

---

# Diseño y fabricación de un arreglo lineal de 16 altavoces para la generación de zonas de escucha personalizadas



## Design and Fabrication of a 16-Channel Loudspeaker Line Array for Personalized Listening Zones

Yepes Díaz, Mateo; López Mejía, Sebastián; Murillo Gómez, Diego Mauricio

---

**Mateo Yepes Díaz**

mateo.yepes@usbmed.edu.co

Universidad de San Buenaventura, Colombia

**Sebastián López Mejía**

sebastian.lopez@usbmed.edu.co

Universidad de San Buenaventura, Colombia

**Diego Mauricio Murillo Gómez**

diego.murillo@usbmed.edu.co

Universidad de San Buenaventura, Colombia

### Revista Ingenierías USBMed

Universidad de San Buenaventura, Colombia

ISSN-e: 2027-5846

Periodicidad: Semestral

vol. 14, núm. 1, 2023

ingenierias.usbmed@usb.edu.co

Recepción: 04 Febrero 2021

Revisado: 23 Marzo 2021

Aprobación: 14 Octubre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/536/5364250004/>

DOI: <https://doi.org/10.21500/20275846.5160>

**Resumen:** El incremento de la capacidad computacional de las últimas décadas ha permitido la implementación de modelos para el desarrollo de nuevas tecnologías de reproducción de sonido. Los arreglos lineales de altavoces son un ejemplo debido a que posibilitan la generación de zonas de escucha personalizadas. En el procesamiento de señal es posible utilizar el fenómeno de interferencia ondulatoria para crear un haz sonoro en una dirección específica. Algunas aplicaciones de esta tecnología se encuentran en campos como el desarrollo de dispositivos de audio comercial, videojuegos, educación o acústica de salas, entre otros. Un arreglo de altavoces lineal que genere zonas de escucha personalizada debe cumplir con una serie de especificaciones técnicas que aseguren que el fenómeno ondulatorio es adecuadamente controlado y, por ende, el campo sonoro deseado. En este artículo se aborda el proceso metodológico que se requiere para el desarrollo y puesta a punto de un arreglo lineal de altavoces que ayude a generar zonas de escucha personalizada. Lo anterior incluye medición, caracterización y diseño de cada uno de los elementos involucrados en la cadena constructiva tales como: caja acústica, altavoces, amplificadores, ensamblaje y software de procesamiento. Como resultado se presenta el dispositivo construido y las limitantes de funcionamiento basadas en los resultados obtenidos.

**Palabras clave:** Arreglo lineal, zonas de escucha personalizada, beamforming, construcción de caja acústica.

**Abstract:** The increase in computational capacity in recent decades has allowed the implementation of models for the development of new sound reproduction technologies. Loudspeaker line arrays are one example because they make it possible to create custom listening zones. In signal processing it is possible to use the phenomenon of wave interference to create a sound beam in a specific direction. Some applications of this technology are found in fields such as the development of commercial audio devices, video games, education, or room acoustics, among others. A linear loudspeaker array that generates personalized listening zones must comply with a series of technical specifications that ensure that the wave phenomenon is adequately controlled and, therefore, the desired sound field. This paper addresses the methodological process required for the development and fine-tuning of a linear array

of loudspeakers that helps to generate personalized listening areas. This includes measurement, characterization, and design of each of the elements involved in the construction chain such as: acoustic box, speakers, amplifiers, assembly, and processing software. As a result, the device built, and the operating limitations based on the results obtained are presented.

**Keywords:** Loudspeaker Array, Beamforming, Sound Field.

## I. INTRODUCCIÓN

El diseño de arreglo de altavoces para la generación de zonas de escucha personalizadas es un área de alta relevancia científica debido a la versatilidad de controlar la directividad del sonido hacia una dirección espacial determinada. Es decir, realizar filtrado espacial del campo acústico radiado por el arreglo de altavoces. Lo anterior tiene una amplia aplicación en áreas como el audio espacial, la compensación activa de la acústica de recintos, la educación y el entretenimiento, entre otros [1]-[4].

En 1947, Olson describe estudios relacionados con la interacción acústica generada por un arreglo de altavoces orientados a sistemas de refuerzo sonoro [5]. Dentro de los análisis se presenta cómo las diferencias de respuesta en frecuencia radiada por cada altavoz afectan el patrón de directividad del campo acústico. Sin embargo, el origen de los algoritmos de procesamiento de audio requeridos para la generación de patrones directivos deseados se conecta con la evolución de la industria de las telecomunicaciones en la década de los años 80 [3]. En el campo de las telecomunicaciones surge la necesidad de direccionar la sensibilidad de un arreglo de sensores de un frente de onda electromagnético. Este avance inicia la técnica de procesamiento de filtrado espacial de frentes de ondas, conocido como *Beamforming*, sintetizando las señales de voltaje de cada uno de los altavoces de un arreglo [4].

Las técnicas para la síntesis de las señales de voltaje de un arreglo lineal se han abordado recientemente como la solución a un problema inverso [6]. Algunas técnicas como las basadas en el Pressure-Matching Method (PMM) abordan la solución del problema de síntesis, estimando la ganancia requerida por cada altavoz con base en el campo acústico deseado [7]. De igual forma, la solución del problema inverso se puede utilizar para el cálculo de la directividad de un arreglo de altavoces a través de este se puede conseguir que un arreglo lineal de múltiples altavoces sea super directivos en un ancho de banda extendido [8]. Otras técnicas, como el contraste acústico [9], basan la solución del problema en la optimización de la densidad de energía potencial acústica. Sin embargo, para obtener un buen desempeño en la radiación acústica del arreglo es necesario conocer la respuesta en frecuencia y el patrón de directividad de cada una de las fuentes acústicas que componen el arreglo.

En este artículo se propone una metodología para la caracterización y diseño de los componentes necesarios en la construcción de un arreglo de altavoces. El procedimiento se basa en las implementaciones realizadas por Farina y Chiesi [10] y Avizienis [11]. Sin embargo, es importante hacer énfasis que los arreglos desarrollados por los autores utilizan geometrías esféricas, mientras que proponemos un enfoque en arreglos lineales.

La teoría de arreglos de altavoces para zonas de escucha personalizadas se basa en que cada altavoz representa un sistema idéntico [12]. Lo anterior, debido a que el modelo de propagación para el problema inverso corresponde, generalmente, a monopolos radiando en campo libre. Por lo tanto, es importante caracterizar algunas propiedades electroacústicas de cada una de las fuentes para garantizar que las diferencias entre ellas se encuentren dentro de un intervalo aceptable.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera. En sección 2 se presenta un recuento de la teoría del *Beamforming* en el contexto de audio espacial. Además, se explica el procedimiento de síntesis de un campo sonoro y las consideraciones de directividad de un arreglo lineal. En la sección 3 se describen las

consideraciones vibro-acústicas y electroacústicas de cada uno de los componentes del arreglo, permitiendo plantear el diseño del arreglo lineal. También se hace una caracterización experimental del rendimiento de los altavoces y los amplificadores. Posteriormente, se describe el montaje del arreglo, conexionado eléctrico y desarrollo de aplicación de control. Finalmente, se presentan las conclusiones.

## II. TEORÍA DE BEAMFORMING

En la Figura 1 se presenta la configuración típica de un arreglo lineal de N altavoces para la generación de zonas de escucha personalizadas.

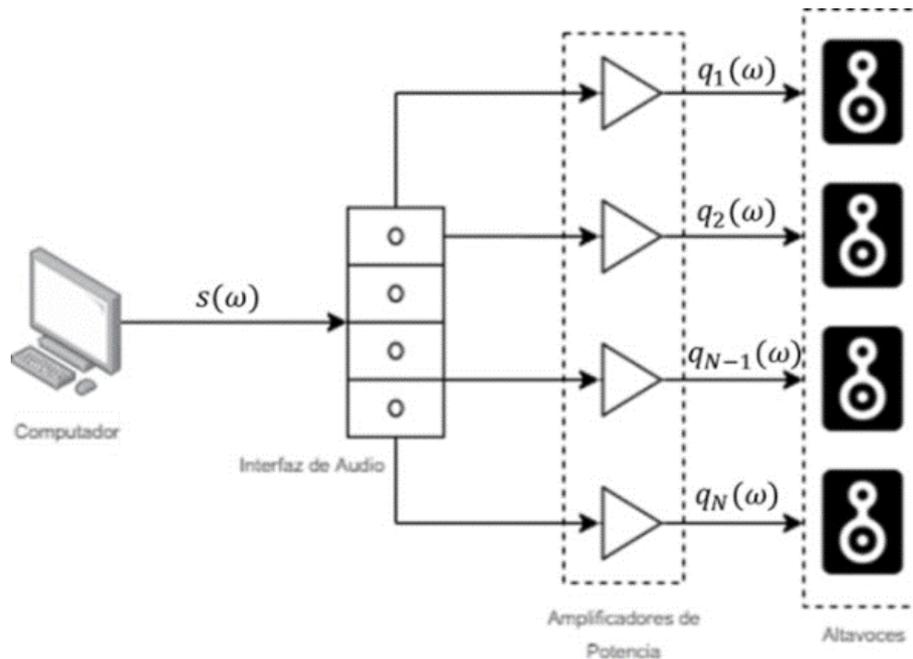


FIGURA 1.  
Configuración de N altavoces para zonas de escucha personalizadas

Donde cada uno de los altavoces del arreglo lineal se encuentra ubicado en las coordenadas espaciales  $y_n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , y son excitados con las señales complejas de voltaje  $q^T = [q_1(\omega), q_2(\omega), \dots, q_N(\omega)]$  donde  $[ ]^T$  denota la operación matricial transpuesta, para cada una de las frecuencias angulares  $\omega$ . El vector columna  $p^T = [p(x_1; \omega), p(x_2; \omega), \dots, p(x_L; \omega)]$  corresponde a las presiones acústicas deseadas en L puntos en el espacio acotados por las coordenadas  $x_l$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$ . Los puntos en el espacio son llamados puntos de control. Además, se está considerando una relación lineal en la propagación del sonido radiado por el n-ésimo altavoz hacia el l-ésimo punto de control, donde se puede establecer la siguiente relación entre los voltajes complejos  $q$  y las presiones acústicas  $p$ :

$$p = Hq \quad (1)$$

donde  $H \in \mathbb{C}^{N \times L}$  corresponde a la matriz de transferencia compleja que relaciona la propagación de cada fuente hacia cada punto de control.

Convencionalmente existen dos metodologías para formular la matriz de transferencia  $H$  una experimental y una analítica. En la primera, cada una de las columnas de la matriz corresponden a la respuesta en frecuencia y patrones de directividad de cada una de las fuentes del arreglo evaluados en los puntos de

control. Estas características de radiación acústica son caracterizadas en campo lejano y libre, lo que supone el uso de una cámara anecoica y largos tiempos de medición [10]. Por otro lado, en el enfoque de formulación analítica de la matriz de transferencia H se busca asumir el tipo de fuente acústica al que corresponden los elementos del arreglo. Asumiendo que la radiación acústica de las fuentes corresponde a las fuentes puntuales (monopolos acústicos en campo libre) y los elementos de la matriz de transferencia H estarán dados por:

$$H_{l,n} = \frac{e^{-jk\|x_l - y_n\|}}{4\pi\|x_l - y_n\|} \tag{2}$$

donde  $j = \sqrt{-1}$  es la unidad imaginaria,  $k = \omega/c$  es el número de onda,  $c$  es la velocidad de propagación del sonido, y  $\|x_l - y_n\|$  es la distancia euclidiana entre el punto de control  $x_l$  y el altavoz en las coordenadas  $y_n$ . Otro posible tipo de fuente acústica a utilizar en la formulación de la matriz de transferencia es el radiador tipo pistón circular con el cual los elementos de la matriz de transferencia están dados por [13]:

$$H_{l,n} = \frac{j}{2} \rho_0 c k a^2 \left[ \frac{2J_1(ka \text{sen}(\theta_{l,n}))}{ka \text{sen}(\theta_{l,n})} \right] \frac{e^{-jk\|x_l - y_n\|}}{\|x_l - y_n\|} \tag{3}$$

donde  $\rho_0$  es la densidad del medio,  $a$  es el radio del pistón circular,  $J_1$  es la función de Bessel de primer tipo y orden, y  $\theta_{l,n}$  es el ángulo en radianes del vector que une el  $n$ -ésimo altavoz con el  $l$ -ésimo punto de control.

#### A. Síntesis del campo acústico

Con el arreglo lineal de altavoces se busca sintetizar un campo acústico cuyo comportamiento replique las presiones acústicas deseadas en los puntos de control. También se busca identificar cómo estas presiones están contenidas en el vector columna  $p^T$  y la matriz de transferencia H permite relacionar la radiación acústica de cada altavoz a cada punto de control. Para sintetizar el campo deseado es necesario calcular filtros inversos  $q^T$  de forma tal que al convolucionarlos con la señal de entrada  $s(\omega)$  y excitar cada altavoz se consiga el campo acústico deseado. De manera general, el cálculo de los filtros inversos  $q^T$  se realiza con una inversión regularizada de Tikhonov de la matriz de transferencia H [7]. La regularización es necesaria para condicionar la energía acústica radiada por el arreglo y para preservar su integridad electroacústica.

Debido a la separación discreta entre los N altavoces del arreglo, las características de directividad del campo acústico sintetizado pueden verse afectadas en cierto rango frecuencial. Por un lado, la frecuencia hasta la cual el campo sintetizado procura la directividad esperada en el vector de presiones  $p^T$  se conoce como frecuencia de aliasing espacial,  $f_{sa}$ , y para un arreglo lineal se determina como [14]:

$$f_{sa}(\theta_B) = \frac{c}{\Delta(1 + |\cos(\theta_B)|)} \tag{4}$$

donde  $\Delta$  corresponde a la separación entre los altavoces del arreglo y  $\theta_B$  es el ángulo en radianes, hacia el cual se sintetiza el haz de sonido principal del arreglo. Por otro lado, la ubicación discreta de los altavoces del arreglo condiciona la capacidad de directividad en bajas frecuencias. Para generar alta directividad en bajas frecuencias, la separación entre fuentes debe ser comparable con la longitud de onda, pero al mismo tiempo incrementar la separación entre altavoces disminuirá la frecuencia de aliasing espacial, ocasionando altas frecuencias al arreglo que generan sonidos no deseados.

### III. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN

La construcción del arreglo se divide en tres etapas. La primera, donde se hace una revisión del efecto de vibro-acústico del material, se consideran las limitaciones de directividad del Beamforming y se hacen los planos de construcción. La segunda fase se basa en la caracterización de las propiedades electroacústicas de los altavoces, cuyo principal objetivo es encontrar un comportamiento homogéneo en términos de la curva de impedancia y la respuesta en frecuencia. La tercera etapa se centra en la medición de la cantidad de distorsión armónica generada por los amplificadores. Esto es relevante dado que permite tener un indicio del rango de comportamiento lineal de los amplificadores hasta el cual la señal se amplificará sin mayores cambios.

Para la construcción del arreglo se escogen los componentes mostrados en la Tabla 1. En las siguientes secciones se describe el proceso de elección de cada uno de los componentes del arreglo lineal.

Antes de poder construir el arreglo se deben hacer mediciones que permitan obtener información relevante sobre los materiales a utilizarse para tomar decisiones pertinentes en el diseño.

TABLA 1.  
Componentes utilizados para la construcción del arreglo

Elemento	Cantidad	Referencia
Altavoz 2"	10	Peerless TA6FD00-04 2" (10 W)
Altavoz 4	6	DROK 4" 4 Ohm Audio Speakers (40 W)
Amplificador Estéreo 25 W	5	DROK TPA3116 (25 W)
Amplificador Estéreo 50 w	3	DROK TPA3116 (50 W)
Cajas en Guadua de 1.5 cm de espesor	2 cajas	Guadua laminada
Fuente de Poder	1	Eyeboot 24V 25A DC Universal Regulated Switching Power Supply 600w

#### A. Caja acústica

A continuación, se describen las consideraciones relacionadas con la elección del material de la caja acústica, las dimensiones y la disposición de los altavoces del arreglo lineal.

##### a) Material

El principio físico de la radiación acústica parte de contar con un elemento radiante de sonido cuyo objetivo es transformar la energía del dominio eléctrico al dominio acústico. Dicho elemento, convencionalmente, corresponde al altavoz electrodinámico, donde la radiación acústica de este se consigue por el movimiento oscilatorio que se genera en el diafragma, que hace que empiecen a vibrar las partículas del medio y se propague la onda sonora.

La caja acústica es la estructura que permite encapsular y soportar todos los elementos que conforman el sistema. Desde un punto de vista acústico, la radiación de la cara trasera del diafragma queda aislada de la radiación de la cara frontal debido a que el altavoz es empotrado en una cavidad de aire que no tiene conexión directa con el medio en el cual el arreglo de altavoces radia sonido. Adicionalmente, la estructura rígida de la caja acústica provee el plano de referencia inercial con respecto a la velocidad mecánica a desarrollar en el diafragma. Sin embargo, los paneles que componen el dominio de la caja acústica son susceptibles de entrar en vibración mecánica debido a las propiedades del material y al acople rígido entre el altavoz y la caja acústica.

Los modos de vibración propios de los paneles de la caja acústica pueden ser excitados con facilidad por medio de las fuerzas reactivas de origen electromagnético del altavoz, la vibración de la cavidad de aire interior sujeta a compresión por medio de ondas acústicas y la vibración de otros paneles adyacentes [15]. Desde un punto de vista vibro-acústico, la vibración de los paneles de la caja puede radiar sonido interfiriendo con el campo acústico que se desea sintetizar.

Para disminuir el efecto de la vibración de la caja acústica, se busca que las frecuencias de resonancia de los paneles sean lo más altas posible. De manera general, las frecuencias de resonancia son proporcionales al espesor [16], con lo cual se decide utilizar el máximo espesor posible en los paneles de la caja acústica. Además, con la intención de fabricar una caja acústica amigable con el medio ambiente, se decide utilizar paneles de guadua laminada provistos por la empresa Bio Hábitat Tacuara. Como se menciona anteriormente, se hace la caja acústica usando el máximo espesor disponible de 1.5 cm para disminuir el efecto de la vibración de los paneles que la constituyen.

Como se describe en la sección 2, la separación entre los altavoces que componen un arreglo lineal afecta directamente las características de directividad de este. Una menor distancia de separación entre fuentes genera una mayor frecuencia de aliasing espacial  $f_{sa}(\theta_B)$  lo que genera mejores características de directividad en altas frecuencias. Por ende, la preferencia es un arreglo compacto. Sin embargo, una menor distancia de separación disminuye la directividad del arreglo en bajas frecuencias.

Para compensar el efecto de la distancia de separación  $\Delta$  y garantizar un incremento en la directividad del arreglo en bajas frecuencias, se decide crear un sistema de dos vías compuesto por dos arreglos lineales independientes, uno dedicado a radiación de bajas frecuencias y otro a altas frecuencias. La disposición de altavoces y dimensiones para cada vía se puede observar en la Figura 2.

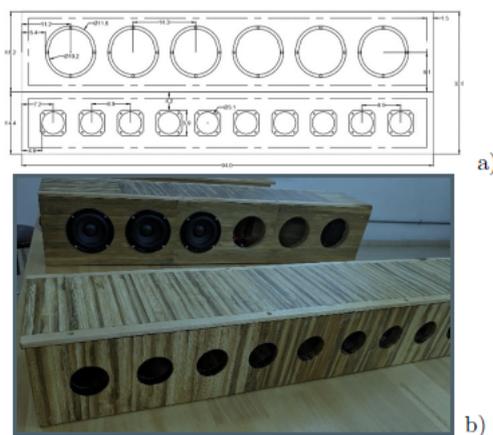


FIGURA 2.

Etapas de construcción de las cajas acústicas. (a) Planos técnicos con dimensiones y cotas (b) Montaje parcial de altavoces en las cajas

El arreglo de altas frecuencias está constituido por 10 altavoces con una separación entre fuentes  $\Delta_{HF} = 8.9$  cm lo que para un haz de sonido perpendicular al arreglo ( $\theta_B = 0^\circ$ ) corresponde a una frecuencia de aliasing espacial  $f_{sa}(0^\circ) = 3865$  Hz. Las dimensiones exteriores de la caja corresponden a 94 cm de largo, 18 cm de ancho y 14.4 cm de alto.

El arreglo de bajas frecuencias cuenta con 6 altavoces con una separación entre fuentes  $\Delta_{LF} = 14.3$  cm correspondientes con una frecuencia de aliasing espacial  $f_{sa}(0^\circ) = 2405$  Hz. Las dimensiones exteriores de la caja corresponden a 94 cm de largo, 18 cm de ancho y 18.2 cm de alto.

#### A. Altavoces

Uno de los objetivos en el desarrollo del sistema de arreglo lineal es conseguir un sistema compacto, las dimensiones físicas de los altavoces condicionan la distancia de separación mínima que se puede conseguir con ellos. Para el arreglo de altas frecuencias se utilizan 10 altavoces de 2" de diámetro de la marca Peerless y referencia TA6FD00-04. La potencia eficaz de estos altavoces es 10 W implica un consumo eléctrico de máximo 100 W. Sin embargo, al contar con una superficie de radiación pequeña la capacidad de radiación acústica del altavoz en bajas frecuencias es limitada. Este comportamiento es explicado al identificar que los altavoces son transductores electroacústicos que buscan replicar la radiación acústica del pistón circular.

Al analizar el comportamiento de la magnitud de la presión acústica radiada por los pistones circulares se puede observar una dependencia directa con el radio  $a$  del pistón. De allí que para radiar eficientemente bajas frecuencias se usen altavoces con diafragmas de mayor diámetro.

El arreglo de baja frecuencia está compuesto por 6 altavoces de la marca Drok de 4". Al utilizar altavoces de mayor diámetro se busca compensar la disminución de la presión acústica radiada en bajas frecuencias. La potencia eficaz de cada altavoz es 40 W con lo cual el consumo eléctrico máximo de este arreglo es de 240 W. En la Tabla 1 se presentan las características de los altavoces utilizados para cada una de las vías.

La caracterización de las propiedades electroacústicas de los altavoces tiene dos objetivos: el primero es encontrar que los transductores tienen características de respuesta en frecuencia similares y el segundo es determinar la frecuencia de corte del filtro que separa cada una de las vías.

#### a) Curva de impedancia eléctrica

La medición de curva de impedancia permite encontrar la frecuencia de resonancia de los altavoces, suministrando información acerca de la frecuencia en la que las capacidades mecánicas del sistema van a empezar a disminuir. Este procedimiento se basa en el método propuesto en [17], utilizando un generador de señales, una resistencia de 1 k $\Omega$  y cada uno de los altavoces, de ambas referencias, como se muestra en la Figura 3.

Este montaje se pasa a un barrido de frecuencia y se captura el voltaje que se mide en el multímetro.

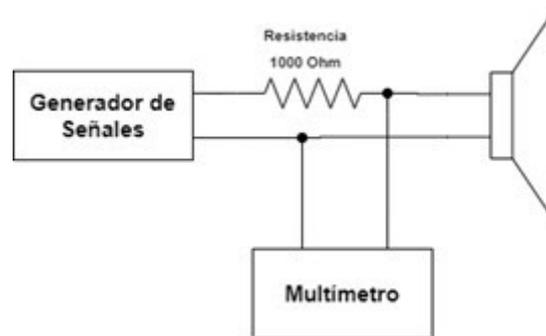


FIGURA 3.

Diagrama de bloques para medición de curva de impedancia

Este proceso se realiza para cada uno de los grupos de altavoces y, luego, se calcula la curva de impedancia promedio según el diámetro de los altavoces, como se presenta en la Figura 4.

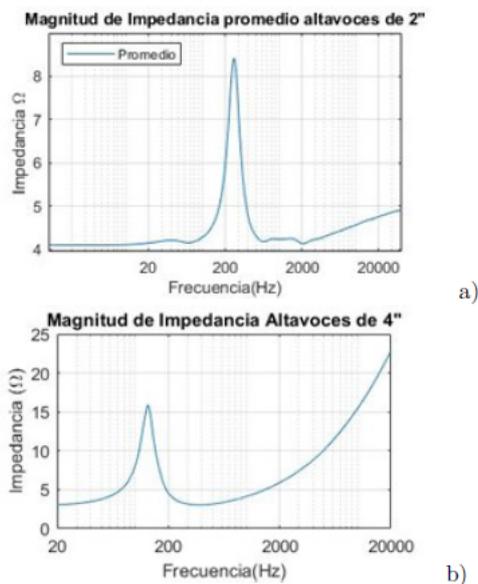


FIGURA 4. Curvas de impedancia promedio. (a) Magnitud de Impedancia para altavoces Peerless de 2" (b) Magnitud de Impedancia para altavoces DROK de 4"

Las curvas de impedancia presentan el pico en aproximadamente 130 Hz y 265 Hz para los altavoces de 4" y 2". Este dato permite conocer el límite en frecuencias bajas donde el sistema genera suficiente energía para contribuir a la calidad de la señal

b) Magnitud de respuesta en frecuencia

La medición de respuesta en frecuencia se hace utilizando la aplicación para generación de respuestas al impulso de MATLAB, que a su vez utiliza el método de barrido en frecuencia inverso propuesto por Farina [18].

La medición de la magnitud de respuesta en frecuencia se realiza en una sala acústicamente tratada que provee bajo nivel de ruido de fondo y una alta absorción acústica. En la Figura 5 se puede observar la configuración utilizada para realizar esta caracterización. El procedimiento de esta medición consiste en suspender un altavoz en una base, posteriormente, ubicar un sonómetro a 1 m de distancia para medir el nivel de presión sonora y capturar la señal de audio mediante la conexión del micrófono a una interfaz de audio.

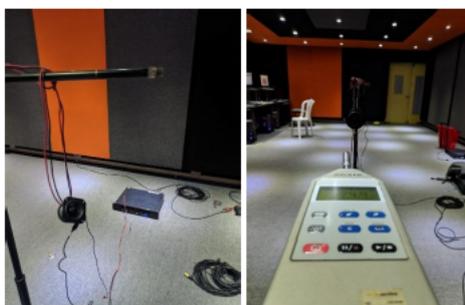


FIGURA 5. Configuración utilizada para la medición de respuesta en frecuencia

Después de obtener la respuesta en frecuencia de cada altavoz, se calcula el promedio de la magnitud de respuesta en frecuencia, primero para los 6 altavoces que componen las vías de baja frecuencia, después para los 10 altavoces que componen las vías de alta frecuencia. Los resultados de estos promedios se presentan en la Figura 6. Esta información es utilizada para diseñar el filtro que separa las dos vías del sistema.

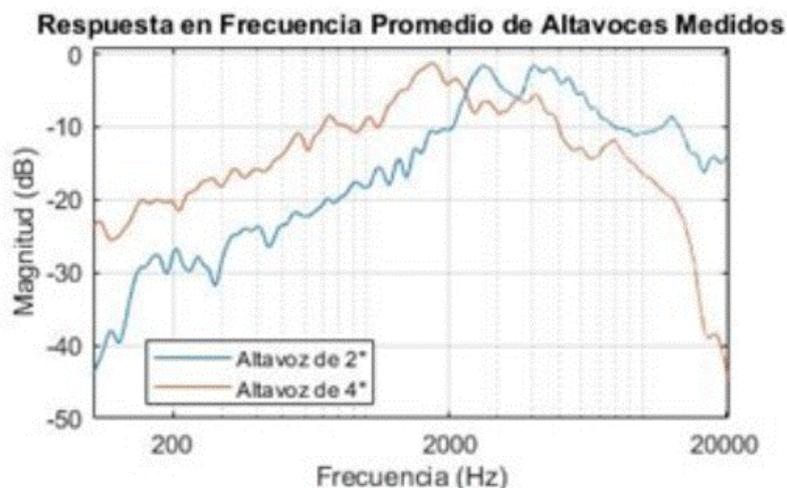


FIGURA 6.

Respuesta en Frecuencia promedio para altavoces de 2” y 4” respectivamente

Para asegurar que los altavoces tengan un comportamiento espectral similar, se hace un filtrado por bandas de octava de las respuestas al impulso obtenidas, bajo las especificaciones dadas por el estándar ANSI S1.11 [19] y se calcula la desviación estándar de cada grupo de altavoces en dichas bandas de frecuencia, como se presenta en la Tabla 2.

### C. Amplificadores

La elección de los amplificadores se basa en los altavoces previamente elegidos. En primera instancia se requiere dispositivos capaces de aportar la cantidad de potencia requerida. Luego se eligen los amplificadores de topología clase D por su alto rendimiento y bajo requerimiento de disipación térmica. Para esta aplicación, los amplificadores utilizan el circuito integrado de Texas Instruments TPA3116-D2.

El propósito de realizar mediciones en los amplificadores es poder caracterizar la cantidad de distorsión que agregan a las señales en función de la frecuencia. Esto se hace mediante una medición de distorsión armónica total (THD por sus siglas en inglés) en donde se utiliza un tono puro a través del sistema y se analiza la cantidad de armónicos que se generan en la salida.

El montaje para esta medición se presenta en la Figura 7. Un generador de señales alimenta el amplificador, utilizando una resistencia de 10  $\Omega$  como carga y la salida se conecta a un osciloscopio donde se analiza el comportamiento del sistema.

El montaje para esta medición se presenta en la Figura 7. Un generador de señales alimenta el amplificador, utilizando una resistencia de 10  $\Omega$  como carga y la salida se conecta a un osciloscopio donde se analiza el comportamiento del sistema.

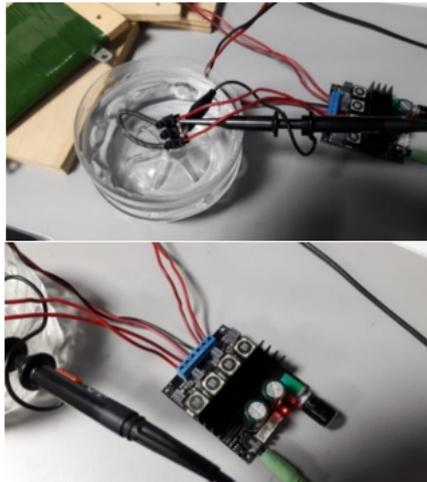


FIGURA 7.  
Montaje para la medición de distorsión armónica total

El registro de las señales es procesado en MATLAB donde se calcula diferencia entre la amplitud del tono puro emitido y los demás componentes que aparecen tras pasar por el amplificador. En la Figura 8 se puede observar que los resultados indican una diferencia de 51.4 dB y 40.3 dB para los amplificadores de 25 W y 50 W, respectivamente.

#### D. Montaje del sistema

Posterior a la caracterización de los elementos necesarios para la construcción del arreglo, se procede a realizar el montaje y conexionado de todos los dispositivos que componen el sistema.

TABLA 2.  
Desviación Estándar para las curvas de respuesta en frecuencia por bandas de octava, medidas para cada altavoz

Frecuencia (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Desviación estándar (dB) Altavoz 4"	0.22	0.33	0.067	0.62	0.52	0.67	0.52	0.94
Desviación estándar (dB) Altavoz 2"	2.49	0.59	0.23	0.21	0.21	0.25	0.37	0.51

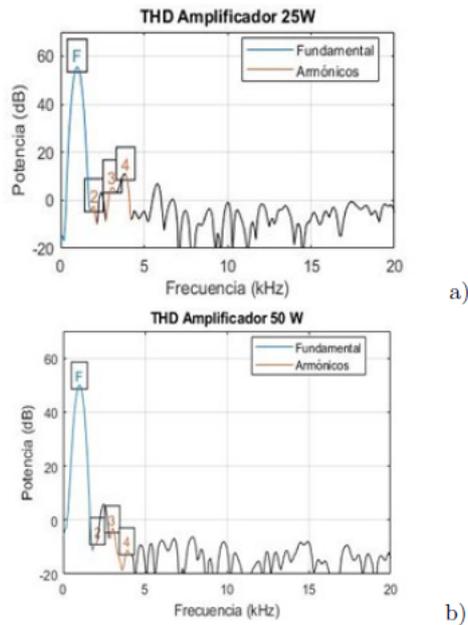


FIGURA 8.  
Montaje para la medición de distorsión armónica total

a) Conexionado eléctrico

La primera parte del montaje consiste en hacer las conexiones necesarias para alimentar cada uno de los amplificadores de las dos cajas. Para esto se utiliza una fuente de voltaje de 25 V DC y 600 W de potencia que suministra la corriente necesaria para cada uno de los amplificadores. En la Figura 9 se presenta el proceso de montaje de altavoces y amplificadores.

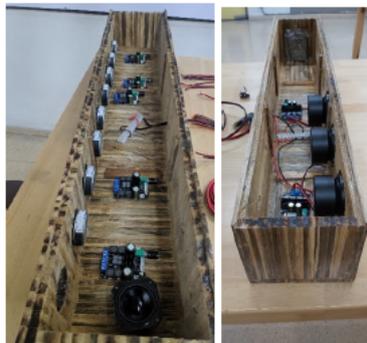


FIGURA 9.  
Cableado para arreglo de altas y bajas frecuencias

Luego, se hace el conexionado de cada una de las entradas de audio. Debido a la tierra compartida de todo el sistema se genera un ruido de tierra en la vía de altas frecuencias que se elimina mediante el uso de un condensador de 470 uF y 25 V en la entrada de alimentación de voltaje.

b) Configuración de interfaz de audio y filtro de cruce

Para transmitir las señales de audio se utiliza una interfaz Behringer UMC 1820 que proporciona 10 salidas físicas y una tarjeta de expansión Behringer ADA 8200 conectada mediante el protocolo ADAT con un cable de fibra óptica TOSLINK que permite ampliar 6 salidas físicas adicionales.

La división en dos bandas de frecuencia del sistema implica que se debe diseñar un filtro que permita enviar el contenido espectral de cada señal al altavoz correspondiente. Este sistema se diseña a partir del cruce de

un filtro pasa bajas y un filtro pasa altas, con frecuencia de corte en 600 Hz, la magnitud de la respuesta en frecuencia de este sistema se puede observar en la Figura 10.

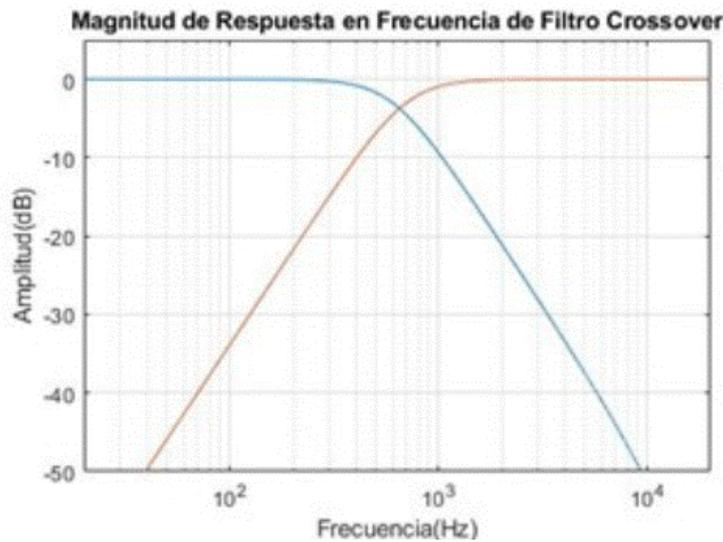


FIGURA 10.

Magnitud de Respuesta en Frecuencia del Filtro de Cruce digital

c) Desarrollo de software de control para el sistema

Para controlar el sistema se desarrolla un software en el entorno MATLAB, buscando permitir que el usuario seleccione la señal de audio que se reproduce con opciones como: tono puro, ruido de banda ancha o archivos de audio. Además, permite personalizar el método para sintetizar los filtros inversos necesarios para generar las zonas de escucha personalizadas, como se presenta en la Figura 11.

De igual forma, se brinda al usuario la posibilidad de elegir entre calcular los filtros inversos qT usando alguno de los dos métodos de propagación de sonido

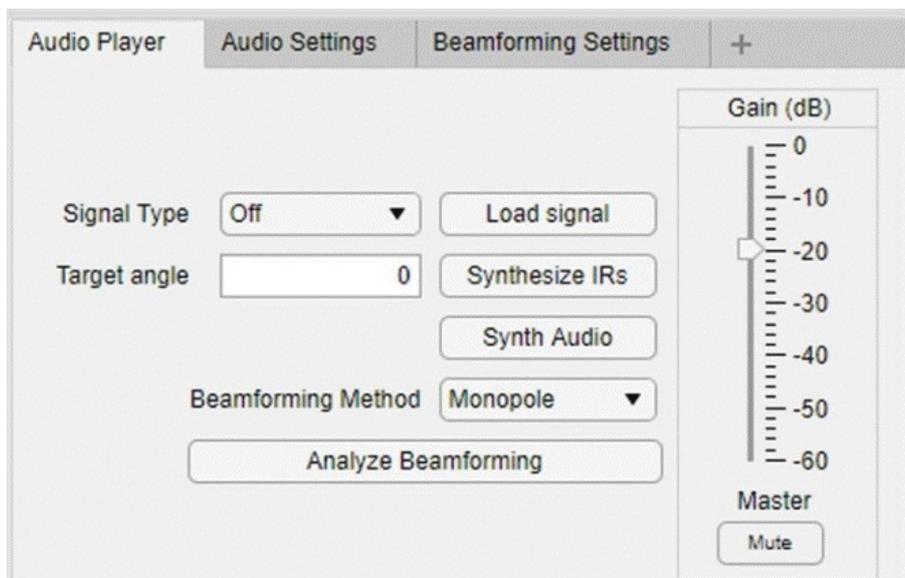


FIGURA 11.

Pantalla inicial del software USBeam

descritos en la sección 2 y representados por la función de transferencia  $H$ . También, se permite al usuario especificar propiedades como el tamaño de la ventana espacial, el factor de regularización y el radio donde se ubicará el receptor.

El software se encarga de sintetizar las respuestas al impulso a través de los filtros inversos basados en los métodos escogidos por el usuario y de convolucionar cada una de estas con la señal de audio a reproducir.

### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Basado en los resultados obtenidos se tiene que la magnitud de respuesta en frecuencia promedio de los altavoces de 2" tiene una varianza que oscila entre los 0.2 y 0.9 dB, basado en esto se puede establecer que estos altavoces tienen una respuesta en frecuencia lo suficientemente similar para el uso en el arreglo y posterior procesamiento con filtros.

Para los altavoces de 4" la varianza oscila entre los 0.21 y 2.4 dB; siendo este último valor correspondiente a la frecuencia de 63 Hz, este resultado condiciona la efectividad que se podría tener en las zonas de escucha para este rango de frecuencia, por lo que se sugiere no incluirlo dentro de la generación de los filtros inversos. Adicionalmente, se tiene que los amplificadores pro-

porcionan un rango de funcionamiento de distorsión armónica total con valores de 40.3 y 51.4 dB, estos valores proporcionan un rango de funcionamiento lo suficientemente amplio como para aplicar el procesamiento necesario sin entrar en zonas de funcionamiento no lineal.

### III. CONCLUSIONES

Los principales elementos para considerar en la construcción de un arreglo de altavoces han sido descritos e implementados mediante un caso de estudio basado en un arreglo lineal de 16 altavoces de dos vías. Los resultados indican la factibilidad de construcción y desarrollo de estos dispositivos en el contexto nacional.

El diseño y construcción de un arreglo lineal de altavoces involucra el análisis de las propiedades físicas y técnicas de los elementos que constituyen el sistema. También se propone un proceso metodológico que permite un desarrollo controlado minimizando los riesgos asociados. Los resultados del proceso metodológico confirman que los componentes electroacústicos escogidos para el proyecto son adecuados para la construcción del arre-

glo y, con ciertas limitaciones, para la aplicación de filtros basados en la solución del problema inverso.

### IV. TRABAJOS FUTUROS

Durante el desarrollo de un sistema de arreglo lineal con aplicaciones para la generación de zonas de escucha personalizadas, se asume que todos los altavoces que componen el arreglo son idénticos. Sin embargo, como se pudo observar en la medición de la magnitud de la respuesta en frecuencia de los altavoces, se presenta una desviación 2.49 dB. La presencia de esta desviación supone que es necesario evaluar el efecto de la variabilidad de las características de los altavoces en la síntesis del campo sonoro del arreglo. Por ello, se plantea como trabajo futuro incluir la no linealidad en el problema inverso para evaluar su impacto en términos de la precisión del campo sonoro reconstruido.

### V. AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones del docente Ramón del Cristo Baños, por su aporte en la caracterización de amplificadores y solución de problemas de ruido eléctrico de tierra. Adicionalmente,

expresan su agradecimiento a la empresa Bio Hábitat Tacuara por el suministro de las muestras de guadua laminada y la fabricación de las cajas acústicas en guadua usadas en el proyecto.

## REFERENCIAS

- [1] F. Rumsey, "Sound Field Control: Personal Sound Zones and Moving Listeners," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 64, n.º 10, págs. 808–813, 2016. <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=18521>.
- [2] W. F. Druyvesteyn y J. Garas, "Personal sound," *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 45, n.º 9, págs. 685-701, 1997.
- [3] T. Betlehem, W. Zhang, M. A. Poletti, y T. D. Abhayapala, "Personal sound zones: Delivering interface-free audio to multiple listeners," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 32, n.º 2, págs. 81–91, 2015. doi: 10.1109/MSP.2014.2360707.
- [4] B. D. Veen y K. M. Buckley, "Beamforming: A Versatile Approach to Spatial Filtering," *IEEE ASSP Magazine*, vol. 5, n.º 2, págs. 4-24, 1988. doi: 10.1109/53.665.
- [5] H. F. Olson, *Elements of acoustical engineering*, by Harry F. Olson. New York: D. Van Nostrand company, inc, 1940.
- [6] S. J. Elliott, J. Cheer, J.-W. Choi e Y. Kim, "Robustness and Regularization of Personal Audio Systems," *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, vol. 20, n.º 7, doi: 10.1109/TASL.2012.2197613.
- [7] F. Olivieri, F. M. Fazi, P. Nelson y S. Fontana, "Comparison of Strategies for Accurate Reproduction of a Target Signal with Compact Arrays of Loudspeakers for the Generation of Zones of Private Sound and Silence," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 64, n.º 11, doi: 10.17743/jaes.2016.0045.
- [8] M. M. Boone, W.-H. Cho y J.-G. Ih, "Design of a highly directional endfire loudspeaker array," *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 57, n.º 5, págs. 309-325, 2009.
- [9] J.-W. Choi e Y.-H. Kim, "Generation of an acoustically bright zone with an illuminated region using multiple sources," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111, n.º 4, 2002. doi: 10.1121/1.1456926.
- [10] A. Farina y L. Chiesi, "Convention e-Brief 258 A novel 32-speakers spherical source".
- [11] R. Avizienis, A. Freed, P. Kassakian y D. Wesel, "A Compact 120 Independent Element Spherical Loudspeaker Array with Programmable Radiation Patterns," [Online]. Available: [www.aes.org](http://www.aes.org).
- [12] E. Mabande y W. Kellermann, "Towards superdirective beamforming with loudspeaker arrays".
- [13] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens y J. Sander, *Fundamentals of Acoustics*. Wiley, 2000.
- [14] F. Olivieri, F. M. Fazi, P. A. Nelson, M. Shin, S. Fontana y L. Yue, "Theoretical and experimental comparative analysis of beamforming methods for loudspeaker arrays under given performance constraints," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 373, jul. de 2016. doi: 10.1016/j.jsv.2016.03.005.
- [15] J. K. Iverson, "Theory of Loudspeaker Cabinet Resonances," *AES: Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 21, n.º 3, págs. 177-180, 1973.
- [16] P. Tappan, "Loudspeaker Enclosure Walls," *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 10, n.º 3, págs. 224-231, 1962.
- [17] V. Dickason, *Loudspeaker Design Cookbook*, 7th. Audio Amateur Pubns, 2005.
- [18] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique".
- [19] A. National Standards Institute, "ANSI S1.11: Specification for Octave, Half-Octave, and Third Octave Band Filter Sets".