

PROCESO COMPUTACIONAL PARA OBTENCIÓN DE DESCRIPTORES DE LA DIRECTIVIDAD DE TRANSDUCTORES ELECTROACÚSTICOS

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

^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@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: procesamiento digital de señales, respuesta impulsiva, directividad.

Resumen.

Los descriptores de la directividad representan la característica direccional de un transductor electroacústico. Para el caso de fuentes sonoras, la directividad representa la forma en que se distribuye la energía acústica en el espacio, la cual es dependiente de la posición como así también de la frecuencia emitida. La misma se determina relacionando los niveles de presión sonora en una dirección dada respecto de una dirección de referencia. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema automático de medición de respuesta impulsiva y el procesamiento digital de señal aplicado para obtener diversos descriptores de la directividad como factor de directividad, índice de directividad y diagrama de directividad. Se evaluó el desempeño de los programas desarrollados considerando el tiempo de cómputo y se contrastaron los resultados obtenidos con la información proporcionada por fabricantes de transductores.

1 INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento direccional de un transductor electroacústico requiere gran cantidad de datos y diversos tipos de procesamiento, siendo ambas variables relevantes en el diseño de un sistema de medición de directividad. En las últimas décadas, el avance de la tecnología, ofrece procesadores que realizan gran cantidad de cálculos en reducidos tiempos de cómputo y a un costo cada vez menor. Debido a esto, nuevas técnicas de medición de la respuesta impulsiva (RI) de sistemas acústicos lineales han sido popularizadas (Farina, 2000; Müller y Massarani, 2001) y pudiéndose implementar en una PC estándar.

En este trabajo se describe la plataforma desarrollada en el CINTRA y el análisis del procesamiento digital necesario para obtener parámetros de directividad de una fuente sonora. El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se presenta el diseño y alcance del sistema; en la sección 3 el procesamiento de señales realizado que consta de tres fases (adquisición de datos, cálculos y visualización), mencionando el tiempo de cómputo de los algoritmos diseñados. Por último, en la sección 4 las conclusiones obtenidas destacando los principales aportes del trabajo.

2 DISEÑO Y ALCANCE DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Básicamente, el diseño del sistema consideró tres fases:

- Adquisición de señales
- Procesamiento
- Visualización de resultados

Como una forma de acotar las posibles soluciones, se establecieron criterios que debe satisfacer el sistema. Uno de ellos es proporcionar una implementación sencilla y de bajo costo. Las mediciones deben ser reproducibles y automáticas, dado que se ejecutarán varias secuencias de ensayos. Además, se debe permitir la interconexión con dispositivos que permitan reproducir las señales de excitación y adquirirla respuesta del sistema ensayado. Un punto importante es tener en cuenta el entorno de desarrollo ya que se realizarán numerosos y complejos procesamientos de datos.

Varios de los puntos anteriores se tuvieron en cuenta al seleccionar como plataforma para el procesamiento de datos una PC estándar. Con mínimos requerimientos de hardware y un entorno de desarrollo como MatLab, utilizado ampliamente en investigación y con gran disponibilidad de librerías de procesamiento digitales de señales, es posible realizar la implementación del sistema de medición. En la figura 1 se muestra un esquema del mismo.

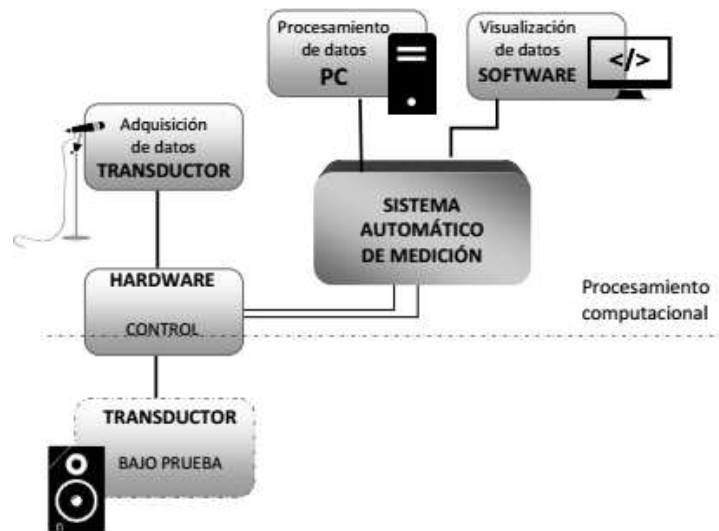


Figura 1: Componentes del sistema de medición.

Para establecer el alcance del procesamiento computacional que realizará el sistema, es necesario establecer los conceptos de respuesta al impulso y directividad de fuentes sonoras.

2.1 Respuesta Impulsiva

Un sistema lineal e invariante en el tiempo (SLIT) queda completamente caracterizado al conocer su respuesta al impulso (Oppenheim et al, 1983). La señal de salida $y(t)$ está dada por la convolución entre la señal de entrada $x(t)$ y la respuesta impulsiva del sistema $h(t)$ (ver figura 2).

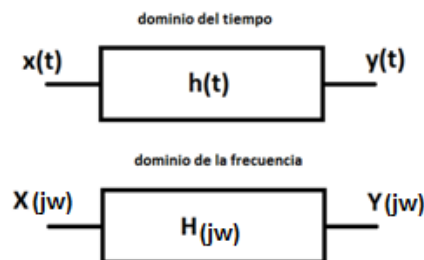


Figura 2: Sistema LTI.

$$y(t) = x(t) * h(t). \tag{1}$$

Considerando al transductor electroacústico como un SLIT, se obtiene su $h(t)$ aplicando una señal de entrada conocida y relacionándola con la salida mediante la deconvolución.

La elección del tipo de señal de entrada o excitación y la técnica utilizada para realizar la deconvolución dan origen a varios métodos de medición, los cuales deben proporcionar una respuesta impulsiva con una buena relación señal-ruido (SNR) y permitir la eliminación de alinealidades (Stan et al, 2002).

2.2 Directividad

Una manera de cuantificar la directividad de un transductor es tomar mediciones de su nivel de presión sonora en múltiples puntos alrededor del mismo. Estas medidas se realizarán en todas las frecuencias con lo que se podrá saber el nivel de presión sonora para cualquier frecuencia y a cualquier ángulo.

La representación más importante para mostrar los resultados es por medio del diagrama de directividad (DD) el cual es una representación de la presión sonora en función del ángulo como muestra la figura 3.

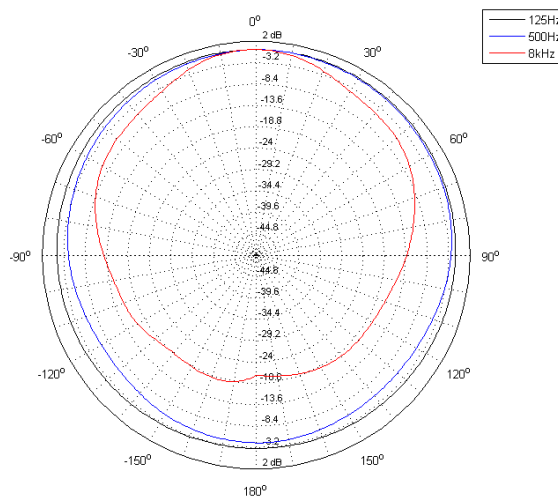


Figura 3: Diagrama de directividad para el espectro de tres bandas de octava, plano horizontal de una fuente sonora, sistema de coordenadas polares y resolución angular de 5°.

El factor de directividad (Q) expresa la directividad a través de un único valor numérico por frecuencia. Este valor se define para una dirección como:

$$Q = \frac{I(\theta_0, \phi_0)}{I_{iso}}, \quad (2)$$

donde $I(\theta, \phi)$ es el vector de intensidad sonora según ángulos de elevación y azimut respectivamente e I_{iso} representa la intensidad sonora isotrópica, considerando una superficie esférica de radio r (ver Figura 4).

$$I_{iso} = \frac{\int_S I(\theta, \phi) dS}{4\pi r^2} = \frac{W}{4\pi r^2}. \quad (3)$$

En general, la potencia sonora (W) se determina sumando las intensidades sobre una superficie cualquiera S , dentro de la cual se encuentra la fuente (Ferreyra et al, 2010).

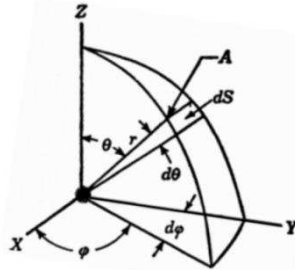


Figura 4: Diferencial de superficie dS , en un sistema de coordenadas polares, para determinar la intensidad sonora en una dirección determinada.

Otro parámetro es el índice de directividad (ID) que es el factor Q expresado en forma logarítmica:

$$ID = 10 \log Q. \quad (4)$$

3 SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDICIÓN

3.1 Adquisición

El subsistema de entrada de datos está conformado por: un equipo electromecánico (“control” en figura 1) operado por el software de medición, que proporciona al transductor una rotación de 360° con resolución angular configurable; una tarjeta de adquisición de sonido que permite reproducir la señal de excitación y registrar la respuesta del sistema ensayado; y un micrófono de medición adecuado.

El dispositivo encargado de la rotación del dispositivo fue diseñado especialmente para este fin. A grandes rasgos, consta de un motor paso a paso con resolución angular de 1.8° y caja reductora mecánica, excitador de potencia y un módulo de comunicación implementado con microcontroladores. La tarjeta de sonido y micrófono a utilizar no exigen elevados requerimientos. Actualmente existen tarjetas de adquisición de sonido de muy buena calidad y bajo costo, tanto internas como externas al computador personal.

Como se observa en la figura 1, los subsistemas encargados del procesamiento computacional deberán:

- Configurar la tarjeta de adquisición de sonido.
- Reproducir la señal de excitación.
- Registrar la respuesta.
- Verificar la latencia del sistema.

La verificación de la latencia se realiza por medio de la correlación de las señales, una vez corregida la latencia la señal grabada se encuentra disponible digitalmente para su procesamiento.

3.2 Procesamiento de datos

A través de procesamiento digital de señales se obtiene la RI y los descriptores de la directividad mencionados anteriormente. A continuación, se presentan los principales cálculos del procesamiento digital que realiza el sistema, los cuales están administrados por un programa específico (SAMDir) que dispone de una interfaz de usuario simple (ver figura 5).

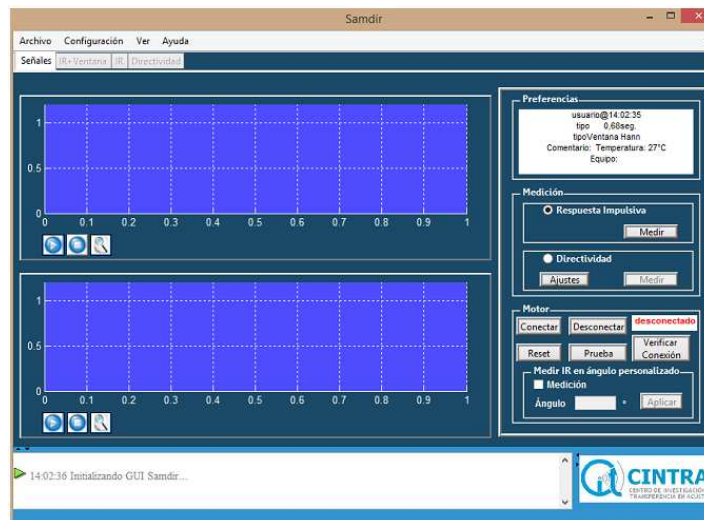


Figura 5: Interfaz de usuario del sistema de medición de RI.

3.2.1 Ventanas temporales

Dado que se procesarán señales discretas, las cuales tienen necesariamente un número finito de muestras, al realizar el análisis en frecuencia y su extensión periódica se presentarán discontinuidades (en la unión de segmentos adyacentes de la sucesión finita) causando fuga espectral (Oppenheim y Schaffer, 2010). Para disminuir sus efectos se debe realizar un ventaneo o truncamiento en el dominio temporal, ponderando las muestras de $x[n]$ con valores próximos a cero en los extremos de la sucesión, y los datos centrales del conjunto con valores próximos a la unidad. Las funciones utilizadas en la ponderación reciben el nombre genérico de “ventanas”. La señal procesada (“ventaneada”) se obtiene multiplicando muestra a muestra la señal $x[n]$ por la ventana temporal $w[n]$ lo que equivale a la convolución de las transformadas $X(e^{j\omega})$ y $W(e^{j\omega})$ en el dominio de la frecuencia, demostrando la importancia de conocer no sólo las características temporales de la ventana sino también su respuesta en frecuencia.

El sistema de medición permite disponer de varias ventanas y generar una combinación de las mismas, ya que cada una tiene características particulares. Una de las ventanas más utilizadas en mediciones acústicas es la ventana de Hanning o Hann (Müller y Möser, 2012). Los coeficientes del polinomio se obtienen con la siguiente ecuación:

$$w[n] = 0.5 \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) \right] \quad 0 \leq n \leq N - 1. \quad (5)$$

En la figura 6 se muestra una RI y en trazo discontinuo la ventana personalizada a aplicar, que consta de: 0.1 s de una ventana Hann (primeras $N/2$ muestras), una ventana rectangular de 0.02 s a la izquierda de la RI y de 0.1 s a la derecha de la misma, y por último 0.1 s de una ventana Hann (últimas $N/2$ muestras).

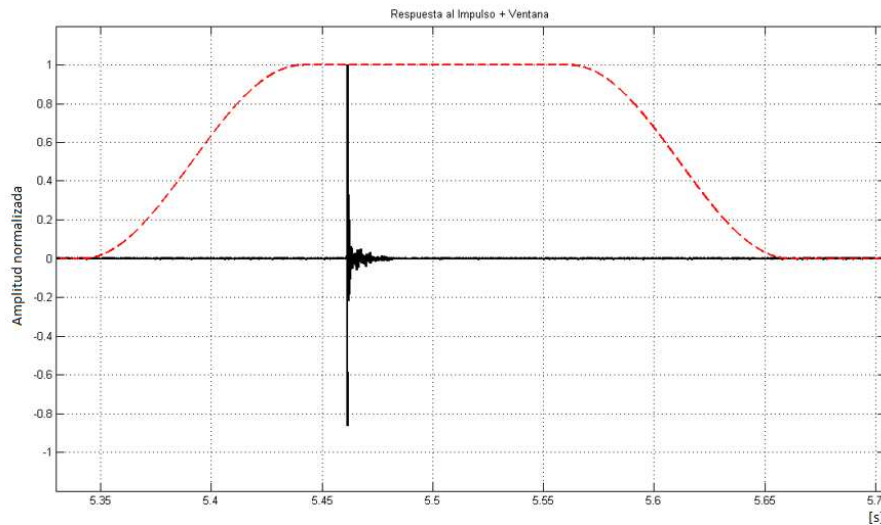


Figura 6: Ventana temporal Hanning.

Otras ventanas temporales disponibles y que son utilizadas generalmente son Hamming y Chebyshev. El sistema dispone de una sección particular para aplicar la ventana a la señal de excitación, entre los parámetros configurables se encuentran el tipo de ventana temporal, el intervalo inicial y final de la misma (ver figura 7).

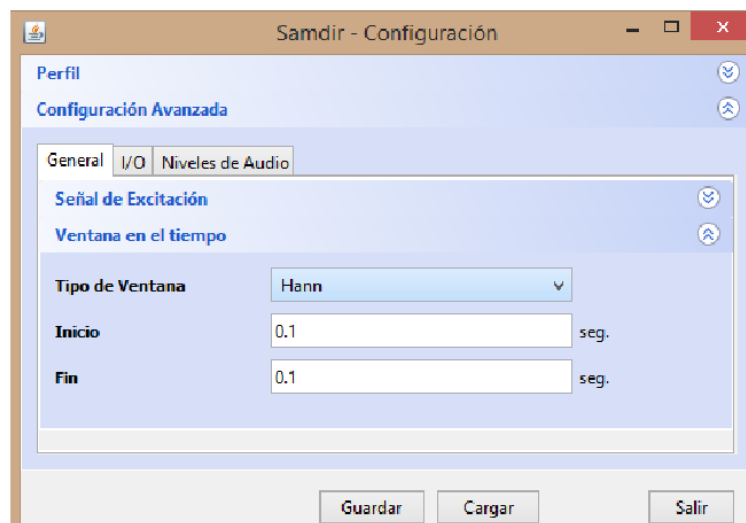


Figura 7: captura de pantalla de la configuración de ventanas temporales del sistema de medición (SAMDir v2.0).

3.2.2 Obtención de la respuesta al impulso

De acuerdo al tipo de señal de excitación se utilizan diferentes métodos para obtener la respuesta al impulso (Müller y Massarani, 2001; Stan et al, 2002). En su versión inicial, el sistema obtiene la RI del transductor ensayado mediante dos tipos de señales: barrido senoidal lineal y barrido senoidal exponencial. En ambos casos la amplitud se mantiene constante.

- Barrido senoidal lineal: es un barrido cuya frecuencia instantánea varía de forma lineal con el tiempo, su espectro es similar al del ruido blanco.

- Barrido senoidal exponencial: a diferencia de la anterior, en este tipo de barrido la frecuencia varía de forma exponencial con respecto al tiempo, su espectro es similar al del ruido rosa.

Al seleccionar como señal de excitación un barrido senoidal lineal, se obtiene la RI operando en el dominio de la frecuencia, al realizar la razón entre las FFT (Transformada Rápida de Fourier) de la señal grabada y de la señal de excitación, y luego realizando la IFFT (Transformada Rápida de Fourier Inversa) para volver a operar en el dominio del tiempo:

$$h[n] = IFFT\left(\frac{FFT(y[n])}{FFT(x[n])}\right). \quad (6)$$

Los algoritmos de la FFT calculan la transformada de discreta de Fourier (TDF) de forma eficiente en términos computacionales. Para una sucesión finita $x[n]$ de longitud N , la TDF y su inversa están dadas por:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (7)$$

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j\frac{2\pi}{N}nk}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (8)$$

Se puede observar que (7) y (8) sólo difieren en el signo del exponente de $e^{j\frac{2\pi}{N}nk}$ y en el factor de escala $\frac{1}{N}$, por lo que los procesos computacionales para obtener ambas transformadas son similares. Los algoritmos de la FFT se basan en reducir el cálculo de una TDF en varias TDF más pequeñas, mejorando la velocidad de cómputo.

Cuando se utiliza la señal *barrido senoidal exponencial* la RI se obtiene generando un filtro inverso $f[n]$, definido como aquella señal que al convolucionarla con la señal de excitación produce un delta de Dirac $\delta[n]$:

$$x[n] * f[n] = \delta[n]. \quad (9)$$

La RI del sistema ensayado puede obtenerse al convolucionar la señal de salida medida con este filtro inverso:

$$h[n] = y[n] * f[n]. \quad (10)$$

Esta convolución puede realizarse sencillamente utilizando los algoritmos de FFT, de la siguiente manera:

$$h[n] = IFFT[FFT(y[n]) FFT(f[n])]. \quad (11)$$

El filtro inverso fue generado mediante la inversión temporal de las muestras de la señal de excitación y aplicando una envolvente exponencial de -10 dB/década para compensar el espectro (Farina, 2000). En la figura 8 se expone un barrido senoidal exponencial, con frecuencia inicial 22 Hz y frecuencia final 22 kHz, de 1.36 s de duración, con una ventana Hann de 0.05 s aplicada al inicio y final de la señal, y su correspondiente filtro inverso. En la figura 9 se verifica que los espectros de ambas señales son complementarios.

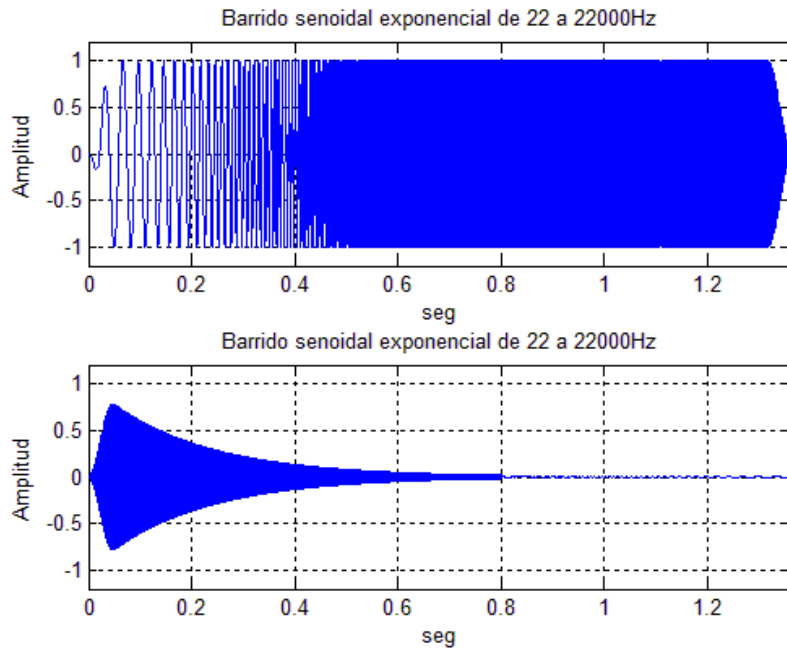


Figura 8: Barrido senoidal exponencial y filtro inverso, representación temporal.

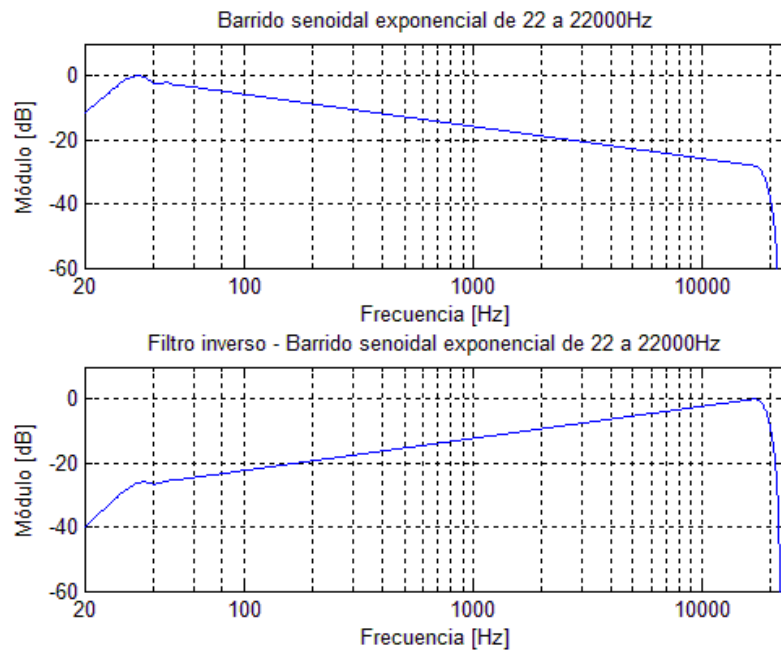


Figura 9: Barrido senoidal exponencial y filtro inverso, representación en frecuencia.

3.2.3 Filtrado

Cuando se obtiene la RI, es necesario calcular la energía que contiene en cada banda de frecuencia aplicando filtros. Un filtro se caracteriza por su curva de respuesta en frecuencia y de fase. Para ello el sistema dispone de un banco de filtros pasabanda con frecuencia central normalizada, de los que se puede configurar el tipo, la resolución y el orden.

Estos filtros espectrales estandarizados son por bandas de octavas y tercios de octavas

(ver figura 10). La herramienta de desarrollo utilizada ofrece un conjunto de rutinas y funciones que permiten agilizar los pasos para calcular los coeficientes de los filtros, aplicando la transformación bilineal para mapear los filtros digitales en sus equivalentes analógicos, realizar el diseño por los métodos tradicionales y luego mapear nuevamente para obtener la función de transferencia $H(z)$ del filtro digital deseado (Orfanidis, 1995).

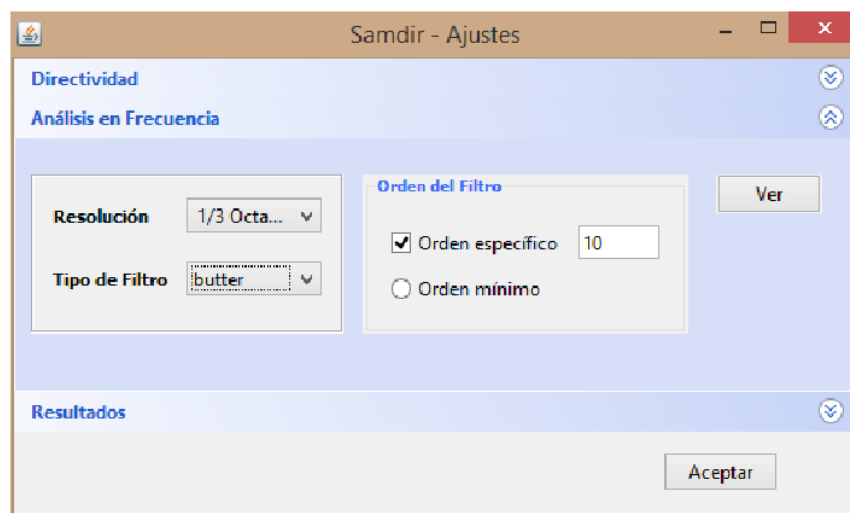


Figura 10: captura de pantalla de la generación de filtros espectrales.

Los polinomios de Butterworth suelen utilizarse en acústica habitualmente debido a su respuesta plana en la banda de paso y mínima desplazamiento de fase en la banda de transición.

3.2.4 Directividad

Utilizando los filtros mencionados, se calcula la potencia para las bandas de octavas o tercios de octavas de acuerdo a la configuración con la que se desee trabajar, elevando al cuadrado los valores de las muestras y promediando. El algoritmo de procesamiento debe proporcionar las cifras de potencia en cada banda en dB y normalizados al máximo valor. Estos son operados adecuadamente para obtener los parámetros de la directividad, considerando que son función de cada ángulo de medición. El DD grafica el valor de la medición de potencia tomada para cada ángulo según las frecuencias nominales (ver figura 3). En las figuras 11 y 12, se muestran los resultados de Q e ID del sistema desarrollado para el caso de una fuente sonora.

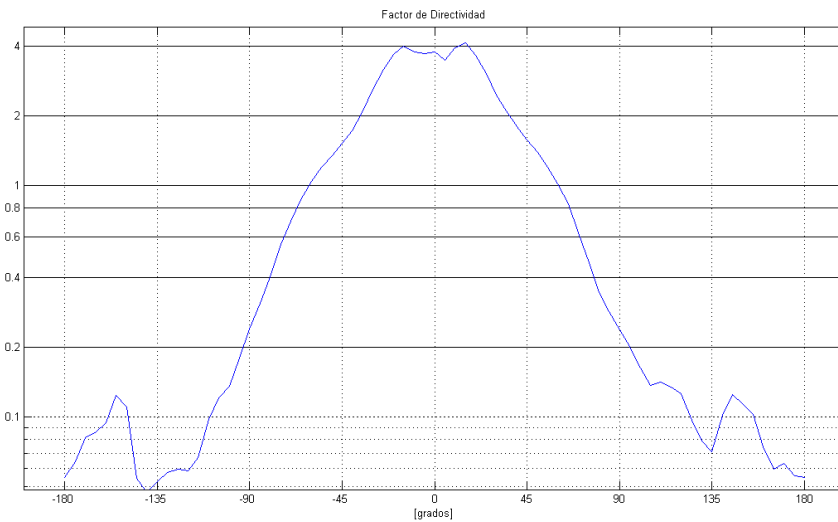


Figura 11: Factor de directividad (Q) para la banda de octava de 8 kHz.

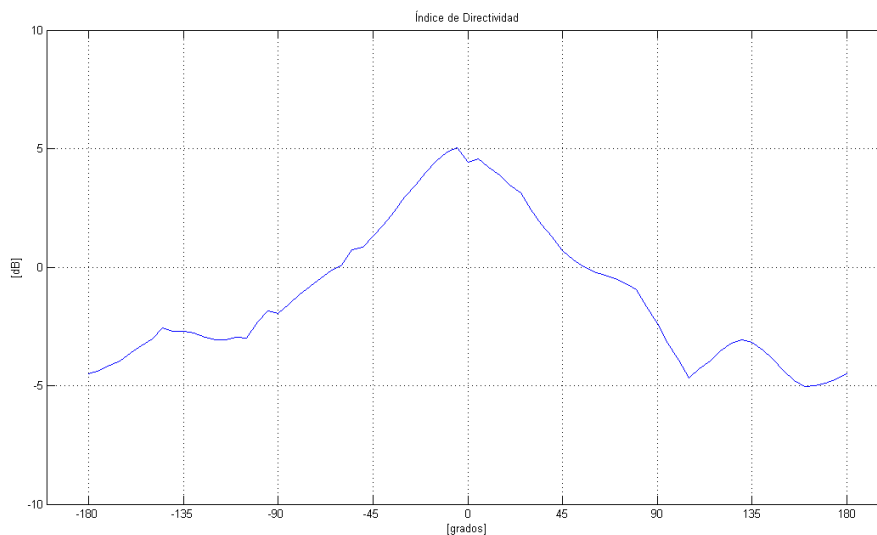


Figura 12: Índice de directividad (ID) para la banda de octava de 2 kHz.

4 RESULTADOS GENERALES

4.1 Características del sistema

El sistema desarrollado se implementa con mínimos requerimientos de hardware (ver figura 13). El costo aproximado incluyendo la unidad de control, de potencia y la plataforma giratoria es de US\$600, valor que se encuentra notablemente por debajo del precio comercial de equipos con prestaciones similares. Además, permite configurar múltiples parámetros de entrada como también realizar la configuración del procesamiento digital a aplicar (ventanas temporales y filtros espectrales). Las RI pueden ser registradas en un archivo en formato .wav para su almacenamiento y postprocesamiento. Además, el sistema ha sido diseñado para permitir su escalabilidad en nuevos módulos de procesamiento (Ferreyra et al, 2016).

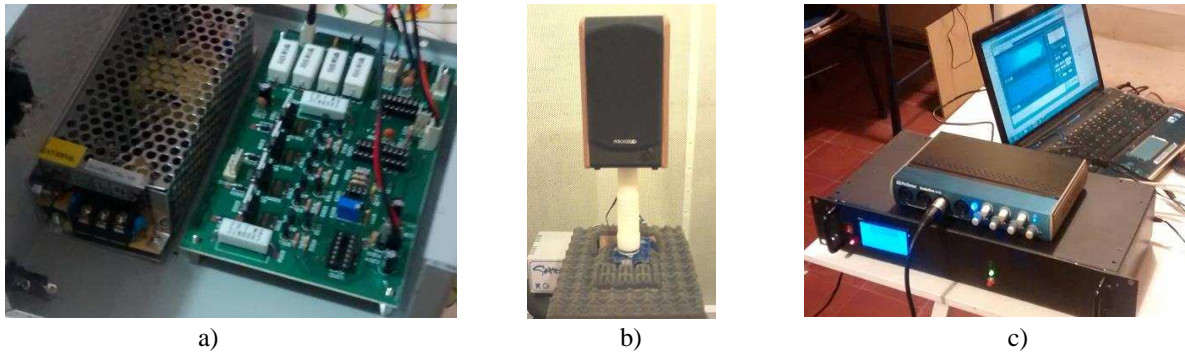


Figura 13: Hardware del sistema a) Unidad de potencia (control motor paso a paso); b) Prototipo de la plataforma giratoria con altavoz Microlab B-77 bajo ensayo; c) Unidad de control conectada a tarjeta de adquisición de sonido y PC estándar corriendo el software SAMDir.

4.2 Resultados obtenidos

Las RI obtenidas a través del sistema diseñado fueron contrastadas con programas comerciales obteniendo las mismas señales en el dominio del tiempo pero con resultados de SNR comparables y en algunos rangos superiores.

Los parámetros de directividad se contrastaron con los valores informados por los fabricantes de cajas acústicas. En la figura 14 se observa la respuesta en frecuencia de la caja acústica activa **Microlab B-77** (2016), y en la figura 15, la respuesta en frecuencia medida con el sistema desarrollado. Cabe aclarar, que el fabricante solo informa la respuesta en frecuencia como definida entre 55 Hz y 20 kHz, sin informar la variación de la amplitud para determinar dichos puntos de corte (**Microlab, 2015**). Por otra parte, las figuras 14 y 15 difieren en la resolución espectral.

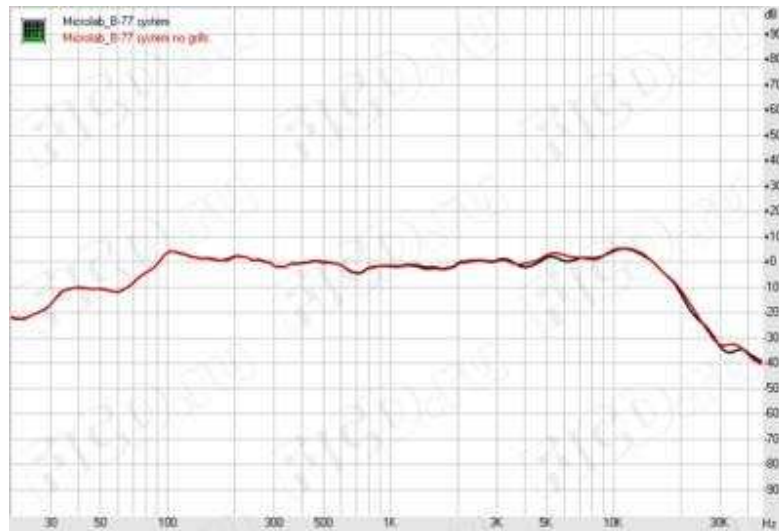


Figura 14: Respuesta en frecuencia proporcionada por el fabricante MicroLab modelo B-77.

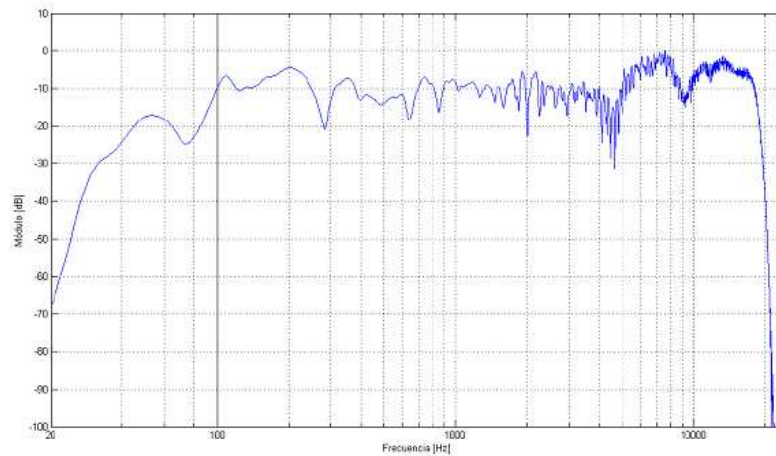


Figura 15: Respuesta en frecuencia medida con el sistema diseñado.

Debido a que los algoritmos diseñados para realizar las mediciones manipularán grandes cantidades de datos, se propuso evaluar el rendimiento del sistema a través del tiempo de ejecución para una medición. Matlab proporciona los comandos *tic/toc* que permiten calcular el tiempo de ejecución de un programa. Para dicha medición se utilizó una PC Sony Vaio SVE14126PLB, procesador Intel i5-3210, 2.5GHz y 6GB RAM con sistema operativo Windows 8.1 Pro, el resultado obtenido utilizando una señal de 10.92 s (524288 muestras a 48kHz de frecuencia de muestreo), fueron los siguientes valores:

- a) La medición de la RI de un sistema (que comprende generación de la señal, ventana temporal, filtro inverso, registro y deconvolución) se realiza en 13.6 s.
- b) El filtrado y cálculo de potencia por bandas de tercios de octavas se ejecuta en 4.2 s.

5 CONCLUSIONES

El automatizar una medición asegura la disminución del tiempo necesario para realizar múltiples mediciones y sus posibles combinaciones. Más aun cuando para poder caracterizar la directividad en un solo plano se requieren 72 mediciones de RI, para una resolución angular de 5° y desplazamiento angular de 360° . La automatización permite la mejora de la calidad de las mediciones, minimizando determinados tipo de errores y permitiendo repetitividad en los resultados. Por otra parte, el sistema permite aplicar diferentes técnicas de medición (Ferreyra et al, 2010; Ferreyra et al, 2016), permitiendo diferentes configuraciones según requerimientos específicos y posibilitando la comparación de resultados.

Los tiempo de computo de medición de RI y filtrado obtenidos satisfacen los requerimientos típicos en el área de metrología acústica.

El sistema diseñado resulto de bajo costo comparado con productos comerciales, al integrar un computador personal estándar, un hardware simple y específico, más un software de aplicación basado en una herramienta de análisis numérico.

REFERENCIAS

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, Septiembre 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
- Microlab Electronic Company Limited, *B-77 User Manual*, China, 2015.
- Microlab Electronic Company Limited, *B-77*, Respuesta en frecuencia de: <http://www.microlab.com/?r=public&st=full&id=549> [Accedido: 02 agosto 2016]
- Müller G. y Möser M. *Handbook of engineering acoustics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- Müller S. y Massarani, P. Transfer-function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(6), 443-471, 2001.
- Oppenheim, A., Schafer R., *Discrete-time signal processing*. Pearson Higher Education, 2010.
- Oppenheim, A. V., Willsky A. S., Hamid Nawab S.. *Signals and systems*. Vol. 2. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.
- Orfanidis S. *Introduction to signal processing*. Prentice-Hall, Inc, 1995.
- 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.