

VALIDACIÓN DE PROGRAMA PARA MEDICIÓN DE SISTEMAS ACÚSTICOS LINEALES INVARIANTES EN EL TIEMPO

Sebastián P. Ferreyra^a, Ana M. Moreno^a, Juan I. Morales^b, Juan F. López^a, José Y. Simes^a, Santiago I. Gelerstein Moreyra^a, Gabriel A. Cravero^a, Fabián C. Tommasini^{a, c}, Hugo C. Longoni^a, Lucas G. Gilberto^a, Oscar A. Ramos^{a, c}

^a*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA) Unidad Asociada Conicet, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina. X5016ZAA.
acustica@scdt.frc.utn.edu.ar, <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

^b*Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica (IIIE) Alfredo Desages (UNS - CONICET), Depto. De Ing. Eléctrica y Computadoras, Universidad Nacional del Sur. Avda. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina. B8000CPB
iiie@uns.edu.ar, <http://www.iiie-conicet.gob.ar>*

^c*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina,
<http://www.conicet.gov.ar>*

Palabras Claves: sistema lineal invariante en el tiempo, respuesta impulsiva, relación señal ruido, deconvolución.

Resumen.

Los sistemas acústicos lineales e invariantes en el tiempo (SALIT) se caracterizan por su función de transferencia y respuesta impulsiva, siendo ambas dependientes de la posición. Generalmente, la medición de esta respuesta impulsiva de un SALIT se efectúa con instrumentos que emplean plataformas tecnológicas específicas y costosas. Actualmente, la medición de la respuesta impulsiva se realiza por métodos directos e indirectos. Los primeros utilizan señales de excitación de carácter impulsivo como ráfagas de ruido y disparos de pistola, mientras que los segundos, aplican señales determinísticas como barridos de frecuencia y secuencias binarias de máxima longitud. Particularmente en electroacústica, la medición de la respuesta impulsiva es vital para analizar y evaluar las prestaciones de transductores como micrófonos y altavoces. En este trabajo se presentan los resultados de ensayos realizados y la validación del módulo de medición de respuesta impulsiva desarrollado con Matlab y empleando una tarjeta de adquisición de sonido profesional de bajo costo. La validación se realizó comparando los resultados obtenidos con los proporcionados por sistemas de medición comerciales. Para cada medición se comparó la respuesta impulsiva, la respuesta en frecuencia y la relación señal ruido obtenida. Este módulo, forma parte de un sistema automático de medición de dispositivos acústicos en actual desarrollo que permite caracterizar dispositivos acústicos activos y pasivos.

1 INTRODUCCION

Los Sistemas Acústicos Lineales e Invariantes en el Tiempo (SALIT) se caracterizan por su Función de Transferencia (FT) y Respuesta Impulsiva (RI), siendo ambas dependientes de la posición ([Adriaensen, 2006](#)). Generalmente, la medición de la RI de un SALIT se efectúa con instrumentos que emplean plataformas tecnológicas específicas y costosas en función de las características del sistema. Actualmente, la medición de la RI se realiza por métodos directos e indirectos ([Stan et al, 2002](#)). Los primeros utilizan señales de excitación de carácter impulsivo como ráfagas de ruido y disparos de pistola, mientras que los segundos, aplican señales determinísticas como barridos de frecuencia (Sweeps) y secuencias binarias de máxima longitud (MLS). Particularmente en electroacústica, la medición de la RI es vital para analizar y evaluar las prestaciones de transductores, tales como micrófonos y altavoces que pueden ser modelados como SALIT ([Tylka et al, 2015](#)). En tal sentido, actualmente existen desarrollos tecnológicos tanto empresas de audio como del ámbito académico. A continuación se expondrán brevemente algunos de ellos:

- *ARTA Software*. Paquete de programas para mediciones acústicas, creada por [Ivo Mateljan \(2016\)](#) (Laboratorio de Electroacústica, Universidad de Split, Croacia). Permite medir RI, respuesta en frecuencia e impedancia de altavoces. Incluye la posibilidad de realizar diagramas de directividad, con la desventaja que el movimiento del transductor debe realizarse manualmente. Otros inconvenientes son que se necesita licencia paga para su uso, su interfaz es compleja y poco intuitiva.
- *ITA-Toolbox*. Software que se ejecuta sobre MATLAB, contiene múltiples herramientas para mediciones acústicas y posprocesamiento. Desarrollado por Dietrich P. et al ([2012](#)) en Institut für Technische Akustik (ITA), Universidad de Aachen, Alemania. Para mediciones de directividad crearon una base giratoria que permite el desplazamiento angular del dispositivo bajo prueba.
- *Pulse*. Sistema multicanal para mediciones/análisis acústico y diversas aplicaciones incluyendo acústica de recintos, electroacústica, control de ruido, entre otros. Desarrollado por Brüel & Kjær, fabricante instrumentación acústica de Dinamarca.
- *REW*. Software libre de medición y análisis para acústica de salas y electroacústica desarrollado por [John Mulcahy \(2016\)](#). Disponible para sistemas operativos Linux, OS y Windows; permite realizar mediciones de RI, respuestas en frecuencia y fase, impedancia y parámetros Thiele-Small de altavoces, entre otras funciones.
- *Autopol*. Plataforma para adquisición y procesamiento automático de sonido para mediciones de directividad. Software propietario desarrollado por José Brusi ([1999](#)) para *DAS Audio*, España.

En este trabajo se presentan los resultados de ensayos preliminares realizados y la validación del módulo de medición de RI desarrollado con Matlab empleando una tarjeta de adquisición de sonido de bajo costo. La validación se realizó comparando los resultados obtenidos con los proporcionados por sistemas de medición comerciales. Para cada medición se comparó la RI, el módulo de la FT y la relación señal ruido (SNR) por bandas de tercio de octava. Este módulo, forma parte de un Sistema Automático de Medición de Dispositivos Acústicos (SAMDA), proyecto en actual y continuo desarrollo del CINTRA.

El SAMDA es una plataforma que permite evaluar diferentes características y tipos de dispositivos acústicos activos y pasivos en un mismo sistema de medición, al cual se le adicionan elementos de hardware y software específicos para cada aplicación. SAMDir (Ferreyra et al, 2010) es la aplicación específica implementada para medir y evaluar la directividad de transductores electroacústicos (emisores y receptores), actualmente está disponible la versión 2.0. Por otra parte, SAMAbs permite medir el coeficiente de absorción sonora de un material y SAMDif el coeficiente de difusión sonora. Estas últimas dos aplicaciones actualmente se encuentran en etapa de investigación y desarrollo.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta un caso de estudio aplicando SAMDir v2.0; en la sección 3, la validación del módulo de medición de RI y finalmente en la sección 4 las conclusiones.

2 MEDICION DE DIRECTIVIDAD CON SAMDIR v2.0

Se presentan resultados de la medición de respuesta impulsiva, respuesta en frecuencia y directividad realizados con SAMDir v2.0 de la caja acústica activa Microlab B-77. Sus principales características son: sonodeflector tipo ventilado construido con madera, configuración electrónica de dos vías, equipada con altavoz de bobina móvil de 4" (woofer) y altavoz de bobina móvil de 0.75" (tweeter), masa de 3.50 kg, etapa de amplificación de 48 W_{rms} y respuesta en frecuencia de 55 Hz a 20 kHz (sin informar puntos de corte) (MicroLab, 2016).

2.1 Sistema de medición

El diagrama de bloques del SAMDir v2.0 se ilustra en la Figura 1a, mientras que en 1b, la fotografía durante el ensayo en cámara acústica B del CINTRA (Moreno y Morales, 2014). El sistema está compuesto por: computador personal portátil (HP Pavilion, procesador Intel i3, 2.4 GHz, 4.0 GB RAM y sistema operativo Windows 7 Pro), tarjeta de adquisición de sonido doble canal (Presonus AudioBox 44VSL), unidad de control, unidad de potencia, micrófono de medición de bajo costo (Behringer ECM8000) y programa de aplicación SAMSoft v2.0 (Ferreyra et al, 2016).



Figura 1: a) Diagrama de bloques del SAMDir v2.0; b) Fotografía del sistema en cámara acústica.

La medición de la RI en cada posición angular estudiada se realizó por método indirecto aplicando la técnica de deconvolución (Farina, 2000). La señal de excitación seleccionada fue un barrido senoidal de variación exponencial y amplitud constante, para el espectro de frecuencias comprendido entre 22 Hz y 22 kHz y 2.73 s de duración (equivalente a 131072

muestras, para una frecuencia de muestreo de 48 kHz). A dicha señal se le aplicó un filtro temporal Hanning de 0,1 s en ambos extremos del barrido. La medición se configuró para bandas de octava y resolución angular de 5° para cumplimentar la rotación de 360°). En la Figura 2, se presenta una imagen de captura de pantalla del programa de aplicación del SAMDir v2.0 (Ferreyra et al, 2016).

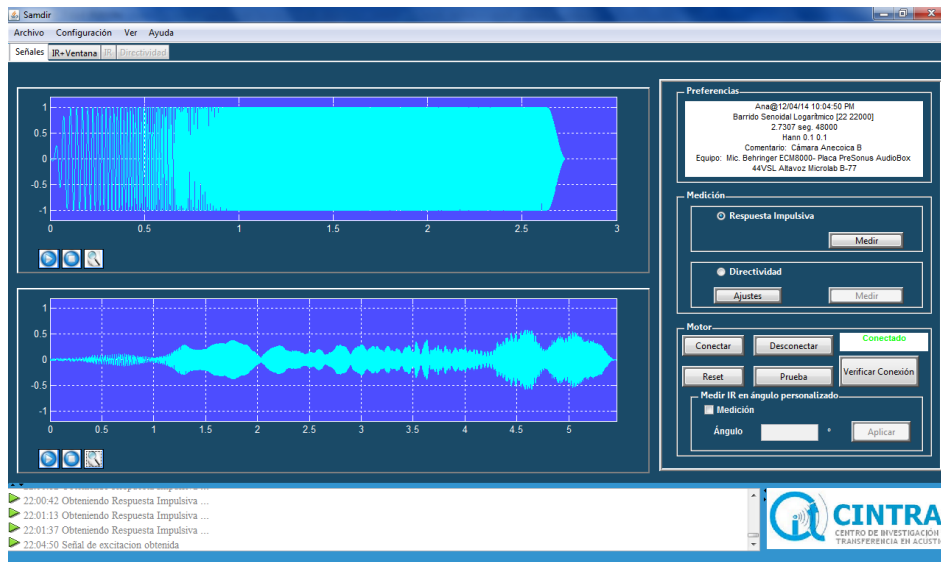


Figura 2: Captura de pantalla del programa de aplicación del SAMDir v2.0; Generación y registro de barrido sinusoidal de variación exponencial y amplitud constante.

2.2.1 Respuesta impulsiva

La Figura 3, muestra la respuesta impulsiva normalizada medida para el ángulo de 0° (azimut), para el plano horizontal de la caja acústica. En ella se observa, el arribo del sonido directo seguido de la reflexión de primer orden del frente de onda proveniente del piso de la cámara acústica. La duración de la RI es menor a 30 ms.

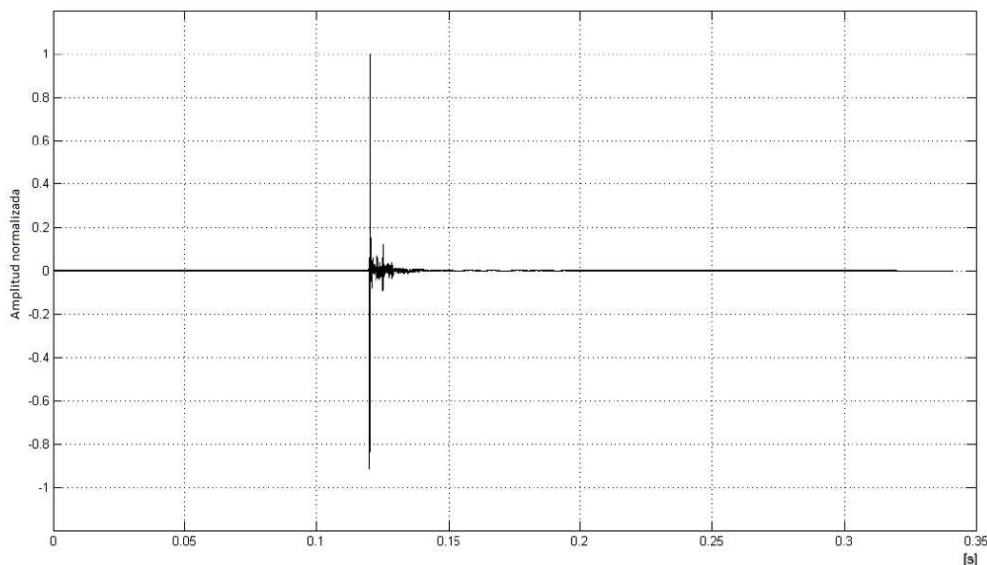


Figura 3: Respuesta impulsiva medida para ángulo de 0° (azimut).

2.2.2 Respuesta en frecuencia

El módulo de la función de transferencia fue obtenido mediante el cálculo de la transformada rápida de Fourier de cada RI medida. En la Figura 4, se presenta dicho módulo para la posición mencionada anteriormente. Se destaca la irregularidad de la respuesta en frecuencia de la caja acústica al considerar una resolución espectral de 1.5 Hz.

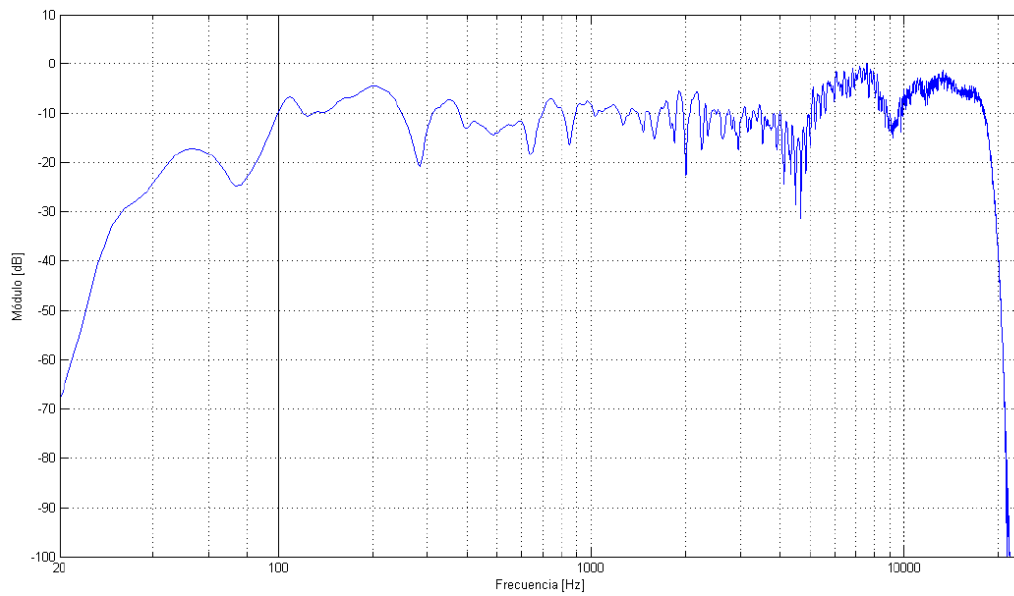
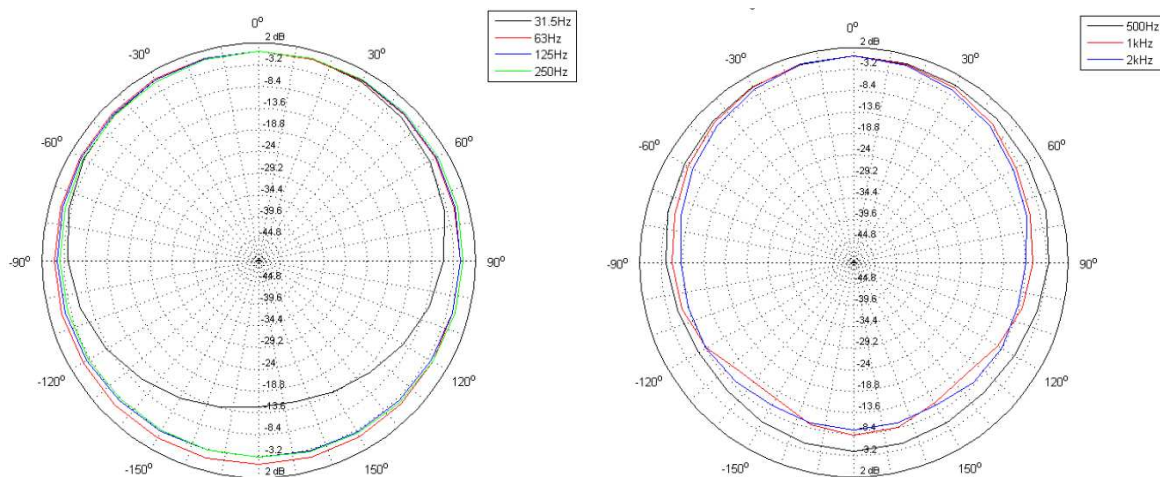


Figura 4: Módulo de la FT calculada a partir de la RI medida para ángulo de 0° (azimut).

2.2.3 Directividad

Considerando los resultados de las 72 mediciones de las RIs para cada posición angular (del plano horizontal de la caja acústica en este caso), el posterior proceso de filtrado de cada banda de frecuencia por octava y cálculo de la potencia sonora asociada, el SAMDir permite determinar las características de directividad de la fuente sonora mediante tres descriptores: diagramas de directividad (DD) en coordenadas polares (ver Figura 5), factor de directividad (Q) e índice de directividad (ID). Los DD evidencian un marcado comportamiento de radiación omnidireccional para el espectro de frecuencias comprendido entre 63 Hz y 500 Hz, como también un marcado comportamiento direccional por encima de los 4 kHz.



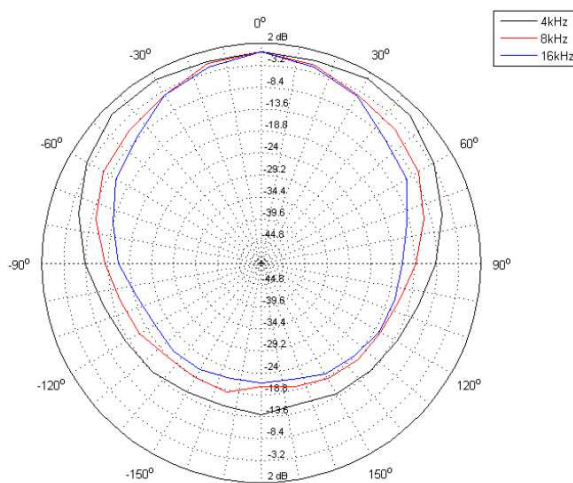


Figura 5: Diagramas de directividad para el espectro de banda de octava (31,5 Hz a 16 kHz), plano horizontal, sistema de coordenadas polares y resolución angular de 5°.

3 VALIDACION DE MODULO DE MEDICION DE RI

A efectos de realizar la validación del modulo de medición de RI del sistema desarrollado, se efectuaron mediciones con SAMDir v2.0, las que se contrastaron con los resultados obtenidos con B&K 7841 (Dirac v3.0) y Aurora v4.0 (plug-in de Adobe Audition), utilizando idéntica cadena de instrumental de medición.

3.1 Configuración del sistema de medición

En este caso se utilizó la tarjeta de adquisición de sonido integrada del computador personal Sony Vaio SVE14126PLB, procesador Intel i5-3210, 2.5 GHz, 6 GB RAM, con sistema operativo Windows 8.1 Pro. Para medir la RI del sistema de medición la entrada de línea fue conectada con la salida de audio mediante un cable de 1 m de longitud.

3.2 Técnica de medición

La RI del sistema de medición fue obtenida mediante técnica indirecta (deconvolución de señales determinísticas), excitando el sistema siempre con una señal de barrido senoidal de variación exponencial, para el rango de frecuencia comprendido entre 22 Hz a 22 kHz, duración 2.73 s, filtro temporal Hanning de 0.1 s en ambos extremos del barrido, frecuencia de muestreo 48 kHz. Las respuestas impulsivas medidas con los programas de aplicación mencionados anteriormente fueron registradas en archivos extensión .wav, con una frecuencia de muestreo de 48 kHz y 16 bits de resolución. Posteriormente, se cargaron los archivos en el programa B&K 7841 y se calculó la relación señal/ruido (SNR) por bandas de tercio de octava para cada RI medida. En las Figuras 6, 7 y 8 se presentan la RI medias con cada programa en idénticas condiciones de medición.

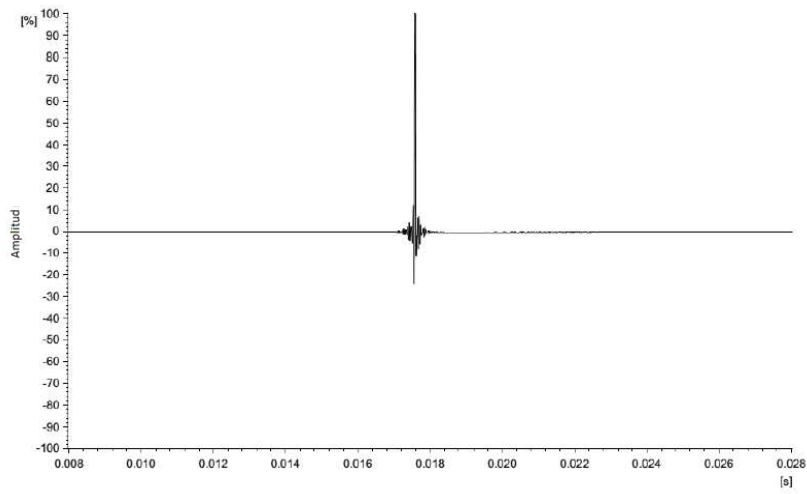


Figura 6: Respuesta impulsiva del sistema de medición obtenida con B&K 7841.

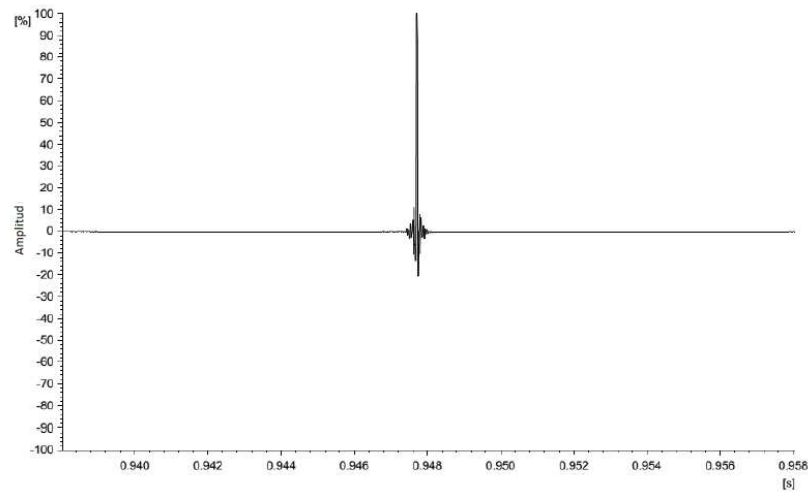


Figura 7: Respuesta impulsiva del sistema de medición obtenida con Aurora v4.0.

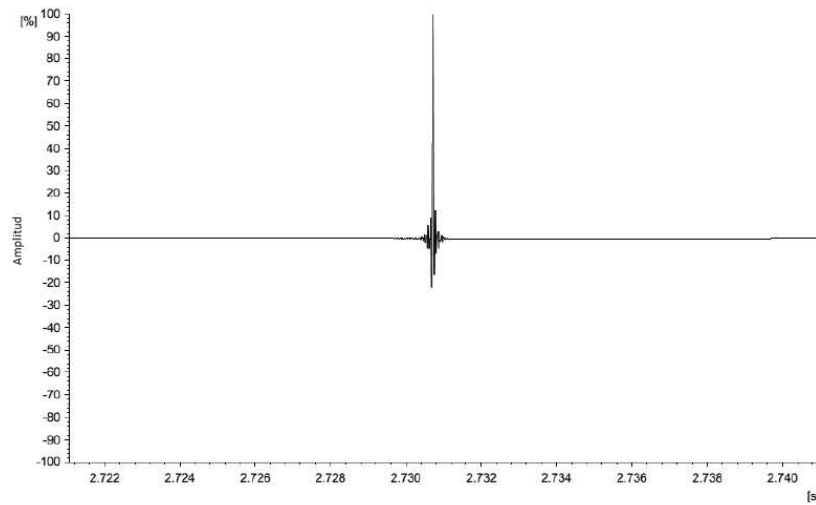


Figura 8: Respuesta impulsiva del sistema de medición obtenida con SAMDir v2.0.

3.3 Resultados

En la Tabla 1 se observa que la RI obtenida con B&K 7841 (Dirac) posee una SNR promedio de 59 dB, aunque ésta es menor que 36 dB para el rango de frecuencias entre 31.5 y 63 Hz. La RI obtenida con Aurora posee una SNR promedio de 43 dB, siendo menor que 36 dB en las bandas espectrales mencionadas anteriormente. La RI medida con SAMDir v2.0 tiene un valor promedio cercano a 55 dB, con valores mayores a 45 dB para las bandas de 50 y 63 Hz, y valores superiores a 65 dB en el rango más alto de frecuencias (a partir de 3.15 kHz, excepto en 20 kHz). En negrita se resaltan los valores donde el software de SAMDir v2.0 tiene mejor rendimiento.

Tabla 1: Comparación de SNR de respuestas impulsivas medidas.

f [Hz]	DIRAC	AURORA	SAMDIR	f [Hz]	DIRAC	AURORA	SAMDIR
25	52	20	21	800	67	46	55
31.5	33	23	24	1000	68	46	58
40	33	31	32	1250	66	46	59
50	34	36	45	1600	68	46	62
63	35	36	48	2000	67	45	62
80	48	43	47	2500	65	46	61
100	42	43	47	3150	66	46	67
125	66	44	49	4000	67	46	68
160	55	45	49	5000	65	46	68
200	63	46	50	6300	65	46	69
250	63	46	50	8000	65	46	68
315	67	46	50	10000	65	46	69
400	67	46	51	12500	64	46	68
500	68	46	53	16000	64	46	67
630	66	46	55	20000	58	38	62

Para analizar la precisión en el cómputo de la potencia espectral (power spectrum), se utilizaron dos tipos de señales generadas con SAMDir:

- Barrido senoidal exponencial, de 22 Hz a 22 kHz, duración 10.92 s, sin ventana temporal.
- Ruido Blanco de igual duración (obtenido con MLS).

Ambas señales se grabaron en .wav a 48 kHz de frecuencia de muestreo, 16 bits de resolución. Los archivos fueron cargados en el programa Dirac v3.0 y SAMDir v2.0, donde se utilizaron filtros pasa banda de tercio de octava, de tipo Butterworth de sexto orden según norma IEC 61260. En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos del ensayo. Se puede apreciar que el error máximo es 0.12 dB, considerándolo despreciable para este tipo de mediciones.

Tabla 2: Análisis de potencia espectral por tercio de octava.

f [Hz]	Barrido Exponencial		Ruido Blanco		f [Hz]	Barrido Exponencial		Ruido Blanco	
	DIRAC	SAMDIR	DIRAC	SAMDIR		DIRAC	SAMDIR	DIRAC	SAMDIR
25	-0.31	-0.31	-28.54	-28.66	800	-0.1	-0.03	-14.09	-14.08
31.5	0	0	-27.39	-27.37	1000	-0.1	-0.03	-13.1	-13.08
40	-0.08	-0.03	-26.81	-26.92	1250	-0.1	-0.03	-12.05	-12.04
50	-0.09	-0.03	-26.16	-26.22	1600	-0.1	-0.03	-11.09	-11.08
63	-0.09	-0.03	-24.5	-24.51	2000	-0.1	-0.03	-10.06	-10.04
80	-0.09	-0.03	-24.03	-24.09	2500	-0.1	-0.03	-9.06	-9.05
100	-0.09	-0.03	-23.22	-23.17	3150	-0.1	-0.03	-7.91	-7.90
125	-0.1	-0.03	-22.28	-22.3	4000	-0.1	-0.03	-7.11	-7.07
160	-0.1	-0.03	-20.93	-20.91	5000	-0.1	-0.03	-6.02	-6.01
200	-0.1	-0.03	-19.93	-19.98	6300	-0.1	-0.03	-5.05	-5.05
250	-0.1	-0.03	-18.92	-18.88	8000	-0.1	-0.03	-4.03	-4.01
315	-0.1	-0.03	-18.2	-18.2	10000	-0.1	-0.03	-3.05	-3.04
400	-0.1	-0.03	-17.05	-17.03	12500	-0.1	-0.03	-2.03	-2.02
500	-0.1	-0.03	-16.01	-15.99	16000	-0.1	-0.03	-1	-0.99
630	-0.1	-0.03	-14.93	-14.92	20000	-0.44	-0.38	0	0

Otro análisis relevante es el tiempo de ejecución en una medición. Para estimar dicho tiempo, se recurrió a las funciones *tic / toc* de Matlab. Utilizando una señal de 10.92 s (524288 muestras para 48 kHz de frecuencia de muestreo), se obtuvieron los siguientes valores:

- La medición de la RI de un sistema (que comprende generación de la señal, filtrado temporal, generación del filtro inverso, registro y deconvolución) se realiza en $13.6 \text{ s} \pm 0.1 \text{ s}$.
- El filtrado y cálculo de potencia por bandas de tercio de octava se ejecuta en $4.2 \text{ s} \pm 0.1 \text{ s}$.

4 CONCLUSIONES

Los resultados de los descriptores de la directividad medidos son de alta precisión (máxima resolución angular de 0.06°) y repetibilidad (error de 0.12 dB).

Las validaciones realizadas del sistema desarrollado al evaluar la SNR y potencia espectral por tercio de octava son satisfactorias comparadas con los valores obtenidos con otros sistemas comerciales. El sistema evidenció bajos tiempos de ejecución en las mediciones de RI ($13.6 \text{ s} \pm 0.1 \text{ s}$) y cálculo de potencia por bandas de tercio de octava ($4.2 \text{ s} \pm 0.1 \text{ s}$).

5 AGRADECIMIENTO

Un especial agradecimiento al Ing. Oscar A. Ramos por sus aportes en las diferentes etapas de diseño y desarrollo del sistema.

7 REFERENCIAS

- Adriaensen, F. Acoustical impulse response measurement with ALIKI. In *Linux Audio Conference Proceedings* (p. 9). 27 -30 April, Karlsruhe, Germany, 2006
- Berdahl, E. J., & Smith, J. O. Transfer function measurement toolbox, 2007
https://ccrma.stanford.edu/realsimple/imp_meas/
- Brusi J. Understanding directivity specifications, *Sound and Video Contractor Magazine*. USA, Abril 1999.
- Dietrich P., Guski M., Pollow M., Müller-Trapet M., Masiero B., Scharrer R., and Vorländer M. ITA-Toolbox - an open source MATLAB toolbox for acousticians, 2012.
- Farina, A. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. In *Audio Engineering Society Convention 108th*, Audio Engineering Society, 2000
- Ferreya S.P., Barcia C. Garcia G., Sistema automático de medición de directividad de transductores electroacústicos (SAMDir). *Actas del II Congreso Internacional de Acústica UNTreF*, Buenos Aires Argentina, September 8-10, 2010. In CD-ROM
- Ferreya S.P., Moreno A.M., Morales J.I., Tommasini C.F., Budde L., Novillo D.A., Cravero G.A., Longoni C.H., López J.F., Ramos O.A. SAMSoft: Acoustic Device Automatic Measurement System Software. *Proceedings of the XXII International Congress on Acoustics*, Buenos Aires, Argentina, Septiembre 5-9, 2016. ISBN 978-987-24713-6-1
- IEC 61260-1:2014. Electroacoustics - Octave-band and fractional-octave-band filters - Part 1: Specification
- Mateljan I., ARTA: Audio Measurement and Analysis Software. <http://www.artalabs.hr/> [Accedido: 01 septiembre 2016]
- Microlab Electronic Company Limited, *B-77 User Manual*, China, 2016
- Moreno A.M. y Morales J.I. *Optimización de sistema automático de medición de directividad de transductores electroacústicos*. Proyecto final de grado. Ingeniería en Electrónica, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Córdoba, Argentina, Diciembre de 2014
- Mulcahy J., REW: Room Equalizer Wizard . <http://www.roomeqwizard.com/> [Accedido: 05 agosto 2016]
- Stan, G. B., Embrechts, J. J., & Archambeau, D. Comparison of different impulse response measurement techniques. *Journal of the Audio Engineering Society*, 50 (4), 249-262, 2002
- Tylka, J. G., Sridhar, R., & Choueiri, E. A Database of Loudspeaker Polar Radiation Measurements. In *Audio Engineering Society Convention 139th*, New York, USA, Oct 29 – Nov 1, 2015.