



Práctica 6: Patrón de radiación de una fuente sonora omnidireccional en una cámara anecoica

Muñoz Sanchez Edgar

edgar.leo1618@ciencias.unam.mx

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av.
Universidad No. 3000, Col. Universidad Nacional Autónoma de México, C.U. Delegación Coyoacán,
C.P. 04510, CDMX

Fecha de entrega: 10 de junio de 2025

Resumen

Este trabajo presenta la caracterización del patrón de radiación de una fuente sonora omnidireccional de tipo dodecaédrico, utilizando la cámara anecoica del *Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología*. Se realizaron mediciones del nivel de presión sonora equivalente (L_{Zeq}) en intervalos angulares de 5° , abarcando un total de 72 posiciones sobre el plano horizontal. El análisis se centró en 18 bandas de frecuencia de 1/3 de octava entre 50 Hz y 5 kHz. Se aplicaron criterios establecidos por las normas *ISO 140-3* e *ISO 3382-2* para evaluar la uniformidad de la radiación, determinando las desviaciones positiva y negativa del nivel de presión por banda. Los resultados indican que la fuente cumple con los requisitos normativos en gran parte del espectro analizado, validando su aplicación en ensayos acústicos profesionales.

Palabras clave: patrón de radiación, fuente omnidireccional, cámara anecoica, ISO 140-3, ISO 3382, SPL, L_{Zeq} .

Abstract

This study presents the characterization of the radiation pattern of an omnidirectional dodecahedral sound source using the anechoic chamber at *Laboratorio de Acústica y Vibraciones* from *Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología*. Sound pressure level measurements (L_{Zeq}) were taken every 5° , covering a total of 72 positions on the horizontal plane. The analysis focused on 18 one-third octave frequency bands ranging from 50 Hz to 5 kHz. Criteria from *ISO 140-3* and *ISO 3382-2* standards were applied to evaluate radiation uniformity by determining the positive and negative deviations of sound pressure levels per band. Results show that the source meets international standards across most of the analyzed frequency range, supporting its use in professional acoustic testing.

Keywords: Radiation pattern, omnidirectional source, anechoic chamber, ISO 140-3, ISO 3382, SPL, L_{Zeq} .

1. Introducción

En el ámbito de acústica arquitectónica y medioambiental, la caracterización adecuada de fuentes sonoras empleadas en mediciones es un requisito indispensable para obtener resultados confiables. Esta caracterización tiene importancia en ensayos normativos como aquellos que evalúan el aislamiento acústico de fachadas (Bote et al., 2012; “ISO 140-5:1998”, 1998), la calidad acústica de recintos cerrados (Shinn-Cunningham et al., 2005) o la búsqueda de fuentes alternativas y prácticas donde no es posible usar fuentes estándar (Sumarac-Pavlovic et al., 2008).

La *Organización Internacional de Estandarización* (ISO por sus siglas en inglés, *International Organization for Standardization*) es una entidad independiente y no gubernamental que desarrolla normas internacionales voluntarias para garantizar la calidad, seguridad y eficacia de productos, servicios y sistemas. En el ámbito de la acústica, la ISO ha establecido diversas normas que proporcionan directrices para la medición y evaluación de parámetros acústicos en diferentes contextos. Estos incluyen sectores de salud, tecnologías de la información, seguridad y riesgo, transporte, energía, sostenibilidad, alimentos y agricultura, materiales, construcción e ingeniería (International Organization for Standardization, 2025).

En el campo de la acústica, la ISO ha desarrollado estándares que permiten caracterizar propiedades sonoras de espacios y dispositivos bajo condiciones controladas. La norma *ISO 140-3* (2021), por ejemplo, proporciona lineamientos para realizar mediciones del aislamiento acústico en condiciones especiales de campo. Dicha norma especifica métodos de laboratorio para medir el aislamiento acústico al impacto de conjuntos de suelo. Por su parte, la *ISO 3382-2* (2008) especifica métodos para la medición del tiempo de reverberación en recintos. Esta norma estandariza la obtención de parámetros acústicos como el tiempo de decaimiento de la energía sonora, a fin de caracterizar la calidad del entorno sonoro en espacios ocupados cotidianamente.

Para aplicar estas normas es necesario utilizar fuentes sonoras capaces de emitir sonido de forma uniforme en todas las direcciones. Estas fuentes

se denominan *omnidireccionales* y son fundamentales para evaluar propiedades acústicas del espacio, como la reverberación o el aislamiento, con independencia de la orientación de la fuente. Una de las configuraciones más comunes en este tipo de fuentes es la forma dodecaédrica, que consiste en doce altavoces dispuestos sobre las caras de un dodecaedro regular. Este diseño permite una distribución homogénea de energía acústica y es ampliamente usado en mediciones de campo libre o semirreflexivo. En el *Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología*¹ (LAV-ICAT), Antonio Pérez y colaboradores (López et al., 2006) han desarrollado fuentes sonoras omnidireccionales basadas en un diseño compacto, capaz de operar en un amplio rango de frecuencias. El desempeño de estas fuentes suele evaluarse comparándolo con los requerimientos de las normas internacionales, encontrando que cumple con criterios de uniformidad y estabilidad.

Dentro de la normativa, la caracterización de una fuente sonora requiere un entorno controlado que elimine las reflexiones de las ondas en las paredes, piso y techo. Para ello se emplean *cámaras anecoicas*, espacios diseñados específicamente para simular condiciones de *campo libre*. Estas cámaras están revestidas internamente con cuñas de materiales altamente absorbentes, como espuma de poliuretano o fibra de vidrio, que minimizan las reflexiones en un amplio rango de frecuencias. Boullosa y López (1999) describen las características acústicas de la cámara anecoica del ICAT que será utilizada en este trabajo. En su estudio se midió el nivel de ruido de fondo, el aislamiento de las puertas y la respuesta en frecuencia de la cámara, confirmando que se alcanzan condiciones de campo libre a partir de ciertas frecuencias límites (Boullosa & Lopez, 1999). La cámara anecoica del ICAT está compuesta por dos cubos concéntricos de concreto armado con paredes de 30 cm de espesor (ver **Figura 1**). El volumen interno útil de la cámara es de $5.30 \times 3.70 \times 2.80$ m, contenido dentro de una estructura mayor de $7.50 \times 5.90 \times 5.00$ m. Las paredes internas están recubiertas con cuñas de espuma de poliuretano de 1.10m de largo, y el suelo está formado por una malla metálica con alambre de 3 mm de diámetro, dispuesta a 20 cm sobre las cuñas inferiores y con un espaciamiento de 5 cm entre alambres. Cuenta con un sistema de ventila-

¹Antes llamado *Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico* o CCADET

ción silencioso, mediante tres salidas ocultas tras las cuñas superiores y tubos de entrada sellados con tapas de acero enroscadas. El acceso se realiza mediante una puerta de aislamiento acústico compuesta por una lámina de acero montada sobre un marco de neopreno y rellena con arena fina de playa, complementada por una segunda puerta exterior con bisagras tipo tijera. La cámara ofrece condiciones de campo libre en las proximidades de la fuente, con un nivel de ruido de fondo de tan solo 50 dB a 100 Hz, y cumple con una desviación máxima del 0.5 % del volumen total en el rango de 80 Hz a 20 kHz. Esta infraestructura está destinada a pruebas psicoacústicas, medición de la respuesta en frecuencia de pequeñas fuentes sonoras, análisis de directividad de transductores, calibración de micrófonos, etc.

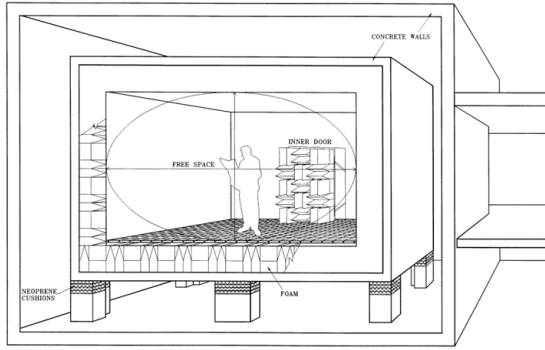


Figura 1: Vista lateral de la cámara anecoica del LAV-ICAT (Boullosa & Lopez, 1999).

Uno de los parámetros fundamentales que se pueden determinar en una cámara anecoica es el *patrón de radiación*. Este patrón describe cómo se distribuye la energía acústica emitida por una fuente en el espacio circundante. Se expresa comúnmente mediante diagramas polares (o esféricos en su versión tridimensional) que relacionan el nivel de presión sonora (SPL, por sus siglas en inglés) con la dirección angular respecto al eje de emisión. Para medirlo, se utiliza un micrófono unidireccional de múltiples formas: ya sea desplazándolo angularmente alrededor de la fuente, manteniendo una distancia fija al centro de emisión; mediante una disposición de múltiples micrófonos equidistantes a la fuente; o bien, manteniendo fijo el micrófono y apuntando al centro geométrico de una fuente que rota a cada paso de medición. El patrón de radiación permite conocer

la direccionalidad de una fuente y su desempeño en distintas condiciones acústicas.

Matemáticamente, adoptando un sistema de coordenadas esférico (r, ϕ, θ) cuyo centro se encuentra en el centro de emisión acústica y el modelo de radiación de campo lejano (Williams, 1999), se tiene que la transformada de Fourier de un campo acústico libre (ausente de reverberaciones) se puede escribir como (Canclini et al., 2019):

$$P_f(\mathbf{x}, \omega) = \frac{e^{-j\frac{\omega}{c}r}}{r} S(\omega) D(\phi, \theta, \omega) \quad (1)$$

donde ω es la frecuencia angular, \mathbf{x} es la posición de un punto arbitrario y c es la rapidez del sonido; $S(\omega)$ es la transformada de Fourier de la señal de la fuente en el centro acústico y $D(\phi, \theta, \omega)$ es una función compleja que describe la direccionalidad de la fuente, también conocida como *patrón de radiación*. Asumiendo que la señal de la fuente $S(\omega)$ y la posición de medición son conocidas, se tiene que:

$$|D(\phi, \theta, \omega)| = r \frac{|P_f(\mathbf{x}, \omega)|}{|S(\omega)|} \quad (2)$$

En una gran variedad de casos, la aproximación del modelo de campo lejano es adecuada. En este caso se suele asumir que la fuente actúa como una fuente puntual. Tal como estipulan las normas internacionales, el conocimiento de la señal de excitación $S(\omega)$, su comportamiento lineal respecto a la energía, y la medición del campo sonoro $P_f(\mathbf{x}, \omega)$ en posiciones suficientemente alejadas del centro acústico de la fuente, permiten la determinación del patrón de radiación, $D(\phi, \theta, \omega)$. Para una fuente omnidireccional será suficiente trabajar tan solo el plano acimutal ($\theta = 0^\circ$).

El nivel de presión sonora, o SPL (*Sound Pressure Level*), que cuantifica la intensidad del sonido en función de una presión de referencia. Se define como:

$$SPL = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (3)$$

donde p es la presión acústica efectiva medida y $p_0 = 20 \mu Pa$ es la presión de referencia en aire. En mediciones prolongadas o de señales variables,

se emplea el *nivel de presión sonora equivalente ponderado*, denotado como L_{Zeq} . De acuerdo a la norma IEC 61672-1 (*International Electrotechnical Commission*, 2013) el cual se calcula integrando la energía acústica a lo largo del tiempo con una respuesta plana (ponderación Z):

$$L_{Zeq} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right) \quad (4)$$

Las normas *ISO 140-3* (y también la norma *ISO 3382-2* aunque más estricta) establecen que las desviaciones máximas permitidas de una fuente omnidireccional no pueden sobrepasar los ± 2 dB (± 1 dB) en régimen de frecuencias bajas (menores a 630 Hz) y los ± 8 dB (± 6 dB) en el régimen de frecuencias altas (superiores a 1 kHz). Las limitaciones del régimen intermedio se realiza a través de una línea recta, como se observa en la **Figura 2**.

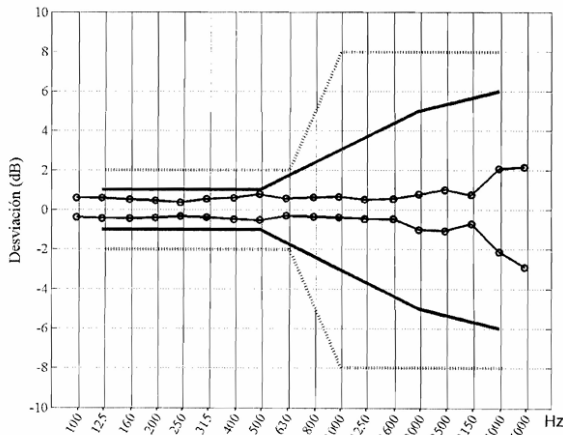


Figura 2: Desviación de una fuente omnidireccional en función de la frecuencia. La línea punteada muestra el límite máximo permitido por la norma *ISO 140-3*. (López et al., 2006).

Tales desviaciones son calculadas para cada banda de frecuencia $\Delta\nu_j$, donde se define el índice de direccionalidad $ID_{i,j}$ como la diferencia entre el nivel de presión sonora promedio en todo el plano (360° , es decir los 72 registros obtenidos), denotado como $\overline{LZeq}_{360^\circ,j}$, y el nivel promedio en un arco angular de 30° (agrupaciones de 6 de los 72 registros) correspondiente al i -ésimo arco, denotado como $\overline{LZeq}_{30^\circ(i),j}$:

$$ID_{i,j} = \overline{LZeq}_{360^\circ,j} - \overline{LZeq}_{30^\circ(i),j} \quad (5)$$

A partir de los valores de $ID_{i,j}$ para los diferentes arcos de 30° , se identifican las desviaciones máxima y mínima por frecuencia. La desviación positiva del L_{Zeq} para la banda $\Delta\nu_j$ se calculará entonces como el máximo índice de direccionalidad, $\max(ID_{i,j})$

$$\Delta LZeq_j^{(+)} = \max_i (\overline{LZeq}_{360^\circ,j} - \overline{LZeq}_{30^\circ(i),j}) \quad (6)$$

De forma análoga, la desviación negativa es el mínimo índice de direccionalidad, $\min(ID_{i,j})$

$$\Delta LZeq_j^{(-)} = \min_i (\overline{LZeq}_{360^\circ,j} - \overline{LZeq}_{30^\circ(i),j}) \quad (7)$$

Estas desviaciones permiten evaluar si las diferencias direccionales en los niveles de presión para una determinada banda de frecuencia se encuentran dentro de los límites establecidos por las normas *ISO 140* e *ISO 3382*, las cuales son comúnmente utilizadas para la caracterización de fuentes sonoras en el campo de la acústica arquitectónica y ambiental.

El presente experimento tiene como objetivo principal caracterizar el patrón de radiación de una de las fuentes sonoras omnidireccionales del *LAV-ICAT* utilizando su cámara anecoica. Se realizarán mediciones del nivel de presión sonora a diferentes ángulos, cubriendo un rango amplio de frecuencias. Se emplearán ecuaciones acústicas fundamentales para interpretar los resultados y se evaluará el cumplimiento de los criterios establecidos en las normas *ISO* pertinentes.

2. Objetivos

Obtener el patrón de radiación de una fuente omnidireccional dodecaédrica en cámara anecoica y evaluar la calidad de su respuesta en distintas frecuencias de acuerdo a las normativas internacionales.

3. Metodología

Para llevar a cabo la caracterización acústica de la fuente omnidireccional, se empleó una fuente dodecaédrica diseñada y fabricada en el LAV-ICAT. Esta fuente cuenta con doce altavoces DP6 Focal montados en las caras de un dodecaedro regular.

La fuente fue montada sobre una tornamesa motorizada también diseñada en el LAV-ICAT, capaz de realizar rotaciones angulares de 5° por cada señal enviada mediante un botón físico. La tornamesa dispone de una pantalla numérica de dos dígitos que incrementa con cada paso y puede ser reiniciada mediante un botón *reset*, permitiendo mantener un control preciso del ángulo de acimut. Para evitar desequilibrios físicos de la fuente al girar, se utilizaron pliegos de espuma (fomi) para sujetarla firmemente al eje de la tornamesa, asegurando su estabilidad durante la rotación.

El micrófono de medición fue colocado a una distancia radial de 1.50 m de la fuente, montado sobre un tripié y alineado de manera que su cápsula estuviera a la misma altura (1.15m) y apuntando directamente al centro geométrico de la fuente. Esta configuración garantiza que las mediciones se realicen en el campo directo de la fuente, minimizando posibles errores por desalineación. En la **Figura 3** se muestra un esquema del montaje experimental.

Para verificar que la tornamesa completara una rotación completa de 360° , se observó que la cara numerada con el número 9 del dodecaedro estaba orientada hacia el micrófono. Al finalizar la serie de mediciones, se corroboró que dicha cara había regresado a su posición original y que los cables que rodeaban el eje de sujeción de la fuente-tornamesa se habían desenredado, indicando que la fuente había completado una vuelta completa.

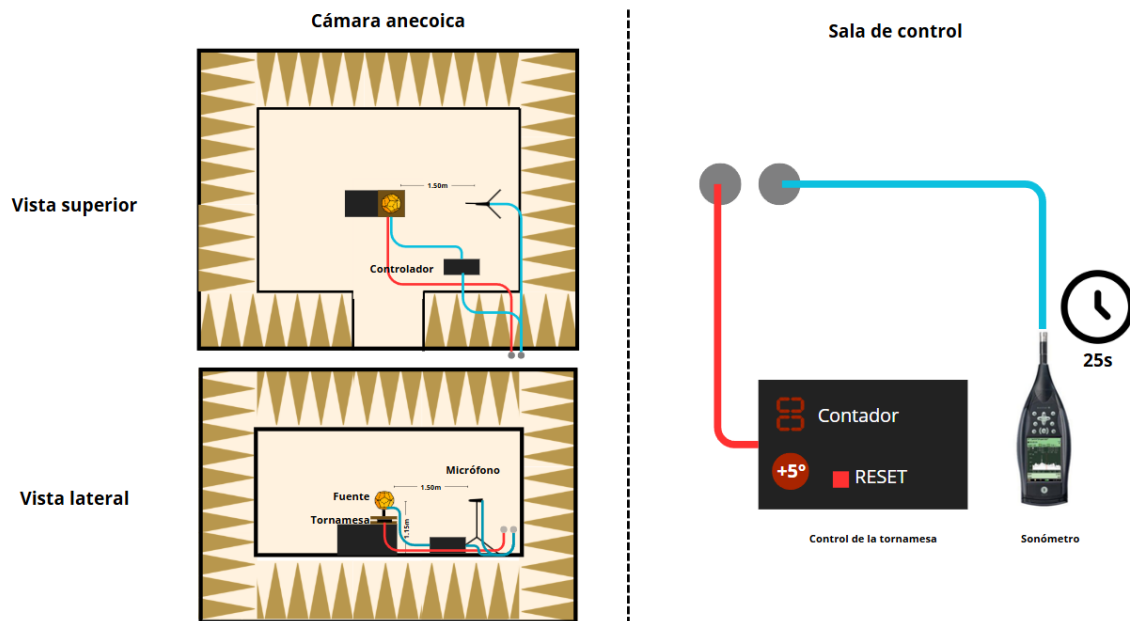


Figura 3: Esquema del experimento. A la izquierda se muestra la distribución de los elementos en la cámara con vistas superior y lateral. A la derecha, los elementos de la sala de control.

El micrófono fue conectado a un sonómetro *Brüel & Kjær 2270*, que captura espectros de frecuencias en tiempo real. El sonómetro fue calibrado utilizando un calibrador *Brüel & Kjær 4231*

con número de serie 2671685. El proceso de calibración consistió en emitir un tono de 1 kHz a 94 dB directamente al micrófono, permitiendo ajustar el sistema para obtener mediciones precisas del

nivel de presión sonora absoluto L_{Zeq} .

Durante el experimento, el sonómetro emitió una señal de ruido blanco a través de la fuente y registró el espectro de frecuencias en bandas de 1/3 de octava, es decir, divisiones del espectro en las que cada banda tiene un ancho de frecuencia que es la tercera parte de la banda central, abarcando desde 12.5 Hz hasta 20 kHz. A partir de estos espectros se analizaron únicamente 18 bandas correspondientes al intervalo de 50 Hz a 5 kHz. Por cada paso de 5° , se obtuvieron los espectros necesarios para cubrir un total de 360° , resultando en 72 registros.

Cada medición tuvo una duración aproximada de 25 a 26 segundos y fue interrumpida manualmente al finalizar. Los datos obtenidos se descargaron utilizando el software especializado del sonómetro para su posterior análisis. A partir de los valores de L_{Zeq} en cada ángulo de azimut, se obtuvieron los distintos espectros, la gráfica de los patrones de radiación para las distintas bandas y una gráfica con las desviaciones positiva y negativa para evaluar su calidad de acuerdo a normas internacionales. La subrutina implementada en *MATLAB* puede encontrarse en el [Apéndice A](#).

4. Resultados

Análisis de patrones de radiación sonora

A partir de los datos obtenidos en campo, se generaron gráficos de los patrones de radiación para diferentes frecuencias. En la **Figura 4** se muestran los patrones correspondientes a frecuencias desde 100 hasta 5000 Hz, lo cual permite observar la evolución espacial de la distribución energética del sonido con el aumento de la frecuencia. Esta representación polar permite identificar zonas de mayor direccionalidad y lóbulos secundarios que emergen a frecuencias más altas.

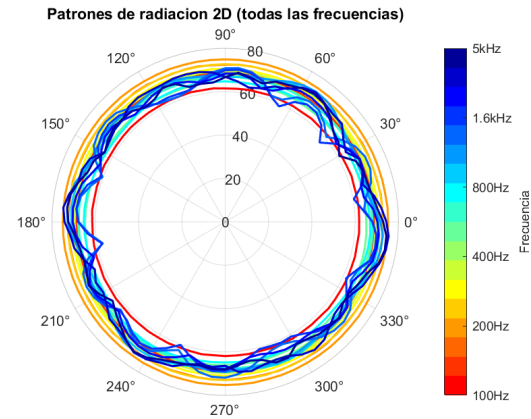


Figura 4: Patrones de radiación obtenidos desde 100 hasta 5000 Hz. Se observan cambios notables en la direccionalidad conforme aumenta la frecuencia.

Para complementar esta representación angular, se presenta en la **Figura 5** un ejemplo del espectro de presión sonora correspondiente a un ángulo específico (0°). Gráficas similares se observaron para las demás posiciones angulares. Estos espectros permiten identificar las bandas de frecuencias con mayor energía.

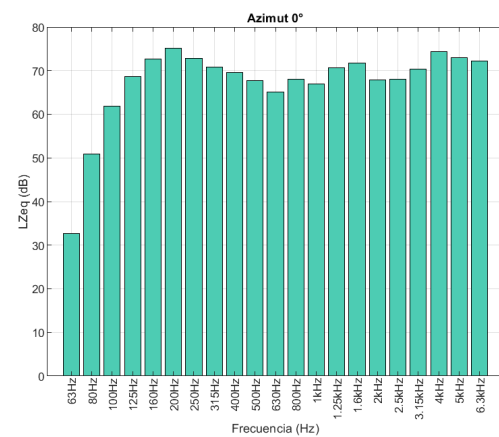


Figura 5: Ejemplo del espectro de presión sonora a 0° .

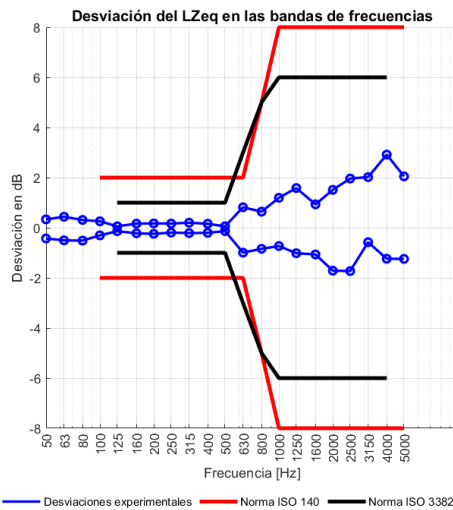


Figura 6: Desviaciones positiva y negativa respecto al nivel promedio comparada con los límites establecidos por las normas *ISO 140* y *ISO 3382*. En el eje horizontal se muestran las frecuencias centrales de cada banda, mientras que el eje vertical representa la desviación respecto a un valor de referencia.

A su vez, se calcularon las desviaciones positiva y negativa respecto al nivel promedio de presión sonora sobre el patrón de radiación. Este análisis permite identificar sectores angulares donde se presentan aumentos o disminuciones significativas del nivel respecto al promedio, lo cual resulta útil para caracterizar la direccionalidad del emisor. En la **Figura 6** se presenta el gráfico resultante, en el cual se somborean las regiones angulares con desviación positiva (mayor que el promedio) y negativa (menor que el promedio). Este resultado fue obtenido a partir del procesamiento numérico desarrollado en *MATLAB*.

En el **Apéndice B**, donde se deja un enlace de acceso a todos los resultados gráficos, así como a los datos crudos y procesamientos correspondientes.

5. Discusión

El gráfico de barras del *LZeQ* muestra una evolución típica de espectro de banda ancha. Se identifica un pico sonoro alrededor de los 160 Hz a 250 Hz, lo que indica que la fuente emite más energía en estas bandas, seguido de una caída y posteriores fluctuaciones en bandas más altas, lo cual refleja las características propias de la fuente. Esta característica influye directamente en la percepción subjetiva del sonido. Aunque el espectro de la fuente evaluada no presenta una distribución perfectamente plana —como lo haría una fuente de ruido blanco ideal— los resultados obtenidos siguen siendo válidos. En la práctica, lograr un espectro perfectamente blanco es difícil debido a limitaciones físicas del transductor, la electrónica de excitación y los efectos del entorno de medición. No obstante, el objetivo principal de las normativas no es estrictamente lograr un espectro plano, sino asegurar que la fuente sea suficientemente omnidireccional y tenga contenido energético suficiente en todas las bandas relevantes.

Para evaluar la propiedad omnidireccional de la fuente se puede observar la evolución del patrón de radiación en la **Figura 5**. Esta imagen muestra un comportamiento progresivamente más direccional conforme aumenta la frecuencia. A bajas frecuencias (por ejemplo, 100 Hz), el patrón es prácticamente circular, lo que implica una distribución de energía uniforme en todos los ángulos (0° – 360°), cumpliendo la premisa de omnidireccionalidad. Sin embargo, al aumentar la frecuencia, el patrón comienza a comprimirse y a presentar lóbulos, revelando zonas de mayor y menor radiación. Este efecto es típico en fuentes físicas reales donde el tamaño del emisor ya no es pequeño comparado con la longitud de onda, lo cual provoca fenómenos de interferencia y directividad. En suma, los resultados experimentales validan un comportamiento suficientemente omnidireccional de la fuente en bajas y medias frecuencias (hasta 800 Hz), pero evidencian limitaciones en la respuesta a frecuencias altas, especialmente por encima de 1 kHz, donde se ve comprometida la uniformidad angular del campo sonoro.

A pesar de lo anterior, es posible evaluar las desviaciones de los patrones. En la **Figura 6**, las desviaciones experimentales (línea azul) se mantienen dentro de ± 1 dB para bandas desde 63 Hz has-

ta aproximadamente 800 Hz, lo cual es un buen indicio de comportamiento omnidireccional. Sin embargo, en frecuencias superiores a 1 kHz se observa una tendencia creciente en la dispersión de las desviaciones, alcanzando valores superiores a +2 dB en bandas cercanas a 5 kHz. Esta variación indica que la fuente comienza a perder características de omnidireccionalidad a frecuencias altas. En contraste, a frecuencias bajas (<100 Hz), las desviaciones también tienden a alejarse de cero, lo cual es consistente con efectos de difracción y limitaciones en el diseño físico del emisor. Respecto a la normativa, se aprecia que en casi todo el rango analizado las desviaciones experimentales se mantienen dentro de los márgenes permitidos por *ISO 3382* e *ISO 140*. Esto sugiere que la fuente puede considerarse aceptable para ensayos con los requisitos más exigentes de precisión establecidos en ambientes de laboratorio.

6. Conclusiones

Se llevó a cabo la caracterización del patrón de radiación de una fuente dodecaédrica omnidireccional desarrollada en el LAV-ICAT, mediante mediciones en cámara anecoica conforme a los lineamientos de las normas ISO 140-3 e ISO 3382-2. Los resultados obtenidos muestran que la fuente presenta una respuesta acústica cercana a la ideal omnidireccional en el intervalo de frecuencias comprendido entre 125 Hz y 4 kHz, manteniéndose dentro de los límites de desviación permitidos. Para frecuencias por debajo de 100 Hz y superiores a 5 kHz, se identificaron desviaciones significativas, atribuibles a limitaciones físicas del sistema de emisión o a fenómenos de difracción y dispersión.

La metodología empleada, basada en rotación angular controlada y registro secuencial con un sonómetro profesional, permitió obtener datos confiables con alta resolución espacial. Las gráficas polares generadas y el análisis del índice de direccionalidad proporcionaron una visión clara de la respuesta de la fuente en cada banda de frecuencia.

Este estudio confirma la viabilidad de la fuente dodecaédrica para su uso en ensayos acústicos normalizados en contextos de laboratorio, arqui-

tectónicos y ambientales, destacando la importancia de una correcta alineación, calibración y tratamiento estadístico de los datos. Futuras caracterizaciones podrían considerar la extensión a planos verticales, patrones de radiación tridimensionales y la incorporación de análisis en campo cercano.

Agradecimientos: Se agradece al M. en I. Antonio Pérez López, al Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz y a Ana Karen Pérez Hernández del *Laboratorio de Acústica y Vibraciones* del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM por su amable atención, enseñanza y accesibilidad para manejar el equipo y realizar el experimento.

Referencias

- Bote, J. L. S., Gonzalez, A. P., & Alfageme, J. J. G. (2012). Procedure for verification of sound source coverage over façades according to the International Standard ISO 140-5. *Applied acoustics*, 73(9), 977-985.
- Boullosa, R. R., & Lopez, A. P. (1999). Some acoustical properties of the anechoic chamber at the Centro de Instrumentos, Universidad Nacional Autonoma de Mexico. *Applied Acoustics*, 56(3), 199-207.
- Canclini, A., Antonacci, F., Tubaro, S., & Sarti, A. (2019). A methodology for the robust estimation of the radiation pattern of acoustic sources. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 28, 211-224.
- International Electrotechnical Commission. (2013). *Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications* [Second edition].
- International Organization for Standardization. (2025). *International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/home.html>
- ISO 140-3:2021 [Acoustics — Laboratory measurement of sound insulation of building elements — Part 3: Measurement of impact sound insulation]. (2021). *International Organization for Standardization*.
- ISO 140-5:1998 [Withdrawn, replaced by ISO 16283-3:2016]. (1998). International Organization for Standardization.

- ISO 3382-2:2008 [Acoustics — Measurement of room acoustic parameters — Part 2: Reverberation time in ordinary rooms]. (2008). *International Organization for Standardization*.
- López, A. P., González, E. P., & Ruiz, S. P. (2006). Fuente sonora omni-direccional. *Revista mexicana de física*, 52(2), 185-189.
- Shinn-Cunningham, B. G., Kopco, N., & Martin, T. J. (2005). Localizing nearby sound sources in a classroom: Binaural room impulse responses. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(5), 3100-3115.
- Sumarac-Pavlovic, D., Mijic, M., & Kurtovic, H. (2008). A simple impulse sound source for measurements in room acoustics. *Applied Acoustics*, 69(4), 378-383.
- Williams, E. G. (1999). *Fourier acoustics: sound radiation and nearfield acoustical holography*. Elsevier.

A. Código de MATLAB

```

1  %-----
2  % Facultad de Ciencias, UNAM
3  % Semestre 2025-2
4  % Introduccion a la Acustica Contemporanea
5  % por: Edgar Munoz Sanchez
6  % -----
7  % PRCTICA 6
8  % -----
9  %Codigo para generar patrones de radiacion, espectros LZeq por cada angulo
10 %de medicion y grafica de desviaciones
11 % OBJETIVO: Obtener el patron de radiacion de una fuente sonora
12 % omnidireccional (FSO).
13
14 clear; close all; clc;
15
16 % Archivo
17 filename = 'Data_29_mayo_2025.csv';
18
19 % Leer encabezados desde la primera fila
20 raw_header = readcell(filename);
21 labels_raw = raw_header(1, 12:29); % A partir de la 11va columna: frecuencias
    50-5k
22
23 % Leer datos reales omitiendo las 2 primeras filas
24 data = readmatrix(filename, 'NumHeaderLines', 2);
25 azimut = deg2rad(data(:,1)); % ACIMUT en radianes
26 distancia = data(:,2); % DISTANCIA
27 presiones = data(:, 12:29); % Columnas LZeq*
28
29 % Calcular rlim comun
30 presion_min = min(presiones(:));
31 presion_max = max(presiones(:));
32 rlim_val = [0, 80];
33
34 % Crear carpeta
35 output_folder = 'polar';
36 if ~exist(output_folder, 'dir')
37     mkdir(output_folder);
38 end
39
40 % Mapa de color (rojo a azul)
41 cmap = flipud(jet(size(presiones,2)));
42
43 % %% Grafica compuesta
44 disp("Graficando polar compuesta...")
45 fig = figure('Visible','off');
46 pax = polaraxes(fig);
47 hold(pax, 'on');
48 for i = 1:size(presiones,2)
49     polarplot(pax, azimut, presiones(:,i), 'Color', cmap(i,:), 'LineWidth',
        1.5);
50 end
51 rlim(pax, rlim_val);
52 title(pax, 'Patrones de radiacion 2D (todas las frecuencias)');
```

```
53 colormap(cmap);
54 cb = colorbar('Ticks', linspace(0,1,6), 'TickLabels', {'100Hz', '200Hz', '400Hz',
    '800Hz', '1.6kHz', '5kHz'});
55 cb.Label.String = 'Frecuencia';
56 cb.Location = 'eastoutside';
57 saveas(fig, fullfile(output_folder, '00_compuesto_polar.png'));
58 close(fig);
59
60 %% Graficas individuales
61 for i = 1:size(presiones,2)
62     disp("Graficando polar...")
63     label_raw = labels_raw{i};
64     label_clean = strrep(label_raw, '_', '.'); % ejemplo: LZeq12.5Hz
65     parts = regexp(label_clean, '(LZeq)\s*([0-9\.kK]+)', 'tokens');
66     if ~isempty(parts)
67         freq_label = parts{1}{2};
68         label_display = sprintf('LZeq - %s', freq_label);
69         filename_label = sprintf('LZeq-%s', freq_label);
70     else
71         label_display = label_clean;
72         filename_label = label_clean;
73     end
74
75     fig_ind = figure('Visible','off');
76     pax_ind = polaraxes(fig_ind);
77     polarplot(pax_ind, azimuth, presiones(:,i), 'LineWidth', 2, 'Color', cmap(i, :));
78     rlim(pax_ind, rlim_val);
79     title(pax_ind, sprintf('Patron de radiacion - %sHz', label_display), 'Interpreter', 'none');
80     filename = sprintf('%02d_%sHz.png', i, filename_label);
81     saveas(fig_ind, fullfile(output_folder, filename));
82     close(fig_ind);
83 end
84
85 %% Crear carpeta para histogramas
86 hist_folder = 'histogram';
87 if ~exist(hist_folder, 'dir')
88     mkdir(hist_folder);
89 end
90
91 %% Extraer solo los valores de frecuencia para etiquetas
92 label_ticks = cell(size(labels_raw));
93 for i = 1:length(labels_raw)
94     str = strrep(labels_raw{i}, '_', '.');
95     tokens = regexp(str, '([d\.]+[kK]?[Hh]?[zZ]?)', 'match');
96     if ~isempty(tokens)
97         label_ticks{i} = tokens{1};
98     else
99         label_ticks{i} = str;
100     end
101 end
102
103 %% Histograma general (promedio por frecuencia)
104 disp("Graficando espectro promedio...")
105 mean_vals = mean(presiones, 1);
```

```

106 fig_hist = figure('Visible','off');
107 bar(mean_vals, 'FaceColor', [0.3 0.8 0.7]);
108 xticks(1:length(label_ticks));
109 xticklabels(label_ticks);
110 xtickangle(90);
111 xlabel('Frecuencia (Hz)');
112 ylabel('LZeq promedio (dB)');
113 title('Promedio de presion por banda de frecuencia');
114 set(gca, 'FontSize', 8); % Etiquetas mas pequenas
115 grid on;
116 ylim([0, 80])
117 saveas(fig_hist, fullfile(hist_folder, 'histograma_promedios.png'));
118 close(fig_hist);
119
120 %% Histogramas individuales por angulo
121 for i = 1:length(azimut)
122     disp("Graficando espectro...")
123     az_deg = round(rad2deg(azimut(i)));
124     fig_ind = figure('Visible','off');
125     bar(presiones(i,:), 'FaceColor', [0.3 0.8 0.7]);
126     xticks(1:length(label_ticks));
127     xticklabels(label_ticks);
128     xtickangle(90);
129     xlabel('Frecuencia (Hz)');
130     ylabel('LZeq (dB)');
131     title(sprintf('Azimut %d', az_deg));
132     set(gca, 'FontSize', 8);
133     grid on;
134     ylim([0, 80])
135
136     filename = sprintf('Azimut_%03ddeg.png', az_deg);
137     saveas(fig_ind, fullfile(hist_folder, filename));
138     close(fig_ind);
139 end
140
141 %% Graficar las desviaciones positivas y negativas
142 clc; clear;
143
144 % Leer archivo
145 filename = 'Data_29_mayo_2025.xlsx';
146
147 % Leer encabezados (frecuencias)
148 raw_labels = readcell(filename);
149
150 % Leer datos numericos
151 data = readmatrix(filename);
152 FS0data = data(2:72, 8:28); % Solo datos de LZeq por frecuencia
153 ef = data(1, 8:28); % Desde la 3ra columna (frecuencias)
154
155 % Supongamos que FS0data contiene 72 filas (angulos de 5) y 21 columnas (
    bandas de 50 a 5000 Hz)
156 % Inicializacion
157 for m = 1:21
158     % Promedio global por banda
159     L360b(m) = mean(FS0data(:, m));
160

```

```

161     % Promedios por arco de 30
162     b = 1;
163     for a = 1:11
164         L30_ib(a,m) = mean(FS0data(b:b+5, m)); % Cada arco abarca 6 datos (6
            x5 = 30 )
165         b = b + 6;
166         % Indice de Direccionalidad
167         IDb(a,m) = L360b(m) - L30_ib(a,m);
168     end
169
170     % Maximos y minimos del ID por banda
171     IDmaxb(m) = max(IDb(:,m));
172     IDminb(m) = min(IDb(:,m));
173
174     % Maximos y minimos por arco para cada banda
175     MaxL30_ib(m) = max(L30_ib(:,m));
176     MinL30_ib(m) = min(L30_ib(:,m));
177 end
178
179 % Desviaciones maximas respecto al promedio global
180 MaxLeqb = MaxL30_ib - L360b;
181 MinLeqb = MinL30_ib - L360b;
182
183 % Promedio general de la banda de 5000 Hz
184 PromZLeqb = mean(FS0data(:,21));
185
186
187 % Limites ISO 140 (18 bandas) y 3382 (16 bandas)
188 lp140 = [ 2  2  2  2  2  2  2  2  2  2  5  8  8  8  8  8  8  8  8];
189 ln140 = -lp140;
190 lp3382 = [ 1  1  1  1  1  1  1  1  3  5  6  6  6  6  6  6  6  6  6];
191 ln3382 = -lp3382;
192
193 figure(1)
194 clf
195 hold on
196
197 % Frecuencias para ISO
198 f140 = ef(4:21);
199 f3382 = ef(5:20);
200
201 % Graficar limites ISO 140 (rojo)
202 h1 = plot(f140, lp140, 'r', 'LineWidth', 3);
203 plot(f140, ln140, 'r', 'LineWidth', 3)
204
205 % Graficar limites ISO 3382 (negro)
206 h2 = plot(f3382, lp3382, 'k', 'LineWidth', 3);
207 plot(f3382, ln3382, 'k', 'LineWidth', 3)
208
209 % Graficar desviaciones experimentales (azul)
210 h3 = plot(ef, IDmaxb(1:21), 'b', 'LineWidth', 2);
211 plot(ef, IDmaxb(1:21), 'bo', 'LineWidth', 2)
212 plot(ef, IDminb(1:21), 'b', 'LineWidth', 2)
213 plot(ef, IDminb(1:21), 'bo', 'LineWidth', 2)
214 plot(ef, IDminb(1:21), 'bo', 'LineWidth', 2)
215 title('Desviacion del LLeq en las bandas de frecuencias',...

```



```
216         'fontsize',12)
217 grid
218
219 % Configurar ejes logaritmicos
220 set(gca, 'XScale', 'log')
221 xticks(ef)
222 xticklabels(string(ef)) % Mostrar etiquetas de frecuencia como texto plano
223 xtickangle(90)
224 xlabel("Frecuencia [Hz]")
225 ylabel("Desviacion en dB")
226 % Agregar leyenda con solo una linea de cada tipo
227 legend([h3, h1, h2], {'Desviaciones experimentales', 'Norma ISO 140', 'Norma
        ISO 3382'}, ...
228         'Location', 'southoutside', 'Orientation', 'horizontal', 'Box', 'off')
229 saveas(figure(1), 'desviaciones.png');
230 close(figure(1));
```

Código 1: Código para obtener espectros, patrones de radiación y desviaciones a partir de un archivo .csv con el acimut y las lecturas LZeq de las distintas bandas de frecuencias. De la misma manera se grafican las desviaciones positiva y negativa por banda comparadas con los límites internacionales

B. Apéndice. Datos crudos y procesamiento

El código de *MATLAB*, sus resultados gráficos y los datos en crudo se pueden encontrar en el siguiente vínculo:

<https://drive.google.com/drive/folders/1c-2hSUA3yYkyr-kl214cDI-rrVuUY55j?usp=sharing>