

Herramientas de simulación y caracterización de fuentes de sonido

Daniel Alejandro Moyano¹

¹Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas (CIAL), Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 16/08/2017

Fecha de aceptación del manuscrito: 26/03/2018

Fecha de publicación: 28/09/2018

Resumen—En este artículo se describen las herramientas de software de simulación y medición desarrolladas en torno al diseño y construcción de una fuente sonora omnidireccional liviana, realizada en el Centro de Investigaciones Acústicas y Luminotécnicas (CIAL), dependiente de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Córdoba y presentada en oportunidad de IX Congreso Iberoamericano de Acústica en Valdivia Chile (FIA 2014). Se describe una aplicación de simulación que realiza la representación polar y la respuesta en frecuencia de fuentes sonoras. La aplicación permite distribuir los parlantes sobre una superficie esférica, de manera uniforme, procurando una emisión omnidireccional. Se muestran diferentes técnicas utilizadas para realizar esta distribución. Se describen las representaciones gráficas que ofrece la aplicación y los descriptores utilizados. Se indican las variables intervinientes y los parámetros del parlante que deben ser ingresados. Se detallan los tiempos de ciclo para distintas configuraciones. A continuación se describe una aplicación para medición y caracterización de fuentes sonoras, que permite realizar mediciones con tonos puros, ruido rosa y ruido blanco. Se muestran las representaciones gráficas polares, la respuesta en frecuencia y las desviaciones de la media móvil, conforme con la ISO 3382 e ISO 140-3. Finalmente se comparan gráficas obtenidas por la aplicación de simulación y la de medición.

Palabras clave— fuente sonora, omnidireccional, campo acústico.

Abstract—This work describes simulation and measurement applications software developed around design and construction of a omnidirectional source sound of small dimensions, which was developed in the “Acoustic and Lighting Technics Investigations Center” (CIAL) dependent of Architecture and Urbanism Faculty of the National University of Cordoba and presented in the IXth Latin-American Acoustics Congress, in Valdivia Chile (FIA 2014). There is described a simulation application that realizes the polar representation and frequency response of sonorous sources. The application allows to distribute the speakers on a spherical surface, trying an omnidirectional emission. Different techniques appear used to realize this distribution. There are described the graphical representations that it offer the application and the used describers. The variable interveners and the parameters of the speaker that must be entered, are indicated. The time cycles for different configurations, are detailed. Later an application for measurement and characterization of sonorous sources is described, which allows to realize measurements with pure tones, pink noise and white noise. There appear the graphical polar representations, the response in frequency and the average mobile deviations, as with the ISO 3382 and ISO 140-3. Finally there are compared graphs obtained by the simulation and measurement applications.

Keywords— Source sound, omnidirectional, acoustic field.

INTRODUCCIÓN

Los ensayos en acústica destinados a estudiar las características de absorción de materiales, el aislamiento de sistemas constructivos o la cualidad de salas destinadas a usos musicales, teatrales o expositivos, se sustentan en la generación de un campo sonoro uniforme y difuso. La difusión acústica dentro de un recinto, depende en parte de las características reflectantes de las superficies interiores y de que su geometría no favorezca modos preferenciales de propagación para evitar el establecimiento de ondas estacionarias. Por otra parte, la emisión en

distintas direcciones en el interior de un recinto favorece su difusión, de allí la conveniencia de utilizar fuentes omnidireccionales de sonido (FOS), para la realización de estos ensayos.

Una esfera pulsante constituye una fuente omnidireccional ideal pero muy difícil de realizar. La manera más utilizada de generar sonido es a través del parlante electrodinámico, cuya emisión es una onda plana aproximada a la que generaría un pistón circular. La distribución uniforme sobre la superficie de una esfera, de una cantidad n de parlantes parece ser una alternativa plausible, a la esfera pulsante.

La distribución sobre las caras de los sólidos regulares, es uniforme sobre la esfera inscrita en el poliedro y algunos de ellos, como el icosaedro, el dodecaedro ó el icosidodecaedro (aunque este último no es regular) son una buena aproximación a una esfera. Esto puede comprobarse

Dirección de contacto:

Daniel Alejandro Moyano, Viracocha 7693 B° Va. Quisquizacate, 5021,
Tel: 03543-441255, damoyano2@gmail.com

comparando, entre diferentes poliedros, la relación entre el diámetro de la esfera circunscrita (D_c) y el de otra con el mismo volumen que el poliedro (D_e) (Horvat *et al.*, 2007). De este modo, la emisión en fase de 12 parlantes centrados en las caras pentagonales de un icosidodecaedro, resultaría en una buena aproximación a la emisión de una esfera pulsante.

Con el fin de valorar los resultados que podrían esperarse de una fuente con estas características, se desarrolló una aplicación de simulación que provee información en cuanto a la directividad y respuesta en frecuencia, ingresando como datos la cantidad de parlantes, el tipo de distribución, dimensiones, parámetros de los parlantes, etc. Posteriormente, se desarrolló una aplicación para caracterizar la fuente construida en cuanto a sus condiciones de directividad y respuesta en frecuencia.

APLICACIÓN DE SIMULACIÓN

En esta aplicación se representa el diagrama polar de emisión y la curva de nivel de sonido SPL [dB] vs frecuencia [Hz] esperados.

La expresión de la presión sonora en un punto lejano ($r \gg \lambda$) sobre un ángulo θ del eje de un pistón de radio a , que se mueve velocidad $U_0 e^{j\omega t}$ sobre una pared infinita es (Morse, 1981):

$$p(r, \theta, t) = j\rho_0 \frac{Q_0}{2\pi r} \omega \frac{2J_1\left(\frac{\omega a}{c} \sin \theta\right)}{\frac{\omega a}{c} \sin \theta} e^{j\omega(t - \frac{r}{c})} \quad (1)$$

Donde $Q_0 = U_0 \pi a^2$ representa el llamado poder del pistón y $J_1\left(\frac{\omega a}{c} \sin \theta\right)$ es la función de Bessel de primera especie y orden 1.

Si imaginamos n parlantes distribuidos sobre la superficie de una esfera de radio $R \ll r$, con posiciones angulares (θ_i, φ_i) la expresión de la presión producida, suponiendo que todos emiten en fase y radialmente desde su posición en la esfera, considerando la parte real y prescindiendo de la componente temporal será:

$$p(r, \alpha) = \rho_0 \frac{Q_0}{2\pi} \omega \sum_{i=1}^n \frac{2J_1\left(\frac{\omega a}{c} \sin \alpha_i\right) \sin\left(\omega \frac{r_i}{c}\right)}{\frac{\omega a}{c} \sin \alpha_i r_i} \quad (2)$$

Donde,

$$\alpha_i = \cos^{-1}(\cos \theta_i \cos \varphi_i)$$

$$r_i \cong r \sqrt{1 - 2 \frac{R}{r} \cos \alpha_i}$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$

$$\frac{-\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$$

Se define el descriptor p_u como:

$$p_u(r, \alpha) = \frac{p(r, \alpha)}{\rho_0 \frac{Q_0 \omega}{2\pi r}} \quad (3)$$

Adicionalmente se afecta a esta expresión de una ley tipo cardiode $(1 + \cos \alpha)/2$, suponiendo que el comportamiento acústico de la esfera sea el de una caja cerrada infinita.

El diagrama polar se desarrolla a partir de p_u , expresado en decibeles, haciendo girar 360° la esfera que contiene a los parlantes, en el plano xy alrededor del eje z . Se realizan 1800 iteraciones de cálculo a lo largo de los 360° . La aplicación permite agrupar estos datos de cálculo en un

promedio (se selecciona la cantidad de datos a agrupar), con la finalidad de emular una integración temporal.

Para el SPL se grafican dos curvas, una correspondiente a la obtenida con los n parlantes distribuidos sobre la esfera y otra con un solo parlante emitiendo en la dirección del eje x . El SPL se calcula como:

$$L = 10 \log \left(\rho_0 Q_0 \frac{f p_u}{r p_{ref}} \right)^2 + F_{dB} \quad (4)$$

Donde

$$p_{ref} = 0,00002 \text{ Pa}$$

El valor de Q_0 se obtiene a partir de las expresiones (Beranek, 1961):

$$Q_0 = U_0 \pi a^2$$

$$U_0 = \frac{e_g B l}{(R_g + R_e) \sqrt{R_M^2 + X_M^2}}$$

$$R_M = \frac{B l^2}{(R_g + R_e)} + R_{ms} + 2R_{mr}$$

$$X_M = \omega M_{ms} - 1/\omega C_{ms}$$

Finalmente F_{dB} , representa la atenuación ó énfasis que produce el volumen de la esfera, como caja cerrada (Delaleu, 1991).

$$F_{dB} = 10 \log \frac{\left(\frac{f}{f_c}\right)^4}{\left(\frac{f}{f_c}\right)^4 + A \left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + 1}$$

$$A = \frac{1}{Q_{tc}^2} - 2$$

$$f_c = f_s \sqrt{\frac{V_{as}}{V_{ab}} + 1}$$

$$Q_{tc} = Q_{ts} \sqrt{\frac{V_{as}}{V_{ab}} + 1}$$

$$V_{ab} = V_b \quad ; \text{ en caja no amortiguada}$$

$$V_{ab} = 1.2V_b \quad ; \text{ en caja amortiguada}$$

Donde

V_{as} : Volumen de aire equivalente a la elasticidad de la suspensión del parlante.

V_{ab} : Volumen de aire equivalente a la elasticidad del aire dentro de la caja.

$V_b = \frac{4}{3} \pi R^3 / n$: Volumen de la caja cerrada por parlante.

f_s : Frecuencia de resonancia del parlante al aire libre.

f_c : Frecuencia de resonancia del parlante en la caja.

Q_{tc} : Coeficiente de sobretensión total a la frecuencia de resonancia en caja cerrada.

La aplicación requiere el ingreso de los siguientes parámetros del parlante:

- Diámetro efectivo ($2a$) [inch]
- Frecuencia de resonancia (f_s) [Hz]
- Resistencia de la bobina (R_e) [Ω]
- Factor de mérito total del parlante (Q_{ts})

- Constante de transducción electromecánica (Bl) [Tm]
- Resistencia mecánica de la suspensión (R_{ms}) [Kg/s]
- Masa equivalente (diafragma + bobina + radiación) (M_{ms}) [g]
- Compliancia mecánica de la suspensión (C_{ms}) [mm/N]

La aplicación ofrece tres modalidades para definir la cantidad de parlantes y la forma de distribuirlos sobre la esfera:

- 1- Algoritmo de Zhou
- 2- Poliedros regulares
- 3- Manual

1- Realiza la distribución de n puntos sobre una esfera. La cantidad de puntos es seleccionada por el usuario desde la interfaz de la aplicación. La distribución se lleva a cabo de acuerdo con un algoritmo (Zhou et al., 1994) aplicado a un sistema de coordenadas esféricas (φ, θ) , $0 < \varphi < \pi$, $0 < \theta < 2\pi$, que consiste en lo siguiente: Se define el parámetro $h_k = -1 + \frac{2(k-1)}{n-1}$, con $k = 1, 2, \dots, n$ y con él se obtienen las posiciones:

$$\begin{aligned} \varphi_k &= \cos^{-1}(h_k); \quad k = 1, 2, \dots, n \\ \theta_0 &= 0 \\ \theta_k &= \theta_{k-1} + \frac{3.6}{\sqrt{n(1-h_k^2)}}, \quad k = 2, 3, \dots, n-1 \\ \theta_n &= 0 \end{aligned}$$

2- Se presenta la opción de seleccionar uno de los 5 poliedros regulares más la opción del icosidodecaedro. La posición de cada parlante es el punto de la cara del poliedro tangente a la esfera inscrita, y queda definida por los ángulos (φ, θ) y el radio R de la esfera. Los ángulos relativos se determinaron a partir de los ángulos diedros de cada uno de los sólidos. De este modo para el hexaedro, por ejemplo, las posiciones angulares fueron definidas como se muestra en la tabla 1.

TABLA 1: POSICIONES ANGULARES DE LOS PARLANTES EN LA DISTRIBUCIÓN BASADA EN EL HEXAEDRO.

	θ	φ
Parlante 1	0°	0°
Parlante 2	90°	0°
Parlante 3	180°	0°
Parlante 4	270°	0°
Parlante 5	0°	90°
Parlante 6	0°	-90°

Naturalmente, la cantidad de parlantes distribuidos será igual a la cantidad de caras del poliedro (4, 6, 8, 12, 20 para los regulares y 12 para el icosidodecaedro).

3- El modo manual permite definir las posiciones de forma manual. Esta opción se justifica, especialmente, por permitir introducir ajustes de posición a las brindadas por las opciones anteriores.

Otros parámetros necesarios de ingresar son la distancia (r) al centro de la esfera y el radio (R) de la esfera, ambos en metros. La aplicación permite rotar la esfera sobre el eje y y sobre el eje x con la finalidad de valorar diferentes secciones de la emisión, en el diagrama polar y su efecto en el SPL.

La Fig. 1 muestra cómo se disponen los parlantes para la distribución basada en el hexaedro. Como puede observarse, las posiciones corresponden a los centros de las caras de un cubo.

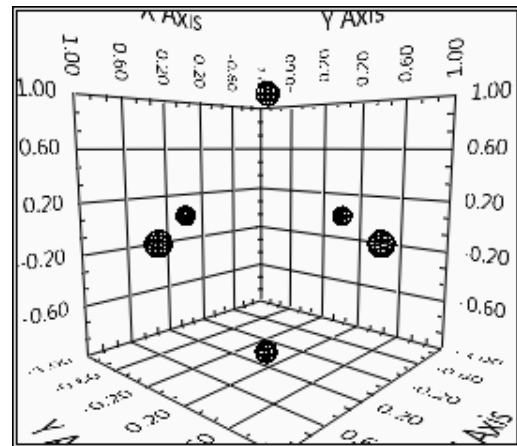


Fig. 1: Distribución en base al hexaedro.

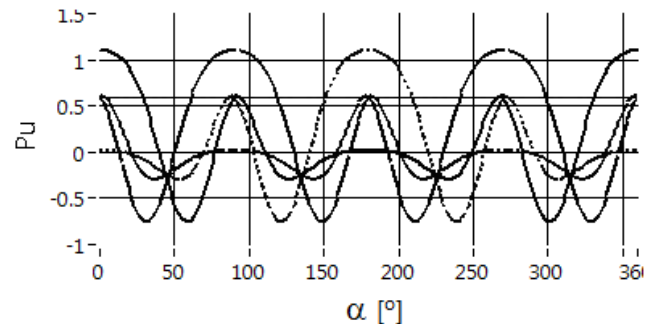


Fig.2: Diagrama de los descriptores p_u en 2KHz, de 6 parlantes dispuestos como se representa en la fig. 1.

La Fig. 2 representa los diagramas de los descriptores individuales $p_u(r, \alpha)$, en 2 KHz, de cada uno de los 6 parlantes, para la disposición mostrada en la Fig. 1. Pueden apreciarse los máximos localizados en $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ y 270° , correspondientes a los parlantes ubicados en esos ángulos en el plano xy . La línea horizontal a la altura de $p_u = 0.6$, corresponde a los dos parlantes localizados en los polos de la esfera.

La Fig. 3 muestra el diagrama de emisión en 2KHz, para 6 parlantes dispuestos en base a la geometría del hexaedro. Se destacan los lóbulos en las zonas donde se encuentran localizados los parlantes.

La Fig. 4 muestra las curvas de SPL. En trazo discontinuo y fino, se representa el correspondiente a 1 solo parlante. En trazo continuo y grueso, se representa el total de los 6 parlantes.

Si se gira la esfera 45° , alrededor del eje y , se obtendrán los gráficos de las figuras 5, 6 y 7.

En la Fig. 5 puede notarse que los máximos en 90° y 180° no se han modificado porque al encontrarse sobre el eje de giro, no cambian de posición.

Comparando la figura 3 y la figura 6 puede apreciarse el cambio de forma del diagrama y la disminución de los lóbulos localizados en 0° y 180° , con el giro de 45 grados de la esfera.

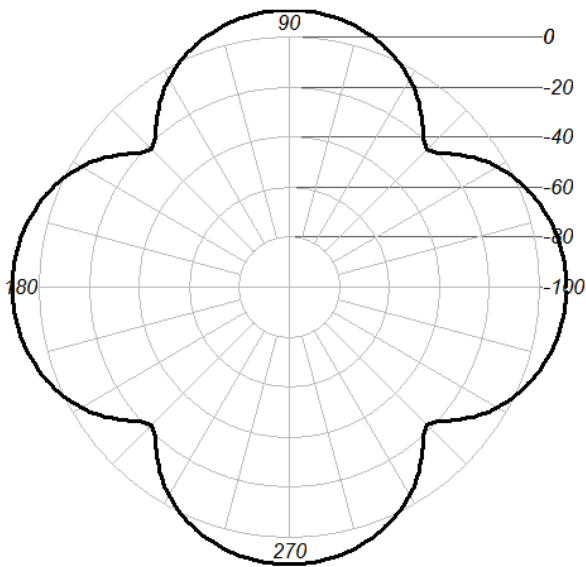


Fig.3: Diagrama polar de la emisión de 6 parlantes dispuestos como se representa en la fig. 1, en 2KHz.

$$R_e = 7.5 \text{ Ohm}$$

$$Q_{ts} = 0.86$$

$$Bl = 4 \text{ Tm}$$

$$R_{ms} = 0.69 \text{ Kg/s}$$

$$M_{ms} = 3 \text{ g}$$

$$C_{ms} = 0.49 \text{ mm/N}$$

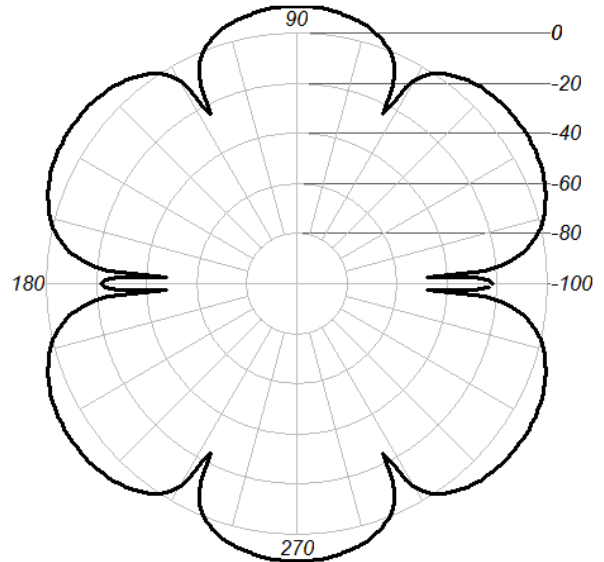


Fig.6: Diagrama polar de la emisión de 6 parlantes, habiendo girado 45° la disposición representada en la fig. 1, en 2KHz.

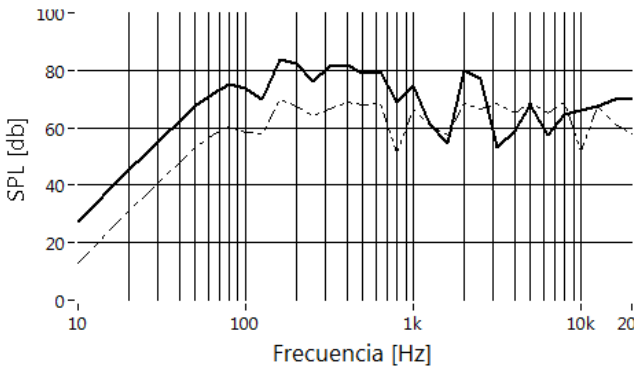


Fig.4: Diagrama del nivel de sonido en la dirección del eje x (0° en el diagrama polar) para la disposición representada en la fig. 1.

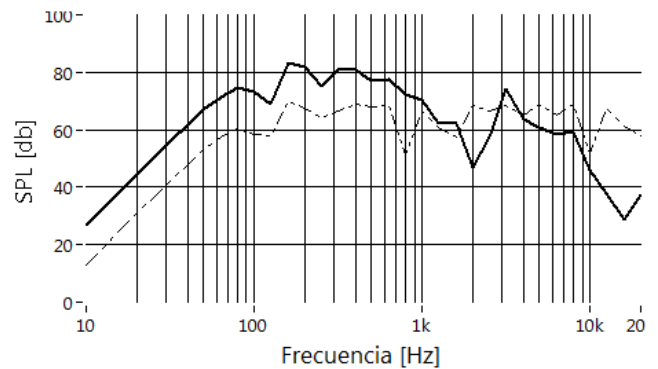


Fig.7: Diagrama del nivel de sonido en la dirección del eje x con un giro de 45° para la disposición representada en la fig. 1.

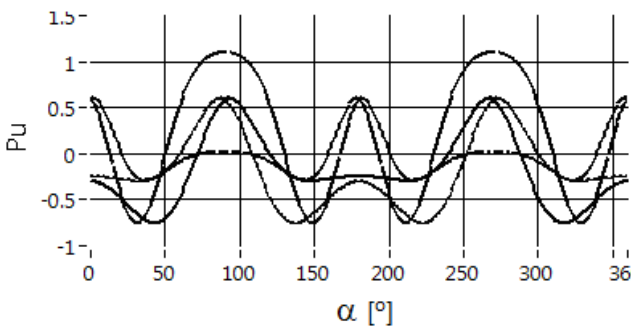


Fig.5: Diagrama de los descriptores p_u en 2KHz, de 6 parlantes habiendo girado 45° la esfera respecto de la fig. 1.

La respuesta en frecuencia muestra una caída a partir de 1 kHz, y mayor aún a mayor frecuencia. Esto se debe a que la emisión en se vuelve más directiva a medida que aumenta la frecuencia.

Las Figs. 2-7 han sido realizadas con $r = 1.5 \text{ m}$ y $R = 0.15 \text{ m}$. Los parlantes tienen un diámetro de 4" y los siguientes parámetros, correspondientes al modelo 4BF de la firma Audifiel:

$$f_s = 120 \text{ Hz}$$

El tiempo de ciclo de la aplicación dependerá de la distribución seleccionada y las características de la PC utilizada. Corriendo la aplicación en una PC con procesador Intel Core i5-3330 de 3 GHz, 8 Gb de RAM, Windows 7 de 64 bits, los tiempos de ciclo y condiciones de funcionamiento son los siguientes:

- Hexaedro: 50 ms
- Icosidodecaedro: 75 ms
- Icosaedro: 120 ms
- Zhou (con $n=100$): 450 ms

La Fig. 8 muestra la curva del tiempo de ciclo de la aplicación, para distintos valores de n . Para distribuir los parlantes sobre la esfera se ha utilizado el algoritmo de Zhou. Conviene aclarar que los valores de n (tan elevados), han sido utilizados solo con la finalidad de valorar el tiempo de ciclo.

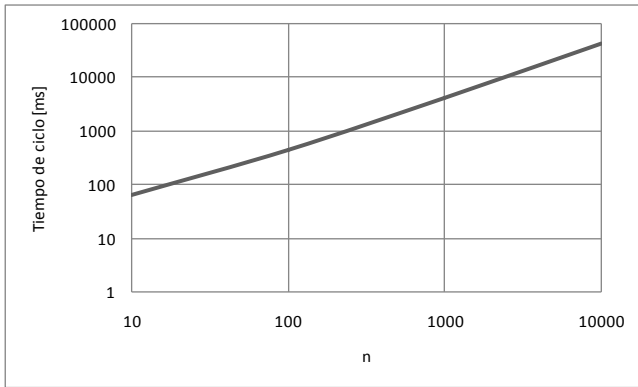


Fig. 8: Gráfica del tiempo de ciclo de procesamiento para distintos valores de n.

APLICACIÓN PARA MEDICIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA EMISIÓN DE FUENTES SONORAS

Esta aplicación permite emitir y adquirir el sonido a través de una interfaz USB, realiza una gráfica polar con los datos procesados y calcula los descriptores indicados por la norma ISO 3382. La aplicación tiene tres modos operativos, de acuerdo al tipo de emisión de sonido seleccionada:

- 1- Emisión de tono puro.
- 2- Emisión de ruido rosa.
- 3- Emisión de ruido blanco.

En la emisión de tono puro, se selecciona una forma de onda y se define la frecuencia de ensayo. La forma de onda utilizada por regla general es la sinusoidal, sin embargo la aplicación brinda la opción de onda cuadrada, diente de sierra y triangular.

La emisión de ruido rosa es la especificada por la norma ISO 3382 para la valoración de fuentes de tipo omnidireccional. La opción de emitir ruido blanco está incluida para casos especiales.

La aplicación realiza la gráfica polar de la banda de octava seleccionada. Sobre los datos correspondientes a esa banda, se calculan los siguientes descriptores (ISO 3382-1, 2009):

- Factor de mérito $Q = \left(\frac{L_{rms}}{L_{rms}}\right)^2$
- Índice de directividad $DI = 10 \log Q$
- Desvíos máximo y mínimo de las medias móviles en intervalos de 30° en los 360° del diagrama polar, dL_{max} y dL_{min} .

También se representa gráficamente la respuesta en frecuencia de la fuente de sonido y las desviaciones máxima y mínima de las medias móviles en intervalos de 30°, para cada banda de frecuencia.

En las Figs. 9-11 se muestran ejemplos de las gráficas obtenidas en un ensayo realizado con ruido rosa y 200 W de potencia para la FOS construida en el CIAL. Esta fuente, basada en la geometría del icosidodecaedro, tiene 12 parlantes modelo 4BF de la firma Audifiel, de 20 W cada uno, por lo tanto la potencia máxima de la fuente es de 240 W.

La aplicación ofrece dos modos de adquisición:

1. Modo directo: adquiere datos, habiendo definido previamente el rango de frecuencias, tipo de filtrado (octavas, tercio de octavas, etc.),

el tipo de ponderación (lineal, A, B, etc.), la constante de tiempo de integración y grafica a medida que la mesa giratoria realiza el ciclo de 360°.

2. Modo indirecto: Durante el giro de la mesa, la aplicación genera un archivo de sonido (.wav). Este archivo de sonido se recupera al terminar el ciclo y se procesa para calcular los descriptores y realizar las gráficas.

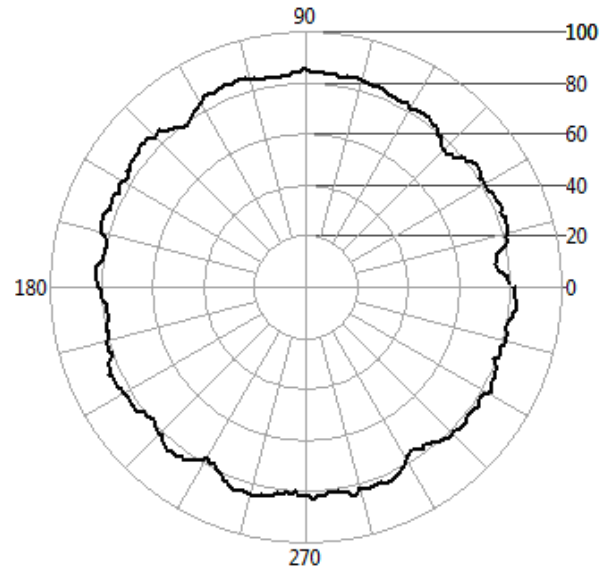


Fig. 9: Diagrama polar en la banda de 8 kHz, trazado para una FOS basada en la geometría del icosidodecaedro. La fuente está excitada con ruido rosa.

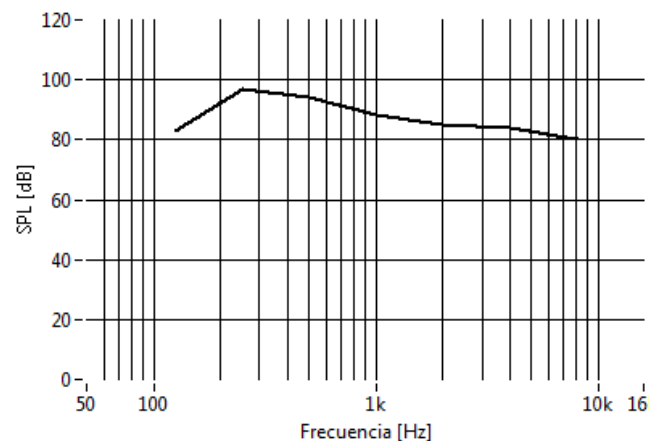


Fig. 10: Respuesta en frecuencia de la FOS de la figura 9.

ENSAYOS REALIZADOS

El CIAL desarrolló y construyó una fuente omnidireccional de sonido, basada en la geometría del icosidodecaedro (Maristany et al., 2014). Las mediciones realizadas para caracterizarla, permitieron valorar las predicciones de la simulación. Estas mediciones se llevaron a cabo en la cámara anecoica del centro, en los principales planos a 1,5 m de distancia. Para el estudio se utilizaron tonos puros y ruido rosa. La Fig. 12 muestra un esquema del sistema utilizado.

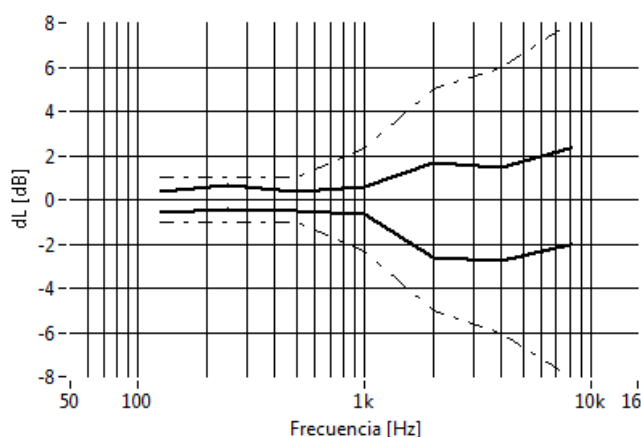


Fig. 11: Desvíos máximo y mínimo de las medias móviles en intervalos de 30°, de la FOS de la figura 9. En trazo discontinuo, los límites especificados por ISO 3382.

Para garantizar el comienzo de la gráfica en una posición angular fija deseada, se utilizó una salida de contacto seco activada por una leva en el mecanismo de la base giratoria B&K 3921. Esta señal se conectó a una entrada digital de la interfaz Labjack, la cual se comunica con la PC a través del puerto USB.

La salida de sonido de la PC, pasa por una etapa amplificadora (Peavey CS800), para obtener el nivel de potencia necesario para excitar a la fuente omnidireccional.

El sonido emitido por la fuente es captado por un micrófono Behringer y pre amplificada por una interfaz EMU, conectada a la PC a través de un segundo puerto USB.

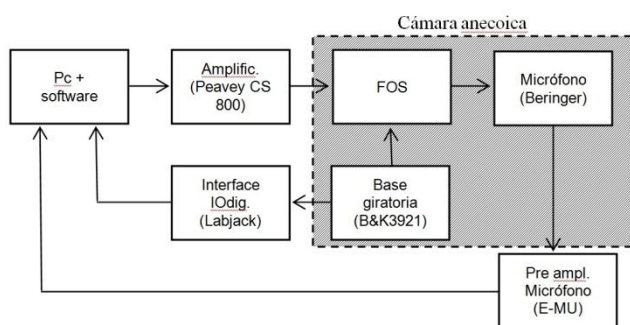


Fig. 12: Diagrama en bloques del sistema de medición.

La interfaz de sonido se ajustó a 44100 muestras/segundo y 16 bits, tanto en emisión como recepción.

La sensibilidad del micrófono es de 1.5 mV/Pa y se adicionaron 30 dB de pre amplificación para mejorar la relación señal/ruido.

La cadena de medición fue ajustada con un calibrador Bruel & Kjaer a 1000 Hz y 94 dB, con una incertidumbre de +/- 0,1 db y verificada con el mismo instrumento y frecuencia a 114 db.

La rutina que computa el nivel de sonido, integra la señal con una constante de tiempo de 125 ms y ponderación lineal.

Las Figs. 13-18, muestran los diagramas polares obtenidos por medición con tonos puros de la FOS para distintas frecuencias y los respectivos diagramas generados por

simulación, para una distribución de parlantes basada en el icosidodecaedro. Se han omitido las frecuencias inferiores a 1000 Hz, porque sus diagramas, al ser muy circular, no ofrecen detalles de comparación. Pueden resaltarse que los cambios predichos en las formas del modelo simulado son seguidos por la medición. Nótese, por ejemplo, la alteración en la circularidad, casi perfecta, del diagrama de la Fig. 13 respecto de la Fig. 14 y que ese cambio se presenta tanto en la simulación como en la medición. Obsérvese el orden de los lóbulos de la Fig. 15 y el cambio notable de forma de la Fig. 15 a la Fig. 16. El carácter de las irregularidades que se presenta en las Figs. 17-18.

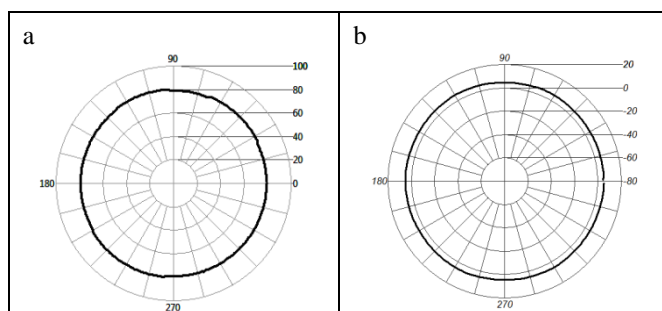


Fig. 13: Diagramas polares en 1000 Hz: a) Medición FOS; b) Simulación.

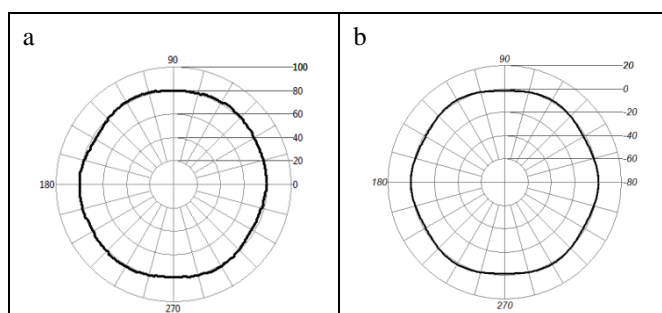


Fig. 14: Diagramas polares en 1250 Hz: a) Medición FOS; b) Simulación.

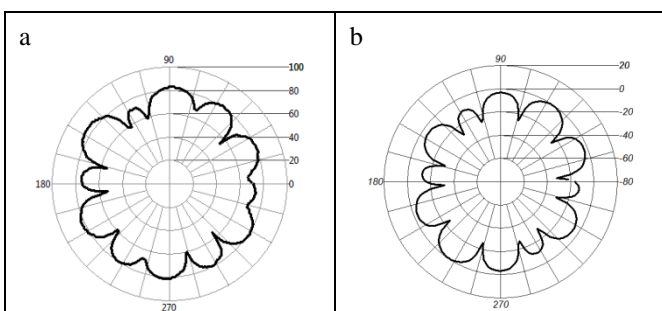


Fig. 15: Diagramas polares en 2500 Hz: a) Medición FOS; b) Simulación.

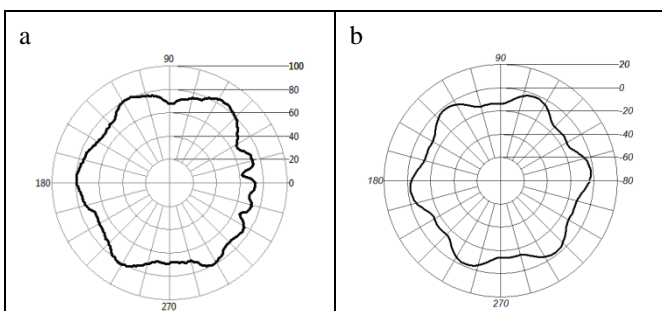


Fig. 16: Diagramas polares en 4000 Hz: a) Medición FOS; b) Simulación.

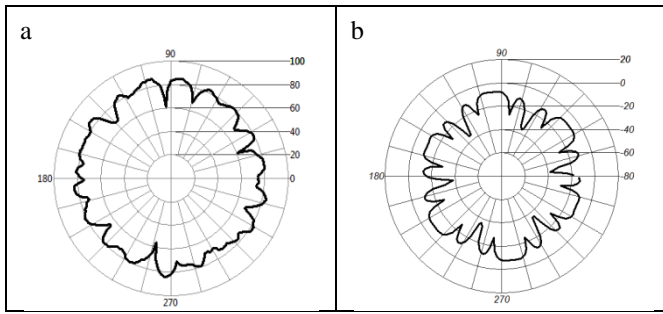


Fig. 17: Diagramas polares en 8000 Hz: a) Medición FOS; b) Simulación.

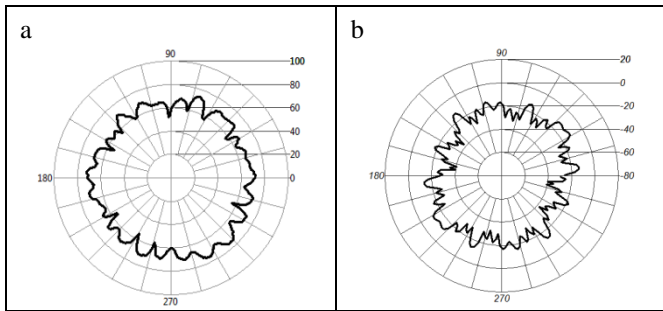


Fig. 18: Diagramas polares en 10 kHz: a) Medición FOS; b) Simulación.

Las Figs. 19 y 20 muestran la respuesta en frecuencia obtenidas por medición y simulación, respectivamente, para la FOS desarrollada en el centro.

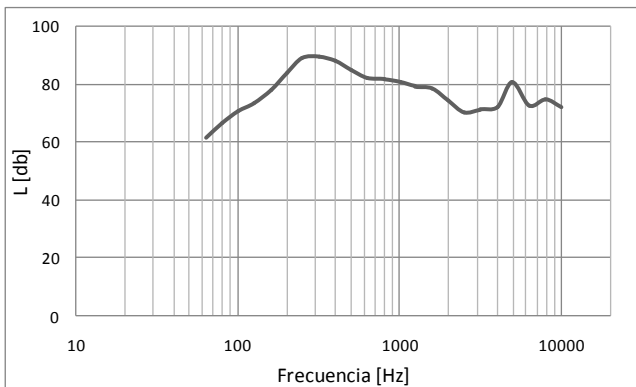


Fig. 19: Respuesta en frecuencia de la FOS entre 63 y 10000 Hz.

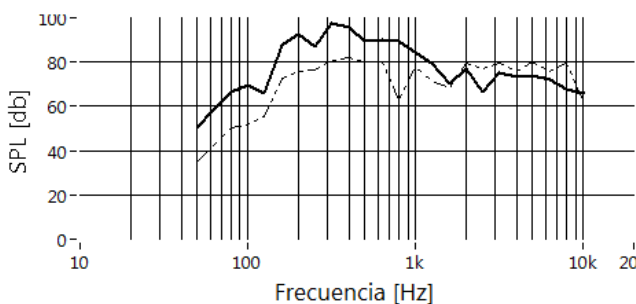


Fig. 20: Respuesta en frecuencia de la simulación con 12 parlantes distribuidos en base a la geometría del icosidodecaedro.

CONCLUSIONES

La aplicación de simulación ofrece una variedad de distribuciones de fuentes, para la representación del campo acústico generado por fuentes omnidireccionales. Basado en los sólidos regulares se establecen 5 distribuciones fijas y una sexta en base a la geometría del icosidodecaedro, sólido en el que se basó la construcción de la fuente desarrollada en el CIAL. Para cantidades de fuentes superiores (o no contempladas con los sólidos), la aplicación incluye un algoritmo que permite realizar distribuciones sobre una esfera hasta cantidades muy superiores que las que pueden ser realizables, para fuentes de sonido (del orden de miles). Sin embargo se ha observado que, para valores de n bajos (inferiores a 100), las distribuciones generadas por el algoritmo no son muy uniformes. Por ejemplo, para $n = 12$, se observan concentraciones en los polos de la esfera y los diagramas polares resultantes no tienen simetría. Como una nueva línea de investigación, se tiene la intención de probar otros algoritmos de distribución basados en los puntos de Fekete (Beiroa, 2003).

Con respecto a las predicciones, el modelo brinda soluciones muy similares a las obtenidas por medición según puede verse de las Figs. 13-18 y las curvas de las Figs. 19 y 20. Al incorporar el radio R de la esfera inscrita como variable de cálculo de p_u , para el diagrama polar, se ha observado que las representaciones resultan muy sensibles a los cambios de R y de r para frecuencias superiores a 1600 Hz. Parece tratarse de un fenómeno de interferencia que no se presenta cuando se supone $R = 0$. Por otra parte este hecho, nos orienta a los cuidados que deben considerarse en el montaje de los elementos para el ensayo. En este sentido, se continuarán contrastando las predicciones del modelo simulado, con futuras mediciones.

La aplicación para medición y caracterización de fuentes sonoras, es una herramienta gráfica potente que permite la realización de ensayos con tonos puros, ruido rosa y ruido blanco. Permite la caracterización de fuentes comunes y omnidireccionales en base a los descriptores de la ISO 3382. Este desarrollo, junto con la cámara anecoica que posee el centro y el resto de la cadena de medición, posibilitará brindar servicios a fabricantes de parlantes y micrófonos, como también de extensión.

Las herramientas de software desarrolladas para este trabajo, han dejado una base para nuevas y futuras aplicaciones en el centro.

REFERENCIAS

- [1] Philip M. Morse "Vibration and sound". ASSA Edition (1981).
- [2] Horvat M., Domitrovic H. & Grubesa S. Design of a new omnidirectional sound source. 3rd Congress of the AlpsAdria Acoustics Association, Graz, Austria (2007).
- [3] Leo L. Beranek "Acústica". Segunda edición. Editorial Hispano Americana (1969).
- [4] Rakhmanov, E.A., Saff, E. B., Zhou, Y. Minimal discrete energy on the sphere. *Mathematical Research Letters*, **1**, 647-662, 1994.
- [5] ISO, ISO 3382-1: 2009. Acoustics. Measurement of sound acoustics parameters. Part 1, Performance Spaces.
- [6] IX Congreso iberoamericano de acústica – FIA 2014 - Valdivia – Chile - "Desarrollo de una fuente sonora omnidireccional liviana

para mediciones de campo” – A.R. Maristany, D.A. Moyano y P.E. Méndez.

- [7] Beiroa Gesto J. M. - “*Estimación de los puntos de Fekete en la esfera unidad*” - <http://hdl.handle.net/2099.1/6491>
- [8] Charles Henry Delaleu - “*Altavoces y cajas acústicas*” – PARANINFO S.A. (1991).