

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE SONORA OMNIDIRECCIONAL DE BAJO COSTE

Alan Antich Durán, Salvador Luna Ramírez⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, s/n.

Abstract- The design and characterisation of an omnidirectional acoustic source for academic purposes is presented here. A dodecaedric model has been used, following international recommendations. Its need is widely justified for Sound and Image Technical Telecommunication Engineering studies, where acoustic measures and experiments are presented in several subjects. This device becomes a must in any practical acoustic laboratory, and allows complete experiments in a teaching environment. With a low budget, around 300 euros, the dodecaedric source complies with ISO 140-4 standard, which is widely referenced in national and international acoustic environmental laws. ISO standards observance, mainly concerning directivity, allows the use of this device as an omni-directional sound source in real acoustic measuring.

I. INTRODUCCIÓN Y USO DOCENTE

El gran auge que está experimentando en la actualidad el mundo de la ingeniería acústica ha establecido que los distintos tipos de experimentos acústicos llevados a cabo para la caracterización de materiales, o para el estudio de determinados problemas de aislamiento y acondicionamiento, son mucho más fiables si se realizan *in situ* y bajo las mismas condiciones de contorno que tendrían dichas situaciones estudiadas en la práctica real.

La fuente sonora omnidireccional ideal es un modelo físico-teórico que, al experimentar contracciones y dilataciones, genera ondas acústicas que se propagan en todas direcciones con igual energía. Este modelo teórico tiene una cualidad fundamental, y es que produce un campo sonoro difuso en el interior de recintos. El campo difuso consiste en que las propiedades sonoras de un campo acústico no varían en el interior de un recinto. Con este tipo de radiador omnidireccional se consigue, por tanto, que la radiación acústica directa (transmisor-receptor) no sea dominante, sino que se genera un campo sonoro de manera que en cualquier punto de la habitación la probabilidad de que las ondas vengan de una u otra dirección es exactamente la misma. La generación de un campo sonoro difuso en un recinto es propiedad fundamental a la hora de realizar medidas de caracterización acústica de salas. Esto convierte a la fuente omnidireccional en la ideal para la generación de campos sonoros en los recintos donde se van a realizar cualquier tipo de experimento acústico. A la hora de implementar el modelo teórico omnidireccional, existe un diseño físico ampliamente usado: la fuente dodecaédrica, Fig. 1. En este diseño, se colocan 12 altavoces en cada una de las caras de un dodecaedro. Dicha solución de diseño es la más recomendada por las normas internacionales [1].

Dentro de los planes de estudios vigentes en la Universidad de Málaga para la formación de Ingenieros Técnicos en Telecomunicación, especialidad en Sonido e Imagen [2], se encuentran un grupo de asignaturas obligatorias íntimamente

relacionadas con la física acústica. De cara a la calidad docente en estas asignaturas, se considera prioritario aportar también medios dinámicos para que el futuro ingeniero en acústica pueda familiarizarse y profundizar en lo que será su aplicación futura. Es por ello que se considera que la presencia de herramientas como la fuente sonora omnidireccional en los laboratorios de las escuelas universitarias sería muy interesante de cara a la formación de los ingenieros, básicamente por dos razones:

- La familiarización con el instrumental que después usarán en el ámbito profesional.
- La recreación de los procedimientos que implementarán con dichos instrumentos, así como de la normativa aplicable a estos procedimientos de medida.



Fig. 1. Fuente sonora omnidireccional construida.

El uso docente de la fuente en un primer grupo de asignaturas relacionadas con la acústica de salas, con el diseño acústico de recintos y con el estudio de materiales, es directo para realizar experimentos de medida del tiempo de reverberación, el aislamiento de salas y paramentos, o las características de absorción acústica de materiales.

De cara a otro grupo de asignaturas, la fuente dodecaédrica nos proporciona un acercamiento a la normativa aplicable a ensayos acústicos. Este tema se considera de gran importancia, debido a que actualmente la legislación acústica está experimentando un desarrollo impresionante, con la aparición de un gran número de normas, códigos técnicos de edificaciones, etc. en los distintos ámbitos legislativos (europeo, estatal, autonómico y local). Muchas de las normativas determinan las situaciones y condiciones para la realización de ensayos acústicos, y en la mayoría de las medidas es necesario el uso de una fuente sonora omnidireccional.

Actualmente, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación (ETSIT) posee un laboratorio acústico con instrumentación de medida de precisión, así como una cámara acústica anecoica. El diseño y verificación de una fuente

omnidireccional habilitaría al profesorado de dicha escuela a realizar diversos ensayos acústicos ya legislados, de gran interés para el alumno.

En la presente comunicación se detalla el diseño, construcción y caracterización de una fuente acústica omnidireccional con el objetivo del cumplimiento de los requisitos que la normativa [1] aplica a estos dispositivos. En el capítulo segundo se describirá el diseño de dicho dispositivo, tanto en su aspecto mecánico como eléctrico, así como diversos aspectos de la construcción del dispositivo a tener en consideración. El capítulo tercero describe la caracterización de la fuente acústica una vez construida. Por último, se presentan las conclusiones del trabajo.

II. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA FUENTE SONORA

La fuente sonora omnidireccional construida trata de asemejarse lo más posible a un radiador isotrópico esférico de ondas acústicas [3]. La onda esférica radiada por un generador como el anteriormente descrito, en el cual su radio varía con el tiempo, y utilizando coordenadas esféricas y suponiendo simetría radial, tendría como ecuación,

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

mientras que la onda radiada sigue la ecuación

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\alpha t - kr)} \quad (2)$$

La ecuación 2 guarda un gran parecido con la solución de onda acústica plana, con la diferencia de que la amplitud de la onda esférica decae con la distancia, manteniendo la forma de onda. A nivel práctico, es más fácil generar una onda plana que una esférica. Particularmente, los altavoces dinámicos son generadores de ondas acústicas planas, que siguen el modelo del pistón circular plano. Por esta razón, y mediante la unión de muchos altavoces dinámicos que generen ondas planas, se tratará de generar una onda esférica [4]. La forma de la fuente es dodecaédrica no sólo porque la normativa internacional lo recomiende, sino también porque históricamente, tras estudios geométricos, la bibliografía considera al dodecaedro como la estructura más perfecta que existe en cuanto a simetría, siendo referencia en proyectos de arquitectura, ingeniería y ciencia [5].

Los criterios iniciales de diseño de la fuente fueron los enumerados:

- Cumplimiento de condiciones de fuente omnidireccional según normativa [1].
- Potencia acústica suficiente (80 dB SPL) como para la realización de experimentos acústicos en un entorno favorable con bajo ruido ambiental (e.g.: cámara anecoica).
- Transportable y de bajo coste.

Tal como se ha comentado anteriormente, los altavoces usados para el diseño son de tecnología dinámica. Este tipo de transductor tiene limitaciones en cuanto a eficiencia, esto es, una fracción baja de la energía eléctrica que se les suministra es transformada en sonido. Además, su respuesta a medias y altas frecuencias es bastante directiva [6]. Combinando las respuestas direccionales de cada altavoz por separado en cada cara, el conjunto producirá un diagrama de directividad omnidireccional.

El dodecaedro a diseñar se considerará como una caja cerrada con un volumen interno V_B . El modelo que describe el comportamiento de los sistemas caja-altavoz puede representarse como un filtro paso alto de segundo orden, [7], donde la eficiencia se modela según la ecuación

$$\eta = 1.17 \cdot 10^{-4} f_3^3 V_B \quad (3)$$

En esta ecuación, η es la eficiencia del sistema caja-altavoz que relaciona la potencia eléctrica proporcionada al sistema con la potencia acústica radiada. f_3 en la misma ecuación indica la frecuencia de corte inferior. El diseño del volumen del sistema se determinó conciliando por un lado que el dodecaedro fuera lo más pequeño posible con una frecuencia de corte no demasiado alta. Con la ayuda del software de simulación *WinIsd*© se calculó la respuesta en frecuencia del sistema, mostrada en la Fig. 2.

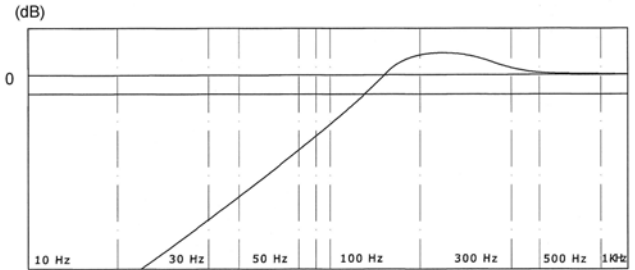


Fig. 2. Respuesta en frecuencia del sistema.

Para dicho cálculo se usaron los parámetros del modelo de altavoz *Visaton FR 104*, por sus características adecuadas con respecto a su alto ancho de banda, comprendiendo toda la banda acústica, y dimensiones, que encajaban con el volumen diseñado para el dodecaedro. La sensibilidad acústica del modelo elegido es de 87 dB y su impedancia nominal de 4 Ω .

Como arista de los pentágonos que conforman el dodecaedro se usó el valor de 10 cm., lo que proporciona un volumen interno de la caja, [8], según la ecuación

$$V = \frac{1}{4} (15 + 7\sqrt{5}) \cdot a^3 = 3.92 \text{ l} \quad (4)$$

donde a es la arista del dodecaedro en metros.

Teniendo ya las dimensiones calculadas, se procede al diseño de las piezas que componen el dodecaedro, es decir, los 12 pentágonos que formarán las caras del altavoz. En el centro geométrico de cada cara se diseñó un orificio perfectamente ajustado a las dimensiones de los altavoces que luego se insertarían en cada cara, Fig. 3.

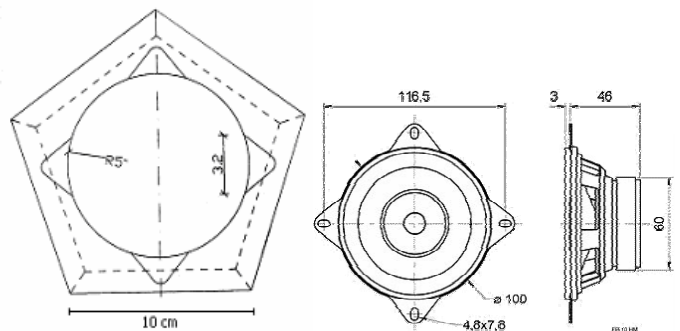


Fig. 3. Dimensiones de la cara del dodecaedro (izq.) y los altavoces usados (dcha.).

Para que la estructura final quedara perfectamente ensamblada y soportara sin problema las vibraciones producidas por los altavoces, se les practicó a cada una de las caras (pentágonos) del dodecaedro un pequeño corte en sus cantos, de forma que el ángulo conseguido en todas las uniones de todas las caras fuera el idóneo para el perfecto ensamblaje del sólido. Para el cálculo de dicho ángulo interno del pentágono se hace el cálculo

$$\sum \alpha = (n-2) \cdot 180^\circ = 540^\circ \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{(n-2)}{n} \cdot 180^\circ = 108^\circ, \quad (6)$$

donde n es el número de lados (5 en este caso) [7]. Una vez calculado el valor de α , el ángulo buscado para cada pieza del dodecaedro será la mitad de su valor. Si el ángulo entre cara y cara del dodecaedro es α , cada cara de dicha unión aportará $\alpha/2$ grados, es decir, 54° . El diseño del perfil de una de las caras, con el corte ya realizado, se puede observar en la Fig. 4.

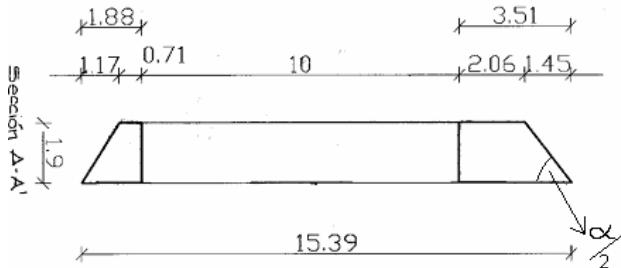


Fig. 4. Corte transversal de una cara del dodecaedro.

Para el diseño del conexionado eléctrico interno del dodecaedro, hubo de tenerse en cuenta las potencias máximas disipables por cada altavoz así como su impedancia nominal, 30W y 4Ω respectivamente, según los datos proporcionados por el fabricante. El conexionado final es el descrito en la Fig. 5, en el que, nominalmente, la impedancia presentada por el conjunto de altavoces es de 5Ω, cercanos a los 4Ω óptimos presentador por el amplificador audio a su salida.

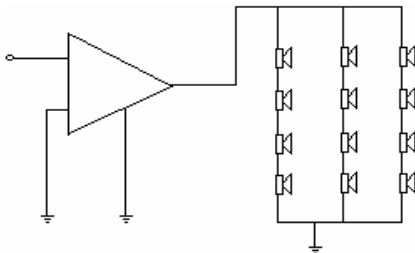


Fig. 5. Esquema del circuito eléctrico.

A. Construcción del dodecaedro

El material elegido para el altavoz fue el DM, muy habitual en la construcción de cajas acústicas por su buen comportamiento acústico, así como mejor mecánica para manejarlo. Esta última característica se hizo especialmente importante debido a la exactitud que se debía tener en el corte de ángulos y posterior unión entre caras, Fig. 6.



Fig. 6. Caras y estructura del dodecaedro ensamblada.

Una vez ensamblado el dodecaedro completo, se realizó una abertura en uno de sus vértices de 3 cm. de diámetro, por el cual se sacaría el cableado que los altavoces usarán para conectarse a la señal salida del amplificador, Fig. 7. Para el soporte del conjunto

completo se realizó un tubo de acero inoxidable de 1.5 m de longitud terminado en una superficie plana que permitiera su perfecto apoyo en el suelo. La forma de apoyar el dodecaedro en la parte superior del tubo-soporte se consiguió mediante unas guías metálicas que se le añadieron al tubo, y que guardan entre sí la relación angular existente en un vértice del dodecaedro, Fig. 7. El peso total del dodecaedro y su soporte alcanza los 5400 grs.



Fig. 7. Perforación para cableado y soporte del dodecaedro.

El presupuesto empleado para la construcción del sistema completo resultó de 315 euros, cumpliendo así el requerimiento de ser un sistema de bajo coste, de los cuales casi la mitad corresponden a los 12 altavoces usados en cada cara del dodecaedro. Un mayor presupuesto se reflejará muy directamente en mejores prestaciones de los conos acústicos.

III. CARACTERIZACIÓN

La caracterización de la fuente sonora omnidireccional se realizó en cámara anecoica, ubicada en la ETSIT. Los dos parámetros fundamentales para la caracterización son los niveles de presión sonora (SPL) alcanzados, así como el patrón de radiación de la fuente o directividad, entendiéndose por tal la variación de la energía radiada por el altavoz en función del ángulo de escucha. Para realizar medidas completas de directividad, se ha de medir el nivel de presión sonora en todos los puntos de una esfera en cuyo centro está el altavoz que se está estudiando. El diámetro de la esfera de medida deberá ser grande en comparación con el altavoz.

Como instrumentación de medida de niveles sonoros se usó el analizador modular *Investigator*, tipo 2260, de *Bruel & Kjaer* con micrófono integrado. Todas las medidas se realizaron en cámara anecoica y con el cableado necesario.

Las medidas de caracterización de la fuente se realizaron para varias frecuencias, en bandas de tercio de octava desde los 100 Hz hasta los 5 kHz [8], pues es en ese rango de frecuencias donde se exigen los requisitos de directividad. El barrido espacial se realizó por cada 5° de giro en el eje vertical (72 medidas). La fuente sonora se colocó en el centro de la cámara, con el micrófono de medición en el plano horizontal de la fuente, dirigiéndolo hacia el centro geométrico de la misma, a una distancia de 1.5m, tal como se indican en la normativa [1].

La Fig. 8 muestra el patrón de radiación medido según las condiciones descritas, y para tres frecuencias significativas: 100 Hz (curva interior en la figura), 630 Hz (curva exterior) y 5 kHz (curva central). Se muestra tan sólo la curva vertical, ya que, por la simetría esférica del dodecaedro, la horizontal es similar.

Como se puede apreciar en dicho diagrama polar, a medida que aumenta la frecuencia, el patrón de radiación de la fuente se desvía del patrón omnidireccional. Esto es, conforme se va aumentando la frecuencia, el reparto de la energía no es uniforme, sino que beneficia a unas direcciones más que a otras; mientras que para las bajas frecuencias, como la curva interior de 100 Hz, el reparto es prácticamente igual para todos los ángulos.

Las normas internacionales especifican un límite máximo para esta desviación con respecto a la respuesta ideal, mediante el cálculo de unos índices de directividad (DI) que deben quedar

dentro de la máscara proporcionada por la norma. Para este procedimiento, se mide la diferencia de niveles entre el valor energético medio a lo largo de la circunferencia de 360° (L_{360}) y los valores medios por cada sector de 30° dentro de dicho circunferencia ($L_{30,i}$). Se obtienen, por tanto, 12 valores medios ($L_{30,1} \dots L_{30,12}$).

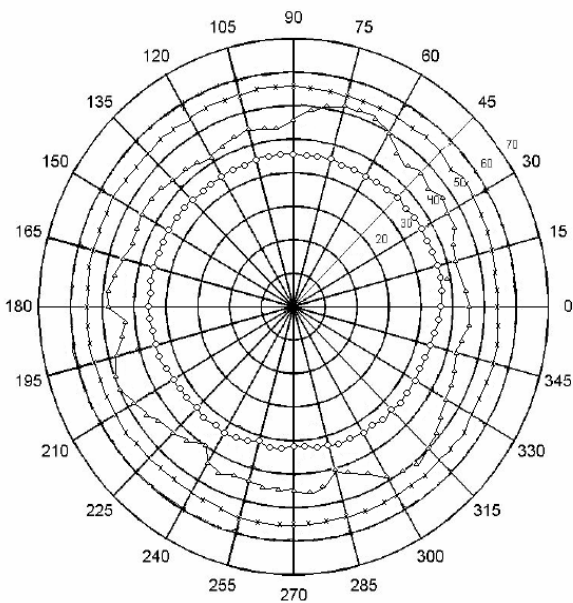


Fig. 8. Patrón de radiación medido.

Matemáticamente,

$$L_{360} = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{SPL_i/10} \right) \quad (7)$$

$$L_{30,i} = 10 \log \left(\frac{1}{6} \sum_{j=6(i-1)+1}^{6(i-1)+6} 10^{SPL_j/10} \right) \quad (8)$$

expresan estos dos conceptos. Finalmente, los DI se calculan restando ambos valores,

$$DI_i = L_{360} - L_{30,i} \quad (9)$$

obteniendo la desviación sobre el valor medio para cada franja de 30°. En último lugar, se escogen los valores máximo y mínimo de entre los 12 índices DI calculados. Estos dos valores se compararán con los requerimientos exigidos a la fuente dodecaédrica en [1].

Realizando este proceso para cada frecuencia monitorizada se construye la Fig. 9. En dicha figura, se superpone a las medidas realizadas la máscara de características a cumplir por parte de la fuente que pretende denominarse como omnidireccional.

Como se observa en la Fig. 9, los requerimientos de directividad son más exigentes en bajas frecuencias, +/- 2 dB hasta los 800 Hz. A partir de ese límite, el requerimiento es algo más flexible, +/- 8 dB. Para el sistema construido, se puede apreciar cómo dichos límites son respetados, aun cuando en algunas frecuencias el valor DI está cerca de sobrepasar dicho límite, como a 125 Hz o 2.5 kHz.

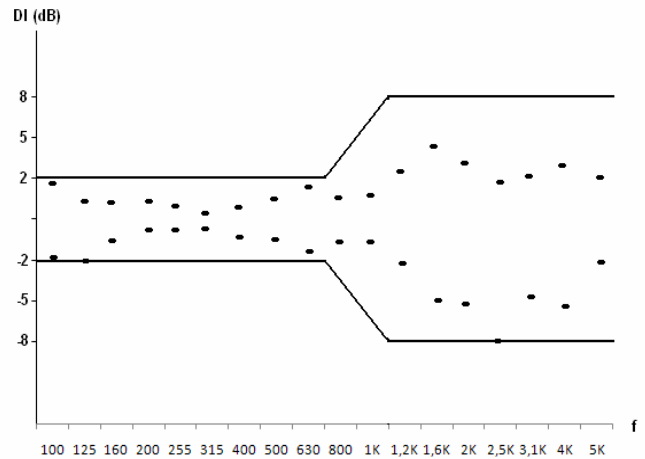


Fig. 9. Índices de directividad medidos

Por lo tanto, y siempre según la normativa [1], el dispositivo construido puede considerarse como fuente omnidireccional para realizar experimentos acústicos.

VI. CONCLUSIONES

Se ha presentado el procedimiento de diseño, construcción y caracterización de una fuente acústica dodecaédrica, orientado al cumplimiento de los requerimientos especificados en [1] para la consideración del sistema como de radiación omnidireccional. El dispositivo construido ha sido realizado con un bajo coste, 315 euros, condicionando especialmente los niveles sonoros que la fuente puede manejar (80 dB de potencia acústica). Esta limitación no se considera especialmente importante pues el uso del dodecaedro se producirá principalmente en entornos de ruido controlado, como una cámara anecoica.

La fuente acústica construida y caracterizada cumple con los requisitos descritos en la normativa internacional en cuanto a límites en la directividad del dispositivo. Este sistema, por tanto, podrá ser utilizado sin ninguna reserva en la docencia de sistemas acústicos para reproducir ensayos y procedimientos de medidas estudiados previamente en las asignaturas teóricas de la Ingeniería Técnica de Telecomunicación, especialidad Sonido e Imagen, de la Universidad de Málaga.

VII. REFERENCIAS

- [1] Norma UNE-EN ISO 140-4:1999. *Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición "in situ" del aislamiento al ruido aéreo entre locales.* (ISO 140-4:1998).
- [2] E.T.S.I. Telecomunicación. Universidad de Málaga, *Programación docente, curso 06-07.*
- [3] Recuero López, M. *Ingeniería Acústica*, Paraninfo, 1999.
- [4] Pérez López, A., Palacios González, A. y Pérez Ruiz, S.J. "Fuente Sonora omni-direccional" *Revista Mexicana de Física*, n.52, pp.185-189, Abril, 2006.
- [5] Granada Castro, G., *El dodecaedro regular y el número ψ* , Departamento de Ingeniería gráfica, Universidad de Sevilla, 2003.
- [6] Ramiro Domínguez, F., *Equipos de sonido*, McGraw Hill, 2004
- [7] Richard H. Small, *Sistemas de altavoces y cajas bass reflex*, Universidad de Sydney, 2006.
- [8] Brusi, J., *Directividad de altavoces*, Das Audio, 2001