

Análisis de la distorsión armónica total de un dispositivo demultiplexor y amplificador de audio

Total harmonic distortion analysis of an audio demultiplexer-amplifier device

R. Martín Guido *

Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), CONICET, UTN Facultad Regional Córdoba, Argentina.
rguido@frc.utn.edu.ar

Fermín Scaliti *

Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), CONICET, UTN Facultad Regional Córdoba, Argentina.
ferminscaliti@gmail.com

Fabián C. Tommasini

Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), CONICET, UTN Facultad Regional Córdoba, Argentina.
ftommasini@frc.utn.edu.ar

* Contribución igualitaria en la elaboración del trabajo

Resumen

Diversas aplicaciones acústicas experimentales, como la medición de funciones de transferencia de cabeza (HRTFs), utilizan múltiples canales de salida de audio que no se activan simultáneamente. Es posible entonces realizar una demultiplexación analógica a partir de una menor cantidad de canales. En este trabajo se evaluó objetivamente la calidad sonora de un sistema demultiplexor y amplificador de audio utilizado en conjunto con la cadena electroacústica de un sistema de medición de HRTFs. Se realizaron mediciones eléctricas y acústicas utilizando la distorsión armónica total (THD) como parámetro de calidad. Los resultados arrojaron que la THD eléctrica promedio es $0,061\% \pm 0,002\%$, mientras que la THD acústica promedio es $0,056\% \pm 0,002\%$, en las mejores condiciones. Estos valores se encuentran dentro de los parámetros de calidad deseables (THD menor a 1%) según la literatura. Se evaluaron también otras condiciones experimentales acústicas que permitieron tomar decisiones acerca del mejor uso del dispositivo.

Palabras clave: Electroacústica, Amplificadores de Audio, Demultiplexación de Señales, Distorsión Armónica Total

Abstract

Several experimental acoustic applications, such as the measurement of head-related transfer functions (HRTFs), use multiple audio output channels that are not activated simultaneously. It is then possible to perform an analog demultiplexing from a fewer number of channels. In this study, the sound quality of an audio

demultiplexer-amplifier system used in conjunction with the electroacoustic chain of an HRTF measurement system was objectively evaluated. Electrical and acoustic measurements were performed using total harmonic distortion (THD) as a quality parameter. The results showed that the average electrical THD is $0.061\% \pm 0.002\%$, while the average acoustic THD is $0.056\% \pm 0.002\%$, under the best conditions. These values are within the desirable quality parameters (THD less than 1%) according to the literature. Other acoustic experimental conditions were also evaluated to make decisions about the best use of the device.

Keywords: Electroacoustics, Audio Amplifiers, Signal Demultiplexing, Total Harmonic Distortion

Introducción

Diversas aplicaciones en el campo de la acústica virtual precisan operar una gran cantidad de altavoces para lograr un registro completo de un espacio sonoro, ya sea para ser caracterizado analíticamente o utilizado en ensayos acústicos y psicoacústicos. Particularmente, los sistemas de medición de funciones de transferencia de cabeza (head-related transfer functions, HRTFs) utilizan comúnmente más de 20 altavoces (Guido et al., 2019; Majdak et al., 2013; Richter et al., 2016), los cuales no necesitan activarse en forma simultánea (Majdak et al., 2007).

En el Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Ejecutora de doble dependencia CONICET y Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba, se está desarrollando un sistema de medición de HRTFs compuesto por una serie de equipos diseñados ad-hoc (Guido et al., 2019, Mendez et al. 2020). Uno de estos equipos fundamentales es un sistema demultiplexor y amplificador de audio, denominado AuDemux (Scaliti et al., 2019; Scaliti et al., 2020).

Este dispositivo demultiplexa 4 entradas de audio analógico de nivel de línea, provenientes de una interfaz de audio profesional, a 32 salidas de audio de potencia. Una computadora personal (PC) es la encargada de administrar tanto las señales de audio, por intermedio de una interfaz de audio profesional, como las señales de control, mediante conexión USB. El sistema principal del Audemux consta de 4 placas demultiplexoras de 8 salidas cada una, las cuales se encargan de realizar la demultiplexación y, posteriormente, la amplificación de las señales de audio por medio de amplificadores Clase D Texas Instruments TPA3118D2. Un sistema embebido, implementado en un módulo ESP32 y comunicado con la PC, selecciona la salida a la cual se redirecciona el sonido analógico.

En el presente trabajo se pretende caracterizar objetivamente la calidad sonora de este dispositivo al ser utilizado en conjunto con la cadena electroacústica que constituye el sistema de medición de HRTFs (Guido et al., 2019; Scaliti et al., 2019; Mendez et al., 2020). Se empleó como medida la distorsión armónica total (total harmonic distortion, THD). La THD es un indicador importante usado para cuantificar el nivel de armónicos en una onda de tensión o corriente (Shmilovitz, 2005) que puede ser expresado en términos relativos, porcentuales o en decibeles. En este caso, se utilizará la definición que compara la cantidad de armónicos con respecto a la fundamental en términos porcentuales, de acuerdo con la ecuación 1.

$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \cdot 100 \% \quad (1)$$

donde V_n es la amplitud del armónico n -ésimo y V_1 la amplitud de la frecuencia fundamental.

Como referencia, para la reproducción de señales de audio de alta fidelidad (Hi-Fi) es recomendable que la THD para una señal senoidal de 1 kHz sea menor al 1% (Guerriero et al., 2012). En esta misma dirección, investigaciones publicadas sobre la percepción de la distorsión por el oído humano sugieren un límite que se encuentra en el orden del 1% (International Electrotechnical Commission, 2018).

Metodología

Para caracterizar la calidad sonora, se realizaron mediciones de la THD a las señales eléctricas que llegan al altavoz, y a las señales acústicas registradas por un micrófono. En este último caso, bajo diferentes condiciones experimentales de uso. Se utilizó una señal de excitación senoidal de 1 kHz, generada por el software REW 5.19 con una resolución de 16 bits y una frecuencia de muestreo de 44100 Hz. Como condición normal de uso se estableció un nivel de presión sonora de ~66 dBA, que representó una potencia eléctrica de ~110 mW.

Todas las mediciones se llevaron a cabo en una cámara tratada acústicamente (dimensiones 4.20 m × 3.80 m × 2.60 m, volumen ~41 m³) con 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. Se registraron condiciones ambientales entre 18°C y 20°C de temperatura y entre 61% y 72% de humedad relativa.

La configuración elemental contó con el AuDemux como dispositivo bajo testeo, controlado mediante una computadora portátil y una interfaz de sonido profesional PreSonus Studio 26 con cuatro salidas conectadas a las entradas del dispositivo. A cada salida del AuDemux se conectó una caja acústica con un altavoz AuraSound NSW1-205-8W (impedancia nominal de 8 Ω, potencia máxima de 5 W RMS), el cual posee una variación de ±4 dB entre 0,2 y 20 kHz (Scaliti et al., 2019). Todos los elementos fueron cubiertos con material absorbente para disminuir las reflexiones acústicas.

Mediciones eléctricas de THD

Para las mediciones eléctricas se utilizó el osciloscopio Digilent Analog Discovery 2 de 2 entradas y 2 salidas BNC, una resolución de 14 bits, 100 MS/s y un ancho de banda de 30 MHz, en conjunto con el software Waveforms 3.16.3. Se utilizó una señal temporal de 262144 puntos muestreados a 50 kHz durante ~5,24 s, en modo diferencial y un filtro pasa banda entre 0,1 y 20 kHz. Para el cálculo de la THD se utilizaron los valores de la frecuencia fundamental junto a 9 armónicos.

Mediciones acústicas de THD

Para las mediciones acústicas se utilizó el software REW. Como receptor acústico se utilizó un micrófono Brüel & Kjaer Type 4133 enfrentado al parlante a 1 m de distancia sobre el eje axial, a una altura de 1 m, y un preamplificador Brüel & Kjaer Type 2804 conectado a la interfaz de audio PreSonus Studio 26. Los parámetros usados en el software fueron: resolución espectral de 65536 puntos, ventana rectangular, 8 promediaciones, filtro pasa banda entre 0,1 y 20 kHz y sin suavizado. Para el cálculo de la THD acústica se utilizaron los valores de la frecuencia fundamental junto a 8 armónicos, la cual fue la configuración más cercana a la usada para las mediciones eléctricas de THD.

Se evaluaron diferentes condiciones experimentales: a) *Con Reposo* temporal (al menos de 165 s) y *Sin Reposo* temporal de uso entre las diferentes salidas de la misma placa del Audemux. El objetivo fue evaluar la posible implementación de técnicas de excitación acústicas para sistemas rápidos de medición de HRTFs (Richter et al., 2016). b) Dos cajas acústicas (*Caja A* y *Caja B*) idénticas, que siguen lineamientos de un estudio anterior (Cravero et al., 2020), con un volumen interior de 216 cm³. Se diferenciaron por su sistema constructivo: la *Caja A* poseía un

sistema de ajuste del altavoz en base a encastre y la *Caja B* se encontraba sujeta mediante tornillos. Esto permitirá evaluar la forma de construcción para las cajas acústicas del arco de altavoces del sistema de medición de HRTFs del CINTRA.

Para evaluar estas condiciones, se realizaron tres experimentos.

Experimento 1: Caracterización inicial mediante THD de las placas que componen el AuDemux. Se utilizó la configuración *Con Reposo* y la *Caja A*. Se realizaron 10 mediciones de THD para cada una de las 32 salidas (10 repeticiones \times 4 placas \times 8 canales por placa = 320 mediciones).

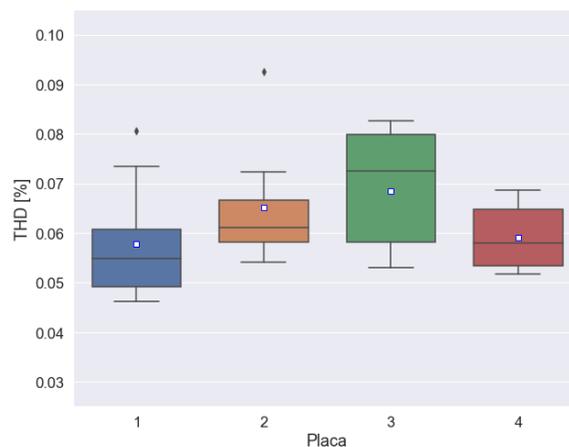
Experimento 2: Determinar la influencia del reposo en la THD. Se eliminó el reposo entre mediciones (condición *Sin Reposo*), manteniendo el altavoz funcionando con sonido ininterrumpido, y se utilizó la *Caja A*. Se realizaron 10 mediciones para cada una de las salidas de la *Placa 4* (10 repeticiones \times 1 placa \times 8 canales por placa = 80 mediciones), para comparar los resultados con el Experimento 1.

Experimento 3: Determinar la influencia del sistema de sujeción del altavoz en la THD. Se utilizó la *Caja B* en condición *Con Reposo*. Se realizaron 10 mediciones por placa para una salida seleccionada (10 repeticiones \times 4 placas \times 1 canal por placa = 40 mediciones), para comparar resultados con el Experimento 1.

Resultados

Mediciones eléctricas de THD

La THD eléctrica promedio general junto a su error estándar de la media se estableció en $0,061\% \pm 0,002\%$, con una desviación estándar de $0,009\%$. Los valores discriminados por Placa se muestran en el boxplot de la Figura 1.



A partir de estos resultados, se realizó un tratamiento estadístico para los valores *outliers* indicados por el boxplot: fueron reemplazados por el valor medio respectivo de cada placa. Se obtuvieron así los siguientes valores promedios: Placa 1: $0,055\% \pm 0,003\%$; Placa 2: $0,061\% \pm 0,002\%$; Placa 3: $0,069\% \pm 0,004\%$; y Placa 4: $0,059\% \pm 0,002\%$.

Se realizó una prueba *t*-Student apareada con un $\alpha = 0,05$ para comparar el THD eléctrico entre todas las placas. Se aplicó la corrección de Bonferroni al *p*-valor debido a las comparaciones múltiples. Se comprobó que no existen diferencias significativas en la THD entre las diferentes placas (Tabla 1).

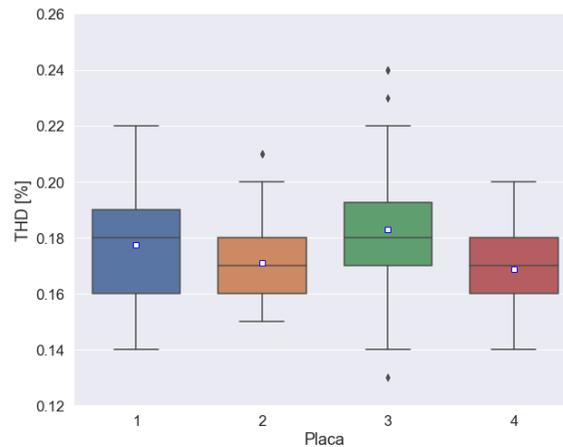
Placas	1 / 2	1 / 3	1 / 4	2 / 3	2 / 4	3 / 4
<i>t</i>	-1,887	-2,788	-1,147	-1,683	0,853	2,151
<i>p</i>	0,465	0,079	1,000	0,674	1,000	0,283

Tabla 1. Comparación entre placas mediante *t*-Student para THD eléctrico

Mediciones acústicas de THD

Experimento 1: Caracterización inicial mediante THD de las placas que componen el AuDemux

La THD promedio general junto a su error estándar de la media fue de 0,175% ± 0,001%, con una desviación estándar de 0,019%. En la Figura 2 se muestra la distribución de los valores en un gráfico boxplot.



También aquí fueron reemplazados los valores *outliers* por el valor medio respectivo de cada placa. Se obtuvieron así los siguientes valores promedio: Placa 1: 0,177% ± 0,002%; Placa 2: 0,170% ± 0,002%; Placa 3: 0,181% ± 0,002%; y Placa 4: 0,169% ± 0,001%.

Luego, se realizó una prueba *t*-Student apareada con un $\alpha = 0,05$ para comparar el THD acústico entre todas las placas, aplicando también la corrección de Bonferroni. En la misma dirección que las mediciones eléctricas, se comprobó que no existen diferencias significativas en los valores de la THD entre las diferentes placas (Tabla 2).

Placas	1 / 2	1 / 3	1 / 4	2 / 3	2 / 4	3 / 4
<i>t</i>	1,006	-0,420	1,692	-1,179	0,579	1,935
<i>p</i>	1,000	1,000	0,807	1,000	1,000	0,565

Tabla 2. Comparación entre placas mediante *t*-Student para THD acústico.

Experimento 2: Determinar la influencia del reposo en la THD

Como no existieron diferencias significativas para la THD acústica entre placas, se compararon las condiciones *Con Reposo* y *Sin Reposo* sólo para la Placa 4, utilizando la misma caja acústica anterior (*Caja A*). El THD promedio para las mediciones en condición *Sin Reposo* fue de 0,273% ± 0,007%, con una desviación estándar de 0,066%. Se realizó una prueba *t*-Student apareada con un $\alpha = 0,05$ para comparar los valores de THD entre ambas condiciones. Se observó que la THD para la condición *Con Reposo* es significativamente menor ($t = 3.923$, $p = 0.005$) que la condición *Sin Reposo*.

Experimento 3: Determinar la influencia del sistema de sujeción del altavoz en la THD

Se utilizó la otra caja acústica (*Caja B*) para comparar los valores de THD obtenidos con la primera (*Caja A*), manteniendo el reposo entre mediciones de distintas salidas (condición *Con Reposo*), ya que arrojó mejores resultados. Se obtuvo una THD promedio de $0,056\% \pm 0,002\%$, con una desviación estándar de $0,014\%$. Se realizó una prueba *t*-Student apareada con un $\alpha = 0,05$ para comparar la THD entre ambas cajas. El resultado indicó que los valores de THD para la *Caja B* son significativamente menores ($t = -15,034$; $p = 0,001$) que los de la *Caja A*.

Conclusiones

La distorsión armónica total (THD) es un parámetro que permite cuantificar la calidad del audio de un equipamiento. Se evaluó un dispositivo demultiplexor y amplificador, llamado AuDemux, utilizando este indicador. Se pudo corroborar que no existieron diferencias significativas en las mediciones de THD entre las cuatro placas que posee el dispositivo, ya sea para mediciones eléctricas como para mediciones acústicas.

A partir de las diferentes condiciones experimentales evaluadas, también se comprobó que la condición *Con Reposo* posee una mejora significativa con respecto a la condición *Sin Reposo*. Esto indica que es conveniente realizar un reposo entre los canales de una misma placa al momento de la conmutación. En el uso con un sistema de medición de HRTFs, es conveniente no realizar mediciones sucesivas con una misma placa, sino que se debería alternar salidas de distintas placas. Por ejemplo, en lugar de usar la secuencia de salidas (placa-canal) 1-1, 1-2, 1-3, 1-4, 1-5, ... conviene reemplazarla por la secuencia 1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 1-2, ... Otra conclusión importante es que se determinó experimentalmente que el mejor sistema de construcción para la caja acústica es la sujeción mediante tornillos.

Los resultados generales arrojaron que la THD eléctrica promedio del dispositivo es de $0,061\% \pm 0,002\%$, mientras que la THD acústica promedio es de $0,056\% \pm 0,002\%$, en las mejores condiciones (*Caja B*, *Con Reposo* entre mediciones). Esto demuestra que funciona dentro de los parámetros de calidad deseables (THD menor a 1% para una frecuencia de 1 kHz).

Referencias

- Cravero, G. A., Tommasini, F. C., Guido, R. M., Scaliti, F. (2020). Diseño de caja acústica para sistema de medición de funciones de transferencia de cabeza. *Jornadas de Ciencia y Tecnología "50 Aniversario" de la UTN FRSF*.
- Guerriero, E., Polloni, L., Rizzi, L. G., Bianchi, M., Mondello, G., & Sordan, R. (2012). Graphene Audio Voltage Amplifier. *Small*, 8(3), 357-361. <https://doi.org/10.1002/sml.201102141>
- Guido, R. M., Pucheta, M. A., Tommasini, F. C., Vergara, R. O., & Scaliti, F. (2019). Sistemas de Medición de HRTFS Individuales: Revisión del Estado del Arte y Desarrollos en Argentina. *Mecánica Computacional*, 37(5), 77-85.
- International Electrotechnical Commission. (2018). *Sound system equipment—Part 3: Amplifiers*. (IEC Standard No. 60268-3:2018). <https://webstore.iec.ch/publication/32788>
- Majdak, P., Balazs, P., & Laback, B. (2007). Multiple Exponential Sweep Method for Fast Measurement of Head-Related Transfer Functions. *Journal of the Audio Engineering Society*, 55(7/8), 623-637.

- Majdak, P., Masiero, B., & Fels, J. (2013). Sound localization in individualized and non-individualized crosstalk cancellation systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4), 2055-2068. <https://doi.org/10.1121/1.4792355>
- Mendez, M., Bordón, J. C., Guido, R. M., Cravero, G. A., Scaliti, F., Tommasini, F. C. (2020). Diseño mecánico de soporte de altavoces para un sistema de medición de funciones de transferencia de cabeza. *Jornadas de Ciencia y Tecnología "50 Aniversario" de la UTN FRSF*.
- Richter, J.-G., Behler, G., & Fels, J. (2016, mayo 26). *Evaluation of a Fast HRTF Measurement System*. Audio Engineering Society Convention 140.
- Scaliti, F., Rametta, J., Marcel, E., Guido, R. M., Tommasini, F. C. (2020). Control de sistema demultiplexor-amplificador de audio basado en módulo microcontrolador ESP32. *Congreso Argentino de Sistemas Embebidos 2020*.
- Scaliti, F., Tommasini, F. C., Guido, R. M., Cravero, G. A., Capiglioni, L., & Guber, D. M. (2019). Amplificador de Audio Multicanal con Control de Salidas para Aplicaciones Experimentales de Acústica. *Mecánica Computacional*, 37(5), 87-96.
- Shmilovitz, D. (2005). On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1), 526-528. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.839744>