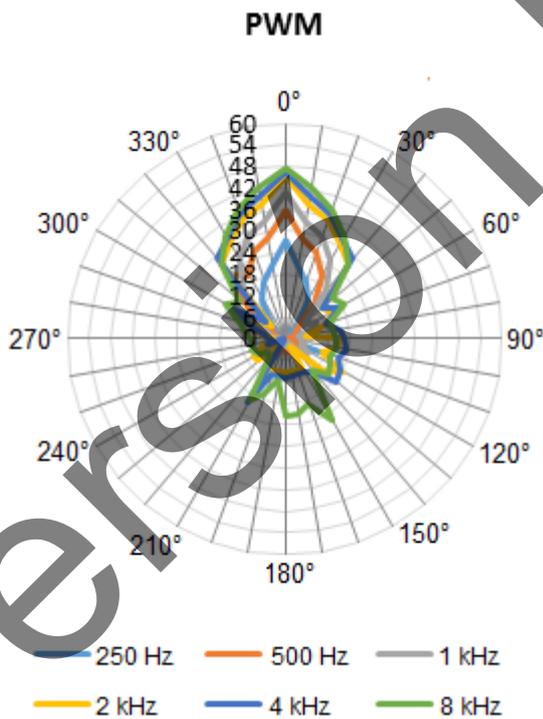


Fig. 10: Directividad del PAL utilizando modulación PWM.

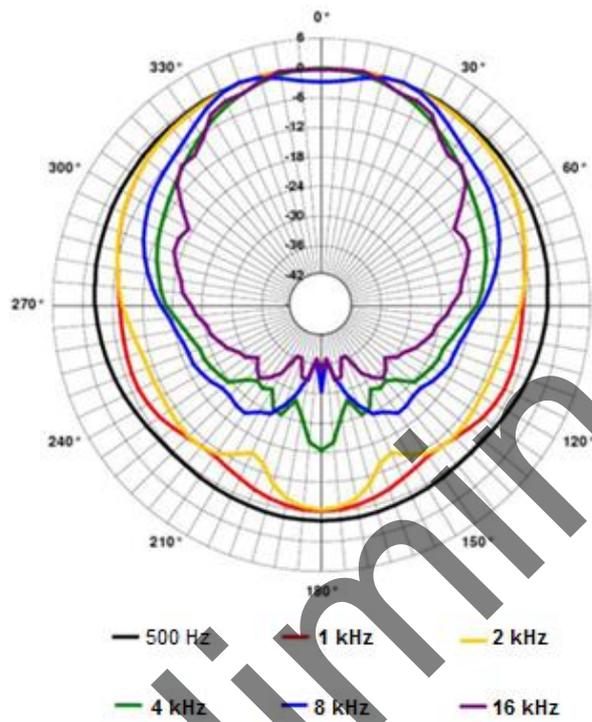


Fig. 11: Directividad de un parlante convencional.

E. Mediciones de distorsión

Para medir la distorsión del PAL se emitió un tono de 1 kHz utilizando ambas modulaciones.

Se realizaron mediciones en tres posiciones (ver Fig. 6), con diferentes distancias de la fuente al micrófono:

- Posición 2: 1,5 m
- Posición 5: 3 m
- Posición 7: 5 m

Condiciones de la medición:

Sonómetro Brüel & Kjaer modelo 2250.

Micrófono Brüel & Kjaer modelo 4189.

Condiciones ambientales:

Temperatura ambiente 20,4° C

Humedad relativa: 53%

Presión atmosférica: 1020 hPa

Esto se hace para incorporar posibles productos de intermodulación que no estén vinculados armónicamente con componentes de la señal de audio modulante. La Fig. 12 muestra los niveles de distorsión de ambas modulaciones para una distancia entre el PAL y el micrófono desde 1,5 m a 5 m.

Se aprecia un mayor nivel de distorsión para el esquema PWM por sobre el de AM-DBL en todo

el rango, lo que confirma lo mencionado en la Sección III.B. Alrededor de la frecuencia portadora se originan bandas laterales con frecuencias que corresponden a múltiplos de las presentes en el mensaje de audio. Estas componentes son el resultado de la modulación de PWM y son mezcladas por la no linealidad del aire. Esto sucede en un ancho de banda que depende del ancho de banda intrínseco del transductor y de la potencia relativa de cada una las componentes de ultrasonido en tanto que su nivel de potencia sea capaz de activar la no linealidad.

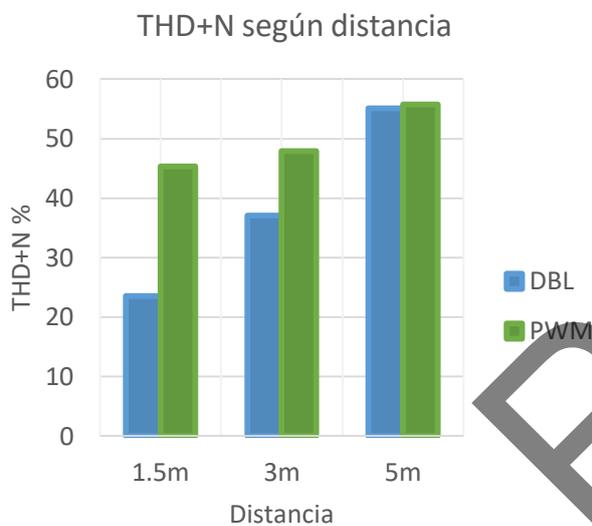


Fig. 12: THD+N de las distintas modulaciones según distancia

V. CONCLUSIONES

Los resultados de respuesta en frecuencia del PAL permiten definir dos comportamientos distintos para cada tipo de modulación, uno hasta la distancia de 1 m desde la fuente y otro a partir de 1,5 m. Para las señales de alta frecuencia, el decaimiento a partir de 1,5 m es de aproximadamente 6 dB cada vez que se duplica la distancia. Esto concuerda con lo planteado por Pompei [11] y Havelock [19]. El análisis anterior es válido para ambas modulaciones; en cambio, para las bajas frecuencias, se observa una atenuación mayor si las señales son generadas a partir de modulación PWM.

El análisis de directividad del sistema permite observar que las bajas frecuencias son más direccionales que las altas. Esto concuerda con los

resultados planteados por Pompei [11]. Dicho comportamiento es contrario al de los parlantes convencionales (ver Fig. 11), en los que la directividad depende de la relación entre la longitud de onda de la frecuencia a emitir y la superficie del emisor.

El sistema de modulación de PWM genera un mayor nivel de distorsión THD+N a distancias menores de 5 m comparado con la modulación AM-DBL. Sin embargo, a los 5 m, la distorsión generada por ambos métodos es similar.

AGRADECIMIENTOS

El Laboratorio de Acústica y Luminotecnia de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (LAL-CIC) y el Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales (LEICI) de la Universidad Nacional de La Plata-CONICET han prestado su colaboración en el desarrollo de esta investigación y permitieron el uso de sus instalaciones e instrumental. También la Universidad Nacional de Tres de Febrero ha motivado la investigación de este tópico.

Un agradecimiento especial a la Dra. María Inés Valla, quien hizo posible este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] M. B. Bennett and D. T. Blackstock, "Parametric Array in Air", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 57, 1975.
- [2] P. J. Westervelt, "Parametric Acoustic Array" *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 35, 1963.
- [3] H. O. Berktaay, "Possible Exploitation of Non-linear Acoustics in Underwater Transmitting Applications", *J. Sound and Vib.*, vol. 2, 1965.
- [4] J. G. Webster, *Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Ch. 15: Microwave Parametric Amplifier, John Wiley & Sons, 2000.
- [5] H. O. Berktaay. "Parametric Amplification by the Use of Acoustic Non-linearities and Some Possible Applications", *J. Sound and Vib.*, vol. 3, pp. 462-470, 1965.
- [6] H. O. Berktaay. "Near Ear-field Effects in Parametric End-fire Arrays", *J. Sound and Vib.*, vol. 20, pp. 135-143, 1971.
- [7] M. Yoneyama, et al., "The Audio Spotlight: An Application of Nonlinear Interaction of Sound Waves to a New Type of Loudspeaker Design", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 73, pp. 1532-1536, 1983.

- [8] T. Kamakura, M. Yoneyama, and K. Ikegaya, "Developments of Parametric Loudspeaker for Practical Use", *proc. of the Int. Symp. Nonlinear Acoustics*, Kobe, Japan, 1984.
- [9] T. Kamakura, M. Yoneyama and K. Ikegaya, "A Study for the Realization of a Parametric Loudspeaker", *J. Acoust. Soc. Japan*, pp. 1-18, 1985.
- [10] A. Montes de Oca, "Fabricación de un Altoparlante Súper Direccional de Matriz Paramétrica", Tesina de la carrera de Ingeniería de Sonido, UNTREF, Marzo 2019.
- [11] J. Pompei, "The Use of Airborne Ultrasonics for Generating Audible Sound", *proc. of AES*, no. 853 (I-5), 1998.
- [12] Especificaciones del transductor ultrasónico, [Online] [http://www.komantech.com/ultrasonic/ztr4016\(e\).html](http://www.komantech.com/ultrasonic/ztr4016(e).html)
- [13] P. Ji and J. Yang, "A Preliminary Experimental Study of Parameters' Effects on Parametric Loudspeaker", *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS2016)*, Tours, France, Sep. 18-21, 2016.
- [14] D. Hladký, Realizace úzce směrového akustického měniče [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/59783>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústavelektrotechnologie. Vedoucí práce Jan Mikulka.
- [15] J. Mikulka, D. Hladký and J. Sliz, "Parametric Array as a Source of Audible Signal", in *proc. of the Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, pp. 3610-3614, Shanghai, China, 2016.
- [16] K. Miura, "Ultrasonic Directive Speaker", *Elektor Magazine*, No. 3, pp. 56-60, 2011.
- [17] D. G. Holmes and T. A. Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters*, New York, Wiley, 2003.
- [18] A. G. Velis, H. G. Giuliano and A. M. Mendez, "The Anechoic Chamber at the Laboratorio de Acústica y Luminotecnia CIC", *J. Applied Acoustics*, vol. 44. 1994.
- [19] D. I. Havelock, "Directional Loudspeakers Using Sound Beams", *JAES*, vol. 48, pp. 908-916, 2000.