

AMPLIFICADOR DE AUDIO MULTICANAL CON CONTROL DE SALIDAS PARA APLICACIONES EXPERIMENTALES DE ACÚSTICA

MULTI-CHANNEL AUDIO AMPLIFIER WITH OUTPUT CONTROL FOR ACOUSTICS EXPERIMENTAL APPLICATIONS

Fermín Scaliti, Fabián C. Tommasini, R. Martín Guido, G. Agustín Cravero, Lorenzo Capiglioni y David M. Guber

Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), CONICET, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba (UTN – FRC), Maestro Marcelo López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, 5016 Córdoba, Argentina, ferminscaliti@gmail.com

Palabras clave: Electroacústica, Amplificadores de audio, Demultiplexación de señales de audio, Tecnología Binaural.

Resumen. En diferentes sistemas de medición y configuraciones experimentales utilizadas en acústica es habitual el uso de una gran cantidad de altavoces cuya activación sea controlada mediante una computadora personal. Debido que no todos los altavoces suenan en forma simultánea, utilizar interfaces de audio que posean tantos canales de salida como altavoces se requieran, es demasiado costoso. La demultiplexación analógica de los canales de audio es una posible solución. En este trabajo se propone un dispositivo diseñado para demultiplexar de forma controlada 4 entradas de audio analógico de nivel de línea a 32 salidas de potencia, para uso en aplicaciones experimentales de acústica, específicamente para el área de tecnología binaural. Esta demultiplexación es administrada mediante una placa Arduino que se comunica con una computadora personal. La etapa de potencia utiliza un amplificador clase D por cada salida, debido a las ventajas de rendimiento y tamaño que presentan. Se muestran resultados de mediciones de respuesta en frecuencia y de análisis de distorsión armónica total, junto a un análisis de potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento del dispositivo.

Keywords: Electroacoustics, Audio amplifiers, Audio signal demultiplexing, Binaural technology.

Abstract. In different measurement systems and experimental setups used in acoustics it is usual to use a large number of speakers whose activation is controlled by a personal computer. Because not all speakers sound simultaneously, using audio interfaces that have as many output channels as speakers required, is too expensive. Analog demultiplexing of audio channels is a possible solution. This study proposes a device designed to demultiplex 4 line-level analog audio inputs to 32 power outputs in a controlled manner, for use in experimental acoustic applications, specifically for the area of binaural technology. This demultiplexing is managed by an Arduino board that communicates with a personal computer. The power stage uses a class D amplifier for each output, due to the performance and size advantages they present. Results of frequency response measurements and analysis of total harmonic distortion are shown, together with an analysis of electrical power necessary for the operation of the device.

1. INTRODUCCIÓN

En diferentes sistemas de medición y aplicaciones experimentales utilizadas en acústica es habitual el uso de una gran cantidad de altavoces cuya activación sea controlada mediante una computadora personal. Esta configuración es común en experimentos de audición espacial, especialmente de localización auditiva de fuentes sonoras (Voss et al., 2015; Brichetto et al., 2018; Choi et al., 2017), como también en usos aplicados a la tecnología binaural, por ejemplo un sistema de medición de funciones de transferencia de cabeza (head-related transfer functions, HRTFs) individuales (Majdak et al., 2013; Watanabe et al., 2014; Yu et al., 2018; Richter, 2019).

En estos casos, no se requiere que todos los parlantes exciten al sistema en forma simultánea. Por ejemplo, un procedimiento utilizado en los últimos años para realizar mediciones de HRTFs es el método de múltiples barridos exponenciales (multiple exponential sweep method, MESM) (Majdak et al., 2007) que consiste en barridos exponenciales sucesivos en distintos parlantes y utiliza como máximo dos altavoces activados simultáneamente. Por lo tanto, utilizar interfaces de audio que posean tantos canales de salida como altavoces se requieran es innecesario y demasiado costoso. La demultiplexación analógica de canales de audio es una posible solución.

Una estrategia habitualmente utilizada por los sistemas de medición de HRTFs, por ejemplo en Yu et al. (2018), para lograr esta demultiplexación es amplificar la señal de línea que proviene de la interfaz de audio para luego hacer una selección de salida posterior (Fig. 1), es decir, realizar una amplificación-selección. Esta estrategia suele tener algunos problemas: la selección mediante relés puede producir clics audibles; existencia de diafonía (crosstalk) entre diferentes salidas, debido que en las pistas de los circuitos circulan señales de audio de potencia; e imposibilidad de silenciar las salidas de forma independiente.

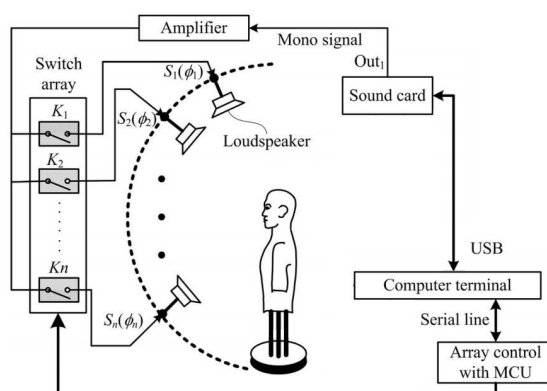


Figura 1: Estrategia de amplificación-selección para la demultiplexación analógica de canales de audio. Adaptado de Yu et al. (2018).

El objeto de este estudio es presentar un dispositivo diseñado para demultiplexar de forma controlada 4 entradas de audio analógico de nivel de línea a 32 salidas de potencia (con hasta 4 de uso simultáneo), para uso en aplicaciones experimentales de acústica, principalmente para el área de tecnología binaural, utilizando una estrategia de selección-amplificación. Dicha selección es controlada mediante una placa Arduino que se comunica con una computadora personal a través de una librería de software.

Se mostrarán aspectos del estado actual del diseño y del desarrollo, un análisis de la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento del dispositivo y resultados de mediciones de

respuesta en frecuencia y de análisis de distorsión armónica total (total harmonic distortion, THD).

2. IMPLEMENTACIÓN

El desarrollo del amplificador de audio multicanal se fue realizando mediante diferentes prototipos funcionales de etapas del sistema completo. Se comenzó con una demultiplexación analógica utilizando el circuito integrado (CI) CD4051, el cual indicaba mediante LEDs el canal que se encontraba activo. Luego, se agregó la etapa de amplificación de audio utilizando amplificadores de audio clase D PAM8610 de Diodes Incorporated. Esta última elección se debió a que eran los CI disponibles en dicho momento. Además, se diseñaron circuitos impresos externos para alimentación y para distribución de señales provenientes de una placa controladora.

Luego de pruebas y mediciones preliminares sobre estos prototipos, se recabaron datos para realizar modificaciones y mejoras al diseño original. Lo cual derivó en un nuevo modelo de amplificador con mejores características de potencia y distorsión y nuevas funcionalidades como protección de los amplificadores individuales si se los somete a trabajo sin carga, y pines para expansión y tomas de señal.

En la Fig. 2 se muestra el diagrama en bloques del diseño final del amplificador de audio multicanal propuesto. La computadora personal (PC), a través de la interfaz de audio, se encarga de enviar las señales de audio analógicas que serán amplificadas, como así también de establecer el protocolo de comunicación para el control del amplificador. Esto último lo realiza por medio de una librería de software y un dispositivo controlador Arduino Mega 2560.

Los componentes principales de hardware son la etapa de amplificación, el circuito de protección para cada salida, el demultiplexor de señales y la alimentación de corriente continua. Se decidió dividir el diseño en 4 placas de circuito impreso (printed circuit board, PCB) iguales, que cuentan con 1 entrada y 8 salidas cada una. Esto permitirá la conexión de un arreglo de hasta 32 parlantes, mediante conectores TRS hembra para montaje en PCB.

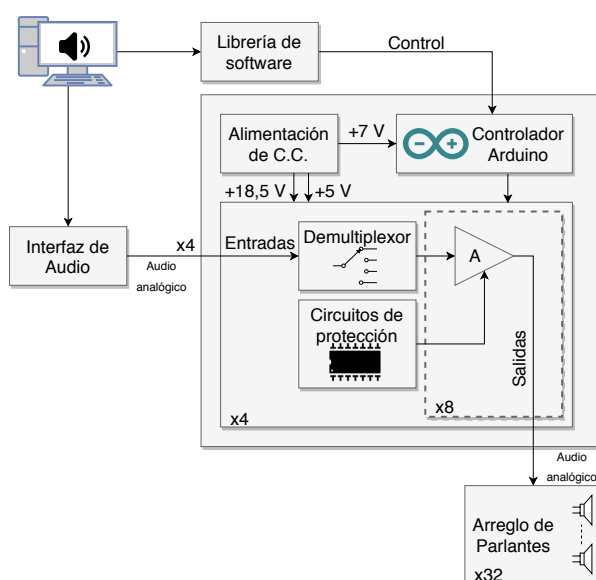


Figura 2: Diagrama en bloques del amplificador de audio multicanal, utilizando la estrategia de selección-amplificación.

2.1. Amplificador

Una de las principales modificaciones que resultaron de los primeros ensayos, fue determinar que el amplificador utilizado originalmente no cumplía con los requerimientos mínimos (ver Sección [Resultados](#)). Se decidió reemplazar el amplificador PAM8610 por otro que cumpla con las siguientes especificaciones mínimas necesarias para las aplicaciones experimentales de acústica: a) utilizar un amplificador por salida, para eliminar posible crosstalk, b) disponer de una entrada analógica, c) poseer baja distorsión armónica total más ruido eléctrica (total harmonic distortion plus noise, THD + N @ 1 kHz $\leq 0.1\%$), y d) tamaño reducido y buena eficiencia, minimizando la pérdida por calor.

Una selección preliminar de amplificadores de Texas Instruments que cumplan con estas especificaciones se muestra en la Tabla 1.

Amplificador	Arquitectura	Canales (max)	Alimentación (min–max)	Potencia de salida (max)	THD+N @ 1 kHz	Precio aproximado EE.UU ($\times 1000$ u)
TPA3126D2	Clase D	2	4.5–26 V	50 W	0.02 %	USD 1.26
TPA3136D2	Clase D	2	4.5–14.4 V	10 W	0.04 %	USD 0.85
TPA3116D2	Clase D	2	4.5–26 V	50 W	0.1 %	USD 1.20
TPA3118D2	Clase D	2	4.5–26 V	50 W	0.1 %	USD 1.13
TPA3112D1	Clase D	1	8–26 V	25 W	0.05 %	USD 0.95
TPA3111D1	Clase D	1	8–26 V	10 W	0.05 %	USD 0.65

Tabla 1: Amplificadores pre-seleccionados que cumplen los requisitos mínimos necesarios propuestos para las aplicaciones experimentales de acústica.

A partir de una evaluación de la relación entre el costo, las prestaciones y las disponibilidad en el mercado local, se seleccionó finalmente el amplificador TPA3118D2. El mismo se encuentra en forma de módulo funcional (Fig. 3).

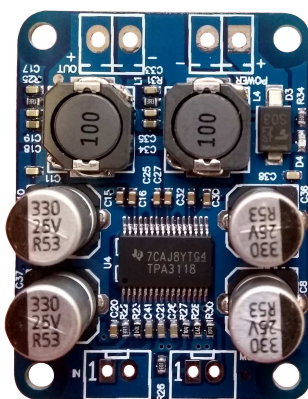


Figura 3: Módulo funcional del amplificador TPA3118D2.

2.2. Alimentación

Para la etapa de alimentación se utiliza una fuente conmutada de bajo ruido Hipro HP-OK065B13 (entrada: CA 100–240 V, ~ 1.7 A, 50–60 Hz; salida: CC 18.5 V, 3.5 A, 65 W). La misma debe proveer la potencia mínima necesaria para que funcionen los amplificadores, el controlador, y todos los circuitos integrados del sistema en condiciones normales de carga plena.

Como no todos las partes de hardware se alimentan con la misma diferencia de potencial, se incluyeron convertidores *buck* para reducir la tensión según corresponda a 5 V o 7 V.

2.3. Demultiplexor

La etapa de demultiplexación es una de las etapas más importantes del sistema ya que permite guiar la señal de entrada a alguno de los canales que posteriormente serán amplificados. La misma está implementada por el CI 74HC4051 que puede ser utilizado como multiplexor/demultiplexor digital o analógico y posee mejores características de distorsión que el CI CD4051 utilizado en el diseño previo.

En nuestro caso se utiliza como demultiplexor analógico controlado digitalmente. Este CI, como así también el resto de los integrados, emplea tecnología de semiconductor de óxido de metal complementario (complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS), permitiendo intercambiar entre niveles lógicos de 3.3 V y 5 V. El CI 74HC4051 posee una respuesta en frecuencia de 180 MHz y una THD eléctrica de 0.018 % ($V_{CC} = 4.5$ V)

2.4. Circuitos de protección

Existen dos partes en la sección de circuitos de protección: la destinada a proteger la señal de la diafonía (protección anti-crosstalk) (Fig. 4a) y la que protege al hardware del amplificador de audio de daños provocados por su utilización sin parlantes conectados (Fig. 4b).

La primera es implementada mediante un CI 74HC138 el cual es un decodificador 3 a 8, que recibe las mismas señales de selección que el demultiplexor y, de acuerdo a su valor, coloca una salida en bajo y las restantes salidas en alto. Esta característica se emplea para habilitar un sólo amplificador por placa simultáneamente y que todas las salidas restantes (sin uso) queden silenciadas.

La segunda parte detecta a través de un sistema mecánico si un parlante está conectado o no a la salida de un amplificador. En caso de que no detecte la presencia de un conector de parlante, envía una señal para silenciar dicho amplificador.

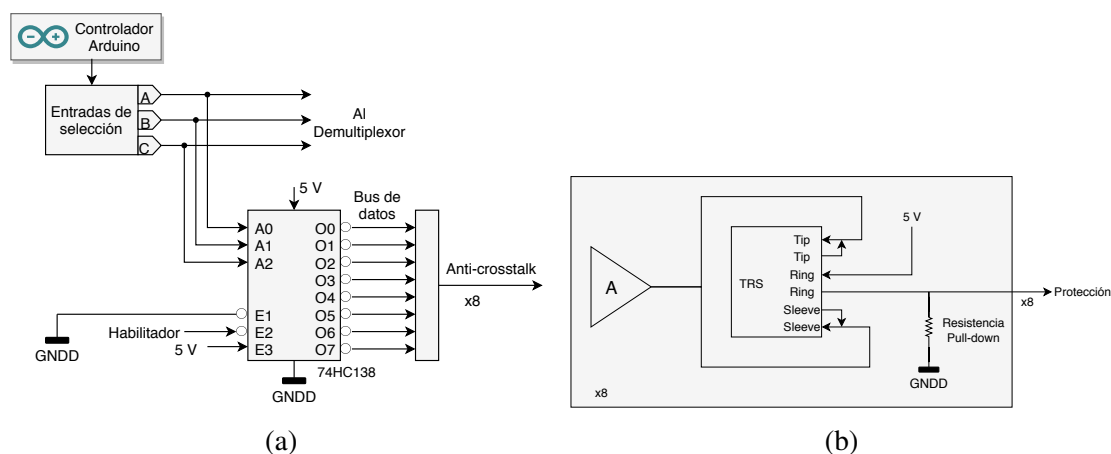


Figura 4: Etapas de protección: (a) de señal (anti-crosstalk), y (b) de hardware.

Estas dos partes se unen mediante la lógica OR, es decir, si al menos una solicita silenciar al amplificador, el mismo quedará con la salida silenciada (Fig. 5). En este contexto, silenciar una salida significa que el pin MUTE del CI del amplificador TPA3118D2 recibe un alto lógico, anulando la tensión a la salida.

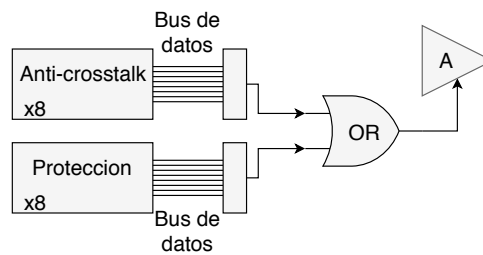


Figura 5: Lógica de unión de los dispositivos de protección.

2.5. Software

El control del dispositivo se realiza mediante un software implementado en dos módulos: una librería multiplataforma que se ejecuta en una PC y un software embebido en la placa controladora Arduino Mega 2560 .

La librería de software está programada en Python versión 3 lo que permite su ejecución en múltiples sistemas operativos, tales como Linux, Windows y macOS. La misma se encarga de establecer la comunicación con el dispositivo mediante un puerto serial USB y proveer las interfaces necesarias para realizar la activación (o desactivación) mediante programación de las salidas seleccionadas. También cuenta con un programa básico de pruebas que posee una interfaz gráfica (Fig. 6) y una consola de comandos.

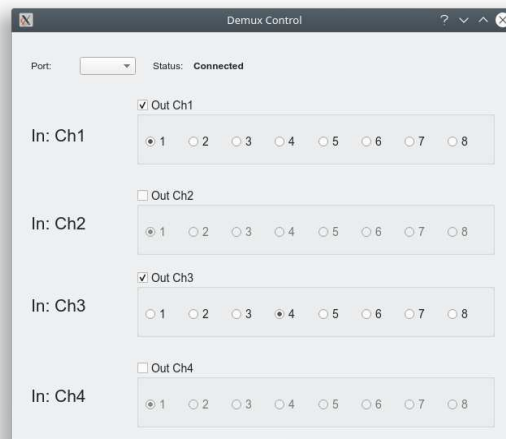


Figura 6: Interfaz gráfica del programa de pruebas para controlar al dispositivo.

El software embebido en la placa Arduino está escrito en C/C++. Se encarga de controlar los CI del dispositivo a partir de interpretar los comandos que son enviados por la librería de software. De esta manera es capaz de demultiplexar un canal de entrada a una salida seleccionada. Además, administra la señalización mediante 32 LEDs WS2812B, los cuales funcionan de manera serial con un solo pin de datos, permitiendo regular el color RGB y el brillo de manera individual.

3. RESULTADOS

En primer lugar se realizó un análisis de potencia requerida por el dispositivo en condiciones de funcionamiento pleno, luego se realizaron mediciones de respuesta en frecuencia de la cadena amplificador-parlante y THD acústica.

3.1. Configuración experimental de medición

Para todas las mediciones se utilizó una configuración experimental que contaba con la etapa de potencia del dispositivo, la fuente conmutada de bajo ruido y uno de los altavoces de 1" de rango extendido que se prevén utilizar en las aplicaciones experimentales (Aurasound NSW1-205-8A, impedancia nominal de 8Ω , potencia de 5 W RMS) montados en un baffle normalizado según IEC 60268-5. Como receptor acústico se utilizó un micrófono Brüel & Kjaer Type 4133 enfrentado al parlante a 1 m de distancia junto con un pre-amplificador Brüel & Kjaer Type 2804. Tanto el pre-amplificador como la etapa de potencia del dispositivo fueron conectados a una interfaz de audio profesional PreSonus Studio 26 a la entrada y a la salida de línea respectivamente.

Todas las mediciones se llevaron a cabo en una cámara tratada acústicamente (dimensiones $4.20 \times 3.80 \times 2.60$ m, volumen ~ 41 m³) con las paredes y cielo raso cubierto de paneles de fibra de vidrio y el piso mediante una alfombra. La misma posee un tiempo de reverberación de 170 ms en la banda de octavas de 1 kHz. El ruido de fondo fue de ~ 17 dBA SPL.

3.2. Análisis de potencia

Para determinar la potencia necesaria para el funcionamiento del dispositivo a plena capacidad, se realizó el cálculo de la potencia total P_{tot} consumida a partir de la suma de las potencias parciales para diferentes condiciones

$$P_{\text{tot}} = 4 \times P_{\text{spkon}} + 28 \times P_{\text{amp+spkoff}} + P_{\text{res}} \quad (1)$$

donde P_{spkon} es la potencia eléctrica consumida por el parlante con señal, $P_{\text{amp+spkoff}}$ es la potencia del conjunto amplificador-parlante sin señal, y P_{res} es la suma de potencias de los elementos restantes del sistema que se pueden observar en la Tabla 2.

Nomenclatura	Significado	Valor
P_{amp}	Potencia consumida por amplificador encendido y con señal	1.841 W
P_{ard}	Potencia máxima consumida por el Arduino	2.103 W
P_{LEDs}	Potencia máxima consumida por los LEDs	0.6 W
P_{buck5V}	Potencia disipada en el convertidor buck que alimenta a los CIs	1.89 W
P_{buck7V}	Potencia disipada en el convertidor buck que alimenta al Arduino	0.37 W
$P_{74\text{HC}4051}$	Potencia máxima del CI 74HC4051	0.5 W
$P_{\text{CD}4071}$	Potencia máxima del CI CD4071	0.5 W
$P_{74\text{HC}138}$	Potencia máxima del CI 74HC138	0.5 W

Tabla 2: Potencias relevadas de los elementos restantes.

Para calcular P_{res} se realiza

$$\begin{aligned}
 P_{\text{res}} &= 4 \times P_{\text{amp}} + P_{\text{ard}} + P_{\text{LEDs}} + P_{\text{buck5V}} + P_{\text{buck7V}} + 4 \times P_{74\text{HC}4051} \\
 &\quad + 8 \times P_{\text{CD}4071} + 4 \times P_{74\text{HC}138} \\
 P_{\text{res}} &= 20,33 \text{ W.}
 \end{aligned} \quad (2)$$

Es necesario considerar que la potencia de los amplificadores en funcionamiento P_{amp} fue obtenida a partir mediciones. La potencia de la placa Arduino Mega 2560 P_{ard} se calculó multiplicando la cantidad de salidas en uso por su potencia máxima –calculada a partir de la información de corriente máxima brindada por el fabricante–, agregándole la potencia medida de la placa en reposo. Las potencias de los CIs se obtuvieron de la potencia máxima de la respectiva hoja de datos, la potencia de los convertidores *buck* se determinó en base a su eficiencia para cada tensión de salida, y la potencia de los LEDs a partir de la ley de Ohm.

Ahora, para determinar P_{spkon} y $P_{amp+spkoff}$ se evaluaron dos casos de uso: 4 parlantes funcionando a máxima potencia y 4 parlantes funcionando a baja potencia. La primera condición experimental utilizó la máxima potencia soportada por los parlantes (~ 5 W cada uno), que se logró emitiendo una señal senoidal de 1 kHz con un nivel sonoro de ~ 81 dB a 1 m de distancia. El segundo caso se logró emitiendo la misma señal con un nivel de ~ 69 dB utilizando la misma configuración. Además, ambos casos fueron evaluados en dos condiciones diferentes: con las 28 salidas restantes silenciadas y sin silenciar.

La Tabla 3 muestra los resultados de P_{tot} obtenidos para la combinación de los dos casos de uso con las dos condiciones. Entre paréntesis se indican los valores contemplando un margen de seguridad del 5 %.

	Amplificadores sin señal no silenciados $P_{amp+spkoff} = 0.748$ W	Amplificadores sin señal silenciados $P_{amp+spkoff} = 0.187$ W
4 parlantes a máxima potencia $P_{spkon} = 4.823$ W	60.6 W (63.6 W)	44.9 W (47.1 W)
4 parlantes a baja potencia $P_{spkon} = 0.202$ W	42.1 W (44.2 W)	33.7 W (35.3 W)

Tabla 3: Potencia total del sistema para los dos casos de uso y dos condiciones. Los valores entre paréntesis incluyen un margen de seguridad del 5 %.

Estos resultados indican que, para el peor caso, el dispositivo requerirá una potencia de ~ 64 W (incluyendo el margen de seguridad). Como en las aplicaciones experimentales se utilizan niveles bajos en los parlantes, el caso más usual de funcionamiento pleno requerirá una potencia ~ 34 W (sin incluir margen de seguridad).

3.3. Respuesta en frecuencia

Con el objetivo de evaluar la respuesta en frecuencia de la cadena amplificación-altavoz se realizaron mediciones utilizando una señal de excitación de barrido exponencial (Müller y Massarani, 2001), con un rango de frecuencias de 22 Hz a 22 kHz, duración 2.73 s, frecuencia de muestreo de 48 kHz. El espectro de frecuencias medido y promediado por bandas de 1/6 de octavas, muestra que se obtiene una respuesta relativamente plana en el rango de frecuencias de interés (variación de ± 4 dB entre 200–20000 Hz) (Fig. 7).

Con estos resultados es posible generar filtros inversos con el objetivo ecualizar cada salida y minimizar la influencia de los parlantes y la etapa de amplificación.

3.4. Distorsión armónica total

La THD es un parámetro de calidad importante, usado para cuantificar el nivel de armónicos en forma de ondas de tensión o de corriente, en comparación a su fundamental (Shmilovitz,

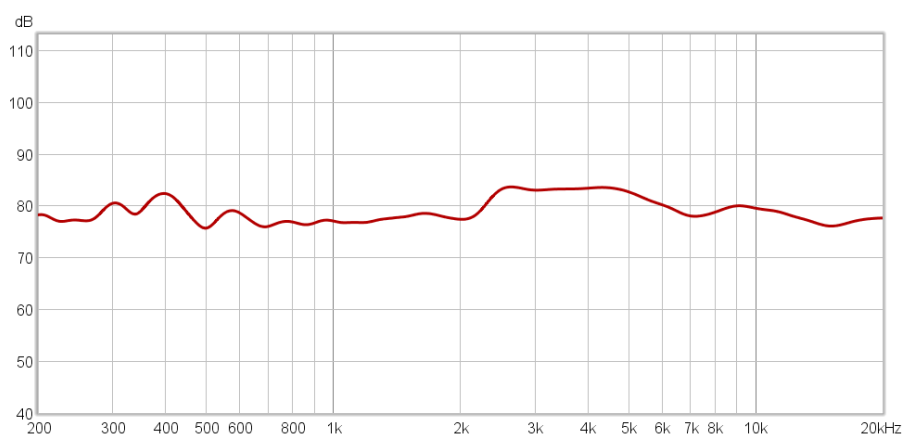


Figura 7: Espectro de frecuencias promediado por bandas de 1/6 de octava de la cadena amplificación-altavoz.

2005). Se realizaron mediciones acústicas del THD utilizando el software de acústica REW, para un nivel de 66 dB SPL y una señal senoidal de 1000 Hz para diferentes configuraciones de amplificadores-altavoces. En la Tabla 4 se muestran los resultados para dos amplificadores: el TPA3118D2 y el PAM8610 elegido inicialmente, y dos parlantes: el modelo AuraSound NSW1-205-8W, y un monitor de audio pasivo Thonet & Vander Vertrag de calidad profesional con fines comparativos. Además, también se evaluó dicho monitor junto a su respectivo amplificador de la misma marca.

	AuraSound NSW1-205-8W	Thonet & Vander Vertrag
Amplificador TPA3118D2	0.3 %	0.1 %
Amplificador. PAM8610	1.8 %	1.2 %
Amplificador Thonet & Vander	-	0.2 %

Tabla 4: Resultados de mediciones acústicas de THD.

En base a estos resultados se pudo observar que el amplificador TPA3118D2 posee una menor THD comparado con el amplificador PAM8610, para ambos parlantes. Es importante también considerar que la THD de la configuración elegida: amplificador TPA3118D2 y parlante AuraSound, es comparable con la cadena profesional amplificador-altavoz Thonet & Vander.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una alternativa de bajo costo de amplificador de audio multicanal con control de salidas para ser utilizado en aplicaciones experimentales de acústica, específicamente en el área de tecnología binaural. Esta alternativa utiliza soluciones electrónicas ya fabricadas, como los módulos de los amplificadores, y otras que fueron diseñadas en forma dedicada, como los circuitos de protección. Se tuvo como criterio de diseño minimizar la manipulación de la señal de audio analógico para lograr una buena calidad en la reproducción. Además, contiene pines de expansión con todas las señales de interés del circuito, permitiendo utilizarlas externamente.

Como trabajo a futuro se prevé realizar pruebas exhaustivas del dispositivo utilizándolo en aplicaciones específicas, y agregar otras funcionalidades como, por ejemplo, aplicar filtros digitales en tiempo real sobre cada una de las salidas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a Sebastián P. Ferreyra por sus comentarios y su colaboración. Este trabajo fue financiado por subsidios de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, Argentina (PICT 2016-0738); el Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Provincia de Córdoba, Argentina (GRFT 2017 Nro. 52); y la Universidad Tecnológica Nacional, Argentina (PID UTN4498).

REFERENCIAS

- Brichetto D., Carlson B., Gaston M.L., Olson T., y Loebach J. A comparison of free-field and headphone based sound localization tasks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(3):1814–1814, 2018. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.5035950.
- Choi J., Moon I., Kim E., Park H.S., Kim B., Chung W.H., Cho Y.S., Brown C., y Hong S. Sound Localization and Speech Perception in Noise of Pediatric Cochlear Implant Recipients: Bimodal Fitting Versus Bilateral Cochlear Implants. *Ear and Hearing*, 38(4):426–440, 2017. ISSN 0196-0202. doi:10.1097/AUD.0000000000000401.
- Majdak P., Balazs P., y Laback B. Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions. *Journal of the Audio Engineering Society*, 55(7/8):623–637, 2007.
- Majdak P., Masiero B., y Fels J. Sound localization in individualized and non-individualized crosstalk cancellation systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4):2055–2068, 2013. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.4792355.
- Müller S. y Massarani P. Transfer-Function Measurement with Sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(6):443–471, 2001.
- Richter J.G. *Fast Measurement of Individual Head-Related Transfer Functions*. Logos Verlag Berlin GmbH, 2019. ISBN 978-3-8325-4906-0.
- Shmilovitz D. On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1):526–528, 2005. ISSN 0885-8977. doi:10.1109/TPWRD.2004.839744.
- Voss P., Tabry V., y Zatorre R.J. Trade-Off in the Sound Localization Abilities of Early Blind Individuals between the Horizontal and Vertical Planes. *Journal of Neuroscience*, 35(15):6051–6056, 2015. ISSN 0270-6474, 1529-2401. doi:10.1523/JNEUROSCI.4544-14.2015.
- Watanabe K., Iwaya Y., Suzuki Y., Takane S., y Sato S. Dataset of head-related transfer functions measured with a circular loudspeaker array. *Acoustical Science and Technology*, 35(3):159–165, 2014. doi:10.1250/ast.35.159.
- Yu G., Wu R., Liu Y., y Xie B. Near-field head-related transfer-function measurement and database of human subjects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 143(3):EL194–EL198, 2018. ISSN 0001-4966. doi:10.1121/1.5027019.