

# SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDICIÓN DE DIRECTIVIDAD DE TRANSDUCTORES ELECTROACÚSTICOS (SAMDir)

SEBASTIAN P. FERREYRA<sup>1,2</sup>, CARLOS E. BARCIA<sup>2</sup> Y GUILLERMO E. GARCIA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC), Córdoba, Argentina.  
sferreyra@scdt.frc.utn.edu.com

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FaMAF), Córdoba, Argentina.

*Resumen – Habitualmente en proyectos de investigación y desarrollo de acústica resulta necesario conocer las características de directividad de diferentes transductores electroacústicos, las cuales se documentan a través de descriptores objetivos como: factor de directividad, índice de directividad y diagrama de directividad. Este último, proporciona la información de la directividad en función del espacio y el espectro de frecuencias.*

*En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema automático de medición de directividad de transductores electroacústicos basado en la técnica de tonos puros en campo libre. El sistema de medición utiliza una PC para el control del proceso, un software de aplicación desarrollado con MATLAB que controla la generación de las señales de excitación, la grabación de sus respuestas, el sincronismo y el control de un motor paso a paso a través de circuitos electrónicos. Según la configuración de medición seleccionada, el sistema permite graficar los diagramas de directividad por bandas normalizadas de octava y tercio de octava, como también por frecuencia única. Finalmente los resultados se graban en formato TIFN y WAV. Este sistema fue diseñado inicialmente para aplicaciones de laboratorio para pequeñas fuentes sonoras (micro altavoces, tweeters, etc.), sin embargo el campo de aplicación puede extenderse a otros transductores y condiciones.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Habitualmente en proyectos de investigación y desarrollo de acústica resulta necesario conocer las características de directividad de diferentes transductores electroacústicos (altavoces y micrófonos) y diversas fuentes sonoras. Dichas características se documentan ó expresan usualmente a través de tres descriptores: a) factor de directividad (Q), b) índice de directividad (DI) y c) diagrama de directividad (DD) [1], [2] y [3].

Por lo general, los sistemas tradicionales de medición de directividad de altas prestaciones (bajo ruido, alta exactitud y precisión) son de elevado costo y escasa flexibilidad. Actualmente existen variados métodos de medición, siendo el más generalizado el que emplea tonos puros, ruidos específicos ó impulsos sonoros en campo libre [4] [5]. Otros más recientes, utilizan barridos de frecuencia (sweeps) en campo difuso ó reverberante y posteriormente aplicando técnicas de procesamiento de señales digitales, obtienen la información de directividad equivalente al método de campo libre [6].

En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema automático de medición de directividad de transductores electroacústicos (SAMDir) basado en la técnica de tonos puros en campo libre. El sistema de medición está desarrollado sobre una plataforma flexible, lo que permite en el futuro implementar nuevos métodos y técnicas de medición. El SAMDir, utiliza una PC (Personal Computer) para el control automático del proceso, un software de aplicación desarrollado con MATLAB que controla la generación de señales de excitación, la grabación de sus respuestas, el sincronismo y el control de un motor paso a paso a través de circuitos electrónicos de excitación. Según la configuración de medición seleccionada, el sistema permite graficar los diagramas de directividad por bandas normalizadas de octava y tercio de octava, como también por frecuencia única. Finalmente, los resultados se graban en formato TIFN y WAV.

Actualmente el SAMDir se encuentra en proceso de validación, sin embargo los ensayos preliminares de calibración y puesta en marcha evidencian las siguientes características: confiabilidad, robustez,

bajo ruido, alta precisión y exactitud, bajo costo y flexibilidad de expansión.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en primer lugar se analizan los antecedentes referidos al tema; en segundo lugar se describe la composición y el funcionamiento del sistema; por último, se describe el hardware y el software desarrollado.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Factor de directividad (Q)

Este descriptor expresa la directividad a través de un solo valor numérico por frecuencia. Se define el factor de directividad ( $Q$ ), en la dirección  $(\theta_0, \varphi_0)$  como la relación entre la intensidad sonora que en esa dirección emite la fuente y la intensidad que produciría una fuente isotrópica (fuente puntual omnidireccional) que radia igual potencia que la fuente en estudio [2] [3]:

$$Q = \frac{I(\theta_0, \varphi_0)}{I_{iso}} \quad (1)$$

En la Figura 1, se observa el sistema de coordenadas empleado. La intensidad isotrópica ( $I_{iso}$ ) se define como el cociente entre la potencia emitida y la superficie ( $S$ ) de una esfera de radio  $r$  que rodea la fuente [3]:

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

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

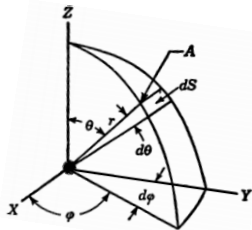


Figura 1: Sistema de coordenadas  $\theta$ ,  $\varphi$  y  $r$  para definir la posición de un punto "A" y el diferencial de superficie  $dS = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi$  de una superficie esférica que rodea a una fuente isotrópica.

El factor de directividad ( $Q$ ), es muy utilizado en electroacústica para el cálculo de sistemas de refuerzo sonoro en recintos cerrados.

### 2.2 Índice de directividad (DI)

Se define como diez veces el logaritmo decimal del factor de directividad ( $Q$ ) [2]:

$$DI = 10 \text{ Log } Q \quad (3)$$

Los índices de directividad positivos indican que se trata de direcciones con intensidades superiores a la media isotrópica.

### 2.3 Diagrama de directividad (DD)

Es el descriptor más importante de la directividad de una fuente o receptor sonoro. Se trata de una descripción gráfica de la respuesta del dispositivo en campo lejano en función de la dirección de las ondas sonoras en un plano esférico y para una frecuencia dada. Para el caso de una fuente sonora, describe el modo en el que la radiación se distribuye en el espacio circundante. El DD de una fuente situada en el centro de una esfera de radio  $r$ , que puede expresarse en escala lineal ó en dB, es una representación de la presión sonora en función del ángulo en azimut  $\varphi$  y elevación  $\theta$ . En la mayoría de los casos, la presión dibujada se refiere a la máxima presión normalizada, que se da en el eje  $p(r, \theta_0, \varphi_0)$ , donde  $\theta_0 = \varphi_0 = 0^\circ$ , por lo que la grafica es independiente de la distancia a la que se tomaron los datos [3].

### 2.4 Métodos de medición de directividad

En la actualidad existen variados métodos y técnicas de medición de directividad de fuentes y receptores sonoros. Básicamente se pueden agrupar en dos según el campo sonoro: a) en campo libre, b) en campo difuso. Para ambos casos, se utilizan diferentes tipos de señales de excitación como: tonos puros, ruidos de banda ancha y banda angosta, ráfagas de ruido, impulsos, barridos de frecuencia, etc.

La norma IEC 60268-5:2007 establece las directrices para la medición de la directividad de altavoces en diferentes campos sonoros [4]. La norma IEC 60268-4:2010 establece las directrices para la medición de la directividad de micrófonos en campo sonoro libre y difuso [5].

## 3. COMPOSICION DEL SISTEMA

El SAMDir está conformado básicamente por:

1. Computador personal, PC.
2. Placa de adquisición de datos, DAQ (rango de audio y/o ultrasonido e infrasonido).
3. Software de medición, SAMDir v1.0.
4. Amplificador de potencia de audio de medición, MAPA.
5. Transductores electroacústicos.
6. Preamplificadores de audio.
7. Motor paso a paso y circuito de excitación.
8. Trípodes
9. Cableado para señales de control, medición y alimentación.

## 4. FUNCIONAMIENTO

A través del software SAMDIR v1.0 se configura y controla el proceso automático de medición. El sistema utiliza los puertos de entrada y salida de la placa de adquisición de datos para generar y capturar simultáneamente (full dúplex) las señales de excitación y sus respuestas. Las últimas se almacenan en formato .WAV de alta calidad, con una resolución de 16 bits (configurable hasta 24 bits) y frecuencia de muestreo de 44,1 kHz (configurable hasta 192 kHz) en el directorio previamente seleccionado por el usuario. Además, el software controla sincrónicamente el movimiento del dispositivo estudiado a través de un motor paso a paso, el cual completa una rotación de 360° para cada una de las frecuencias ensayadas.

El SAMDir v.1.0 permite tres configuraciones de medición automatizadas, estas son:

1. DD por octava (31 Hz - 16 kHz)
2. DD por 1/3 de octava (20 Hz – 20 kHz)
3. DD por frecuencia individual (3 Hz – 100 kHz)

Los resultados se presentan a través de diagramas de directividad para el plano horizontal ó vertical del transductor ensayado. Como ya se menciono, dichos diagramas representados en coordenadas polares, permiten evaluar en función de la frecuencia la relación de la respuesta del transductor para cada posición angular respecto del eje axial del mismo (0°). Esta relación se expresa en decibeles dB. El SAMDir posee una resolución angular de 9° (configurable hasta 0,9°), lo que significa que se realizan 40 puntos de medición para completar un giro de 360°. Las imágenes se almacenan automáticamente en formato .TIF (sin compresión) en el directorio previamente seleccionado por el usuario.

## 5. DIAGRAMA DE BLOQUES

En la Figura 2, se observa el diagrama de bloques simplificado del SAMDir.

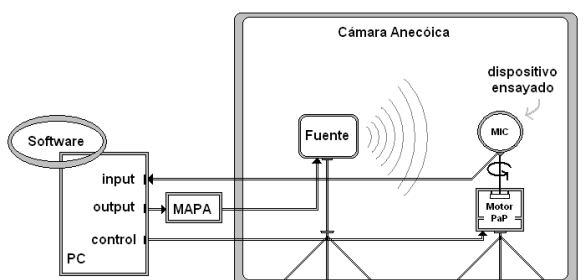


Figura 2: Diagrama de bloques simplificado del SAMDir. Ejemplo configuración medición de micrófono.

## 6. HARDWARE DEL SAMDir

Como se menciono en la sección 3, el SAMDir está conformado por diferentes componentes, algunos equipos son de las firmas Brüel & Kjær (micrófonos,

preamplificadores, amplificador) y National Instruments Inc. (DAQ), mientras que otros han sido diseñados y desarrollados por ingenieros del CINTRA (MAPA) [7]. Para este proyecto se diseño y desarrollo un dispositivo para el posicionamiento angular del elemento ensayado, compuesto por un motor paso a paso de la firma Tokio Electric Company Ltd. (TEC) controlado por un circuito de excitación basado en el circuito integrado Toshiba ULN2803APG. Este último es un conjunto de ocho excitadores bipolares Darlington de alta tensión y voltaje. Cada excitador posee diodos de protección para operar cargas inductivas. Sus características principales son:

- Corriente máxima de salida ( $I_{OUT}$ ): 500 mA
- Voltaje de mantenimiento de salida ( $V_{CE(sus)}$ ): 50 V
- Voltaje de entrada ( $V_{IN}$ ): 0,5 a 30 V
- Disipación de potencia ( $P_D$ ): 1,47 W

Las características principales del motor paso a paso de la firma TEC Ltd. Modelo HF65A-B12Q son:

- Tipo: Unipolar
- Voltaje de entrada ( $V_{IN}$ ): 12 V
- Resolución angular: 1,8 °/paso
- Impedancia: 48  $\Omega$ .

## 7. SOFTWARE DEL SAMDir

El software “SAMDir v1.0” está desarrollado con MATLAB v7.1. Este utiliza el puerto paralelo de la PC para controlar el motor paso a paso y el puerto de sonido de la PC o una DAQ dedicada a sonido y vibraciones (NI WLS 9234) dependiendo del tipo de aplicación (infrasonido, audiofrecuencias ó ultrasonido). En la Tabla 1, se presentan los 9 programas desarrollados que conforman el SAMDir v1.0., detallando extensión y tamaño.

Nº	Programa	Extensión	Tamaño
1	Samdir	.m	14,7 KB
2	Samdir	.fig	5,2 KB
3	Directividad	.m	2,21 KB
4	Medicion	.m	0,764 KB
5	Paso	.m	0,418 KB
6	Dirplot	.m	9,76 KB
7	Enviaryrecibir	.m	0,472 KB
8	Tono	.m	0,325 KB
9	Grabar	.m	0,525

Tabla 1: Lista de programas que componen SAMDir v1.0

En la Figura 3 se observa el árbol de dependencias del software SAMDir v1.0

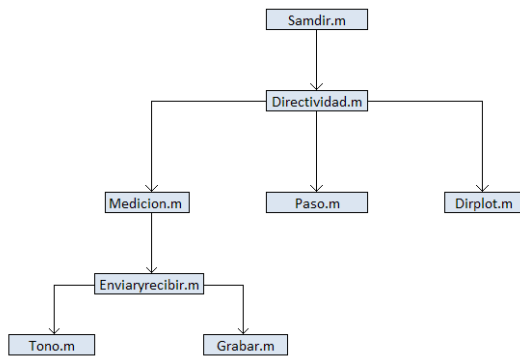


Figura 3: Árbol de dependencias del software SAMDir v1.0

A continuación se describen los ocho programas que componen la versión 1.0.

### 7.1 Samdir.m

Es el programa de interfaz con el usuario encargado de llamar y transferir el paso de parámetros seleccionados al programa principal **Directividad.m**. La interfaz grafica con el usuario se muestra en la Figura 4. Esta última está conformada por dos paneles principales llamados **Configuración** y **Control**



Figura 4: Interfaz grafica con el usuario. Panel de control

En su encabezado, el panel configuración, permite seleccionar el directorio donde se guardarán los archivos .WAV y .TIF producto de las mediciones realizadas. Además, en él se configuran parámetros como, nombre del transductor ensayado, duración tono puro de medición (segundos) y selección plano de medición (vertical/horizontal). Por último, permite configurar el tipo de ensayo a realizar, los cuales están agrupados en dos sub-paneles llamados mediciones por espectro y mediciones por tono. El primero, a través de dos pulsadores permite el comienzo de dos tipos de configuraciones denominadas comenzar medición por octava y comenzar medición por 1/3 de octava. En la Tabla 2, se observan las frecuencias utilizadas en cada ensayo. La medición por octava está formada por 10 tonos puros con frecuencias comprendidas entre 31,5 Hz y 16 kHz, mientras que para 1/3 de octava, son 31 tonos puros comprendidos entre 20 Hz y 20 kHz. El

panel de control, posee dos pulsadores denominados cancelar medición y cerrar ventana. El primero, como su nombre lo indica permite cancelar la medición en curso, mientras que el segundo cierra en forma definitiva la interfaz grafica.

Nº	Frecuencia (Hz)	Octava	1/3 Octava
1	20		*
2	25		*
3	31,5	*	*
4	40		*
5	50		*
6	63	*	*
7	80		*
8	100		*
9	125	*	*
10	160		*
11	200		*
12	250	*	*
13	315		*
14	400		*
15	500	*	*
16	630		*
17	800		*
18	1000	*	*
19	1250		*
20	1600		*
21	2000	*	*
22	2500		*
23	3150		*
24	4000	*	*
25	5000		*
26	6300		*
27	8000	*	*
28	10000		*
29	12500		*
30	16000	*	*
31	20000		*

Tabla 2: Frecuencias normalizadas por octava y 1/3 de octava, que utiliza SAMDir v1.0

### 7.2 Samdir.fig

Es un archivo creado por MATLAB que contiene el diseño de la interfaz grafica.

### 7.3 Directividad.m

Es el programa principal del SAMDir v1.0, recibe los parámetros seleccionados por el usuario a través de Samdir.m. Básicamente, está conformado por una función denominada "directividad" que recibe seis parámetros principales, ellos son: espectro, frecuencia de muestreo, tiempo, pasos, plano y ruteo. A través de dichas variables se puede seleccionar el espectro de frecuencias a medir, la frecuencia de muestreo que utiliza la DAQ empleada, la duración en segundos de los tonos puros aplicados como señal de excitación, la cantidad de pasos que realizará el motor para completar un giro de 360 grados, la selección del plano geométrico del transductor a medir y la ruta del directorio donde se archivarán los resultados. Seguidamente, directividad.m llama dos

programas que calculan y controlan la medición, estos son: medición.m y paso.m. Por último, conforma una matriz con los resultados expresados en decibeles de las mediciones angulares referenciadas a la medición de 0° para poder llamar al último programa denominado dirplot.m que presenta los resultados en forma grafica a través de diagramas de directividad para cada frecuencia ensayada.

#### 7.4 Medición.m

Recibe el tipo de medición seleccionado por el usuario, sea por octava, 1/3 de octava ó por tono único. Posteriormente genera los vectores de datos medios para cada posición angular medida, llamando al programa enviaryrecibir.m al cual le transfiere por paso de parámetros la frecuencia del tono puro de excitación, la frecuencia de muestreo, la duración del tono y la ruta del directorio.

#### 7.5 Paso.m

Realiza el control del motor paso a paso a través del puerto paralelo del computador. Para ello, utiliza básicamente tres funciones del “Data Acquisition Toolbox” de MATLAB llamadas “digitalio”, “addline” y “putvalue” [8]. Previamente, se definen la secuencia de pulsos a enviar para mover el motor en sentido horario u antihorario, con la posibilidad de realizar movimientos por pasos completos (1,8°/paso) o por medio paso (0,9°/paso).

#### 7.6 Dirplot.m

Genera diagramas de directividad como se utilizan usualmente en el campo de la ingeniería acústica y en radiofrecuencia. Básicamente es una modificación de la función “polar” de MATLAB realizada por Steve Rickman en 2002 [9]. Posee dos argumentos llamados Theta y Rho. El primero expresado en grados puede asumir valores entre -180 y +180 o también entre -90 y +90, permitiendo realizar gráficos de 360° o de 180° respectivamente, mientras que el segundo expresado en decibeles puede incluir valores positivos y negativos. Dirplot (Theta, Rho) realiza gráficos usando coordenadas polares sobre el ángulo Theta (grados) versus el radio Rho (dB). En la Figura 5, se presenta el grafico obtenido durante pruebas realizadas y en la Figura 6 el guardado en formato .TIFN

#### 7.7 Enviaryrecibir.m

Controla la generación de la señal de excitación y su respuesta en forma simultánea. Para poder operar en modo full dúplex se generaron las funciones “tono” y “grabar” las cuales son llamadas por este programa. La primera recibe como parámetros la frecuencia del tono puro de excitación, la frecuencia de muestreo y la duración de la señal de excitación la cual excede a la de grabación en 2 s. La segunda

recibe la frecuencia de muestreo y el tiempo de grabación. Los valores de las muestras son guardados en un vector y posteriormente se calcula el “valor medio” de la medición utilizando la función “mean” de MATLAB este será el valor devuelto por la función. Por último, a través de la función “wavwrite” de MATLAB se guardan los archivos de audio en formato .WAV (PCM, 16 bits, 44.100 Hz) [8].

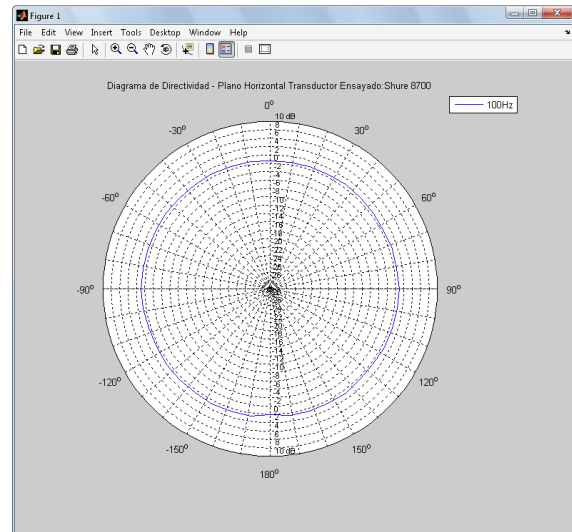


Figura 5: Diagrama de directividad, SAMDir v1.0 ventana de MATLAB v7.1

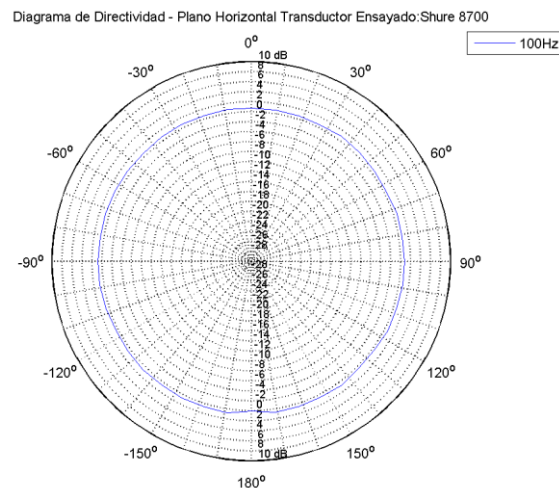


Figura 6: Diagrama de directividad, SAMDir v1.0 Imagen guardada en formato .TIFN

#### 7.8 Tono.m

Genera los tonos puros utilizados como señal de excitación en los ensayos. Para lograr esto se utilizo la función “sin” de MATLAB para crear vectores de datos con valores de muestras sinusoidales. Esta función recibe como parámetro la frecuencia expresada en hertz y la duración expresada en segundos. Finalmente a través de la función “sound” de MATLAB se envía el vector de datos a la DAQ que

la convierte en una señal eléctrica analógica a través de su DAC para poder ser enviada al MAPA.

En la Figura 7, se muestra una señal sinusoidal generada con la función "sin".

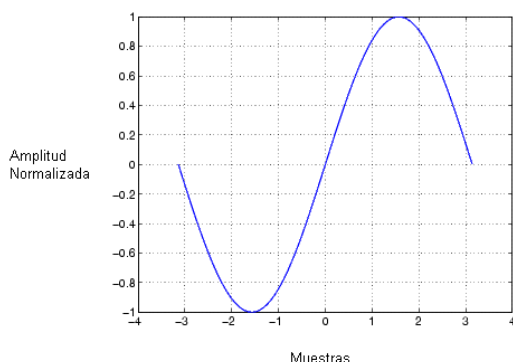


Figura 7: Señal de excitación normalizada generada.

## 7.9 Grabar.m

Para realizar la captura de las señales de respuestas se generó la función "grabar" y se creó un objeto de entrada analógica a través de la función "analoginput" del "Data Acquisition Toolbox" de MATLAB [8], la cual recibió como parámetros la DAQ utilizada (ej: "winsound", para la placa de adquisición de sonido por default instalada para el sistemas operativos Windows), el rango dinámico de grabación, la frecuencia de muestreo, la duración de la grabación y la señal de sincronismo (trigger). Por último se utilizó la función "getdata" de la misma librería de MATLAB, para extraer los datos de la DAQ en un vector.

## 8. CONCLUSIONES

Debido a la ausencia de sistemas de medición flexibles, de altas prestaciones y bajo costo, surge la necesidad del Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), dependiente de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), Facultad Regional Córdoba (FRC), de contar con un sistema automático de medición de directividad de transductores electroacústicos y fuentes sonoras, para la verificación y calibración de variados tipos de transductores utilizados en proyectos de investigación, desarrollo y servicios técnicos.

Este trabajo presenta el diseño y desarrollo del hardware y software de un Sistema Automático de Medición de Directividad de Transductores Electroacústicos (SAMDir).

Actualmente el SAMDir se encuentra en proceso de validación, sin embargo los ensayos preliminares de calibración y puesta en marcha evidencian las siguientes características: confiabilidad, robustez, bajo ruido, alta precisión y exactitud, bajo costo y flexibilidad de expansión

Por último, se ha desarrollado una herramienta de medición acústica automática y flexible, que puede ser mejorada continuamente. Se destaca que el desarrollo es original e innovador como solución de ingeniería aplicado al campo de la metrología acústica y como sistema automático de medición de directividad de transductores electroacústicos y fuente sonoras.

El trabajo a futuro tiene por objetivo ampliar las características del sistema. El proyecto contempla varias etapas que incluyen investigar, diseñar y desarrollar herramientas para medir: sensibilidad, respuesta en frecuencia en diferentes campos sonoros, función de transferencia y respuesta impulsiva, ampliando el tipo de señales de estación (impulsos, ruidos de banda angosta y ancha, ráfagas de ruido, ruidos pseudoaleatorios y barridos de frecuencia).

## 9. REFERENCIAS

- [1] Davis D & C. "Ingeniería de Sistemas Acústicos". Editorial Marcombo. Madrid, España. 1983
- [2] Beranek, L. "Acústica". Editorial Hispano Americana S.A., Segunda Edición. Buenos Aires 1969.
- [3] Ortega B., Romero M. "Electroacústica, altavoces y micrófonos". Editorial Pearson Education S.A. Primera Edición Madrid, 2003
- [4] International Electrotechnical Commission, IEC. "IEC 60268-5: Sound System Equipment – Loudspeakers". Edition 3.1 Consol. With am1 Switzerland. September 2007
- [5] International Electrotechnical Commission, IEC. "IEC 60268-4: Sound System Equipment – Microphones". Fourth Edition. Switzerland. June 2010
- [6] Müller S., Massarani P., "Transfer-Function Measurements with sweeps". J. Audio Engineering Society, Vol. 49 (6), pp. 443-471. 2001
- [7] Ferreyra, S., Esquinas P., Orecchia I. "Diseño y Desarrollo de un Amplificador de Potencia de Audio de Medición Clase D con SMPS". Procedimientos de las Primeras Jornadas de Acústica AdAA2009, A013, pp 104- Primera Edición, Rosario, del 19 al 20 Noviembre de 2009
- [8] Mathworks Inc. 7.1 "Help MATLAB 7.1". 2005
- [9] Rickman S. "Dirplot.m". Mathwoks Inc. Matlab Central. [www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/1251](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/1251), 2002