

Fuente sonora omni-direccional

A. Pérez López, E. Palacios González y S.J. Pérez Ruiz
*Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LAV),
 Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET),
 Universidad Nacional Autónoma de México,
 Circuito exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F., Del. Coyoacán,
 Tel. 56228602 ext. 1193, Fax. 56228675
 e-mail: apl@aleph.cinstrum.unam.mx, eliapalaciosg@yahoo.com.mx,
 jesper@aleph.cinstrum.unam.mx*

Recibido el 14 de septiembre de 2005; aceptado el 17 de febrero de 2006

Se presenta el diseño, construcción y evaluación de una fuente acústica omni-direccional, desarrollada en nuestro laboratorio para aplicaciones en acústica. Su evaluación muestra que sus características cumplen con los requisitos exigidos en normas internacionales.

Descriptores: Fuente sonora omni-direccional; altavoces en dodecaedro.

The design, construction and evaluation of an omni-directional sound source is presented. It was developed in our laboratory for acoustic applications. The evaluation shows that its characteristics fulfill the requirements demanded by international standards.

Keywords: Sound source; dodecahedron loudspeakers.

PACS: 43.50.Y; 43.55.R; 43.88.J

1. Introducción

Las investigaciones en acústica arquitectónica han establecido que la evaluación de los materiales acústicos, para emplearse en el acondicionamiento acústico de recintos, es más confiable si se realiza en condiciones de medición que se asemejen a las que tendrán en su aplicación definitiva que otros procedimientos alternativos. Por esta razón se privilegia la evaluación en recintos especializados (cámaras reverberantes, anecoica, de transmisión, etc.) [1,2] o bien *in situ* [3,4]. Así mismo, la investigación en pruebas psico-acústicas de la percepción del espacio sonoro, ha logrado establecer una correlación entre diversos juicios subjetivos (calidez, intimidad, etc.) con índices físicos (tiempo de decaimiento temprano, fracción de energía lateral temprana, coeficiente de correlación cruzada inter-aural, etc.) obtenidos a partir de la respuesta al impulso del recinto [5,6]. El común denominador en estas tareas de evaluación es la exigencia de instrumentos y equipos de medición especializados tales como: sistemas de adquisición de señales digitales, maniqués antropométricos y fuentes sonoras omni-direccionales.

Una fuente sonora omni-direccional (FSO) es un dispositivo que radia sonido en todas direcciones, en una gama amplia de frecuencias. Por lo costoso que resulta medir la potencia acústica que generan las fuentes, resulta más conveniente determinar el nivel de presión sonora (NPS) que producen a cierta distancia. Para mediciones *in situ*, este nivel debe de estar por arriba del ruido de fondo en por lo menos 40 dB. La tecnología actual sólo ofrece la posibilidad de utilizar altavoces con imán permanente (transductores electrodinámicos) [7]. Estos transductores, además de tener limitaciones serias en su eficiencia (sólo el 10 % de la energía eléctrica suministrada la convierten en sonido), están diseñados para funcionar como un pistón circular plano, que al operar en fre-

cuencias por arriba de 1000 Hz, tienen un patrón de radiación directivo [8]. Para lograr una FSO es necesario combinar cuidadosamente varios altavoces, para que la sinergia de todos supere las limitaciones de uno en particular. Para esto es necesario un diseño basado en un profundo conocimiento del funcionamiento de este tipo de altavoces en cajas cerradas. En nuestra propuesta de diseño, incorporamos la parte electrónica como componente compensador, en particular mediante amplificación para cada altavoz. Con esto logramos superar la limitante de baja eficiencia y obtenemos mayor flexibilidad para ajustar el nivel de presión requerido, sin sacrificar la omni-direccionalidad.

Consideremos una onda esférica generada por una esfera pulsante; es decir, una esfera cuyo radio varía en función del tiempo. Para analizar la radiación de este tipo de onda, expresemos la ecuación de onda en coordenadas esféricas (consideremos simetría radial) [9]:

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

La onda acústica radiada por esta esfera pulsante tiene la siguiente forma:

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

Esta solución es similar, excepto por el factor de $1/r$, a la ecuación para ondas planas. Esto significa que la onda al propagarse no cambia de forma, aunque sí de amplitud. En este caso la velocidad radial del fluido se expresa como [9]

$$v_r = \frac{A}{r\rho c} \left(1 + \frac{i\lambda}{2\pi r} \right), \quad (3)$$

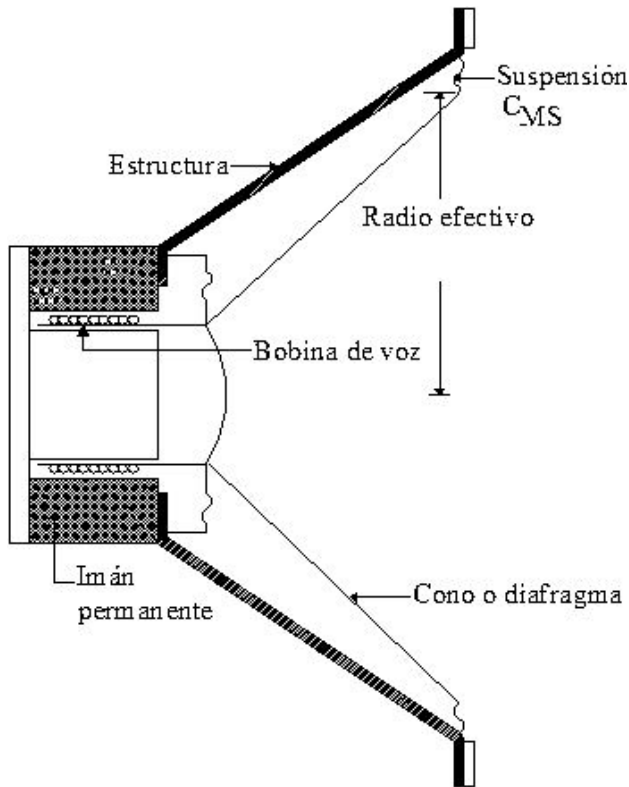


FIGURA 1. Esquema de un altavoz electrodinámico.

y la intensidad, también radial es

$$I_r = \rho c \left(\frac{1}{2\lambda r} \right)^2 A^2. \tag{4}$$

Finalmente, la potencia total radiada es

$$W = (4\pi r^2) I_r = \frac{\rho \omega^2}{4\pi c} |A|^2. \tag{5}$$

Para grandes distancias, donde $r \gg \lambda$, denominado campo lejano, la velocidad de partícula está en fase con la presión, así que toda la densidad de energía es radiante y se propaga con la velocidad c . En este caso, las Ecs. (3), (4) y (5) son las mismas que para una onda plana (con una amplitud A/r).

Por el contrario, para distancias en la región $r \ll \lambda$, hay un componente de la velocidad de partícula que está fuera de fase con la presión, esto hace que exista una densidad de energía reactiva que no se radia. Éste es el campo cercano.

En la práctica es más fácil generar una onda plana que una onda esférica. De hecho los altavoces, la fuente sonora más usual, equivalen a un pistón circular (ver Fig. 1). Una alternativa para construir una fuente esférica (omni-direccional) es recurrir a varios altavoces, colocados en las caras de un poliedro que se aproxime a una esfera.

El altavoz electrodinámico es el dispositivo más común para convertir energía eléctrica en ondas acústicas. Éste utiliza las fuerzas desarrolladas por la interacción de campos magnéticos. Dicha interacción se lleva a cabo en el entrehierro del altavoz y se debe al paso de una corriente eléctrica

por la bobina y al campo de un imán permanente, dentro del cual se encuentra la bobina. La bobina tiene libertad de movimiento y se conecta mecánicamente al cono o diafragma (ver Fig. 1).

Los parámetros electro-mecánicos fundamentales de este tipo de altavoz son los siguientes: Masa móvil total M_{MS} , compliancia de la suspensión C_{MS} , producto Bl (densidad de flujo magnético por longitud del alambre que forma la bobina), factor de amortiguamiento electromagnético R_{ME} , resistencia eléctrica de la bobina R_E , área efectiva del diafragma o cono S_D y desplazamiento máximo del diafragma X_{max} .

2. Diseño

La esfera pulsante se aproxima por un dodecaedro con 12 altavoces. Estos altavoces se disponen en cada una de las caras del dodecaedro; para fines de diseño, el sistema a considerar es el de un altavoz con una caja cerrada de volumen interno V_B (en m^3). El modelo para diseñar este sistema puede resumirse en la ecuación de eficiencia del sistema η (porcentaje de potencia acústica obtenido a partir de la potencia eléctrica suministrada), dada por [10,11,12]

$$\eta = 1.17 \times 10^{-4} f_3^3 V_B. \tag{6}$$

El modelo que describe esta ecuación considera que el sistema caja-altavoz puede representarse por un filtro pasa alto de segundo orden, donde f_3 representa la frecuencia de corte, por debajo de la cual la respuesta decae a una tasa de 12 decibels/octava. En frecuencias tales que $f \gg f_3$, la eficiencia η no depende de la frecuencia, por lo que se le denomina de referencia en la zona pasa banda.

Como puede observarse de la Ec. (6), extender la respuesta en frecuencias muy bajas implicaría aumentar excesivamente el volumen de la fuente, si se desea mantener la misma eficiencia. Como ya se mencionó, los sistemas electroacústicos basados en altavoces electrodinámicos son poco eficientes, sin embargo, dado que utilizamos 12 altavoces para construir la FSO, se decidió que la eficiencia no fuera un factor de mucho peso en el diseño acústico de la misma. El volumen de la caja se determinó conciliando, por un lado, el requisito de elegir las caras del dodecaedro casi igual que el área S_D del diafragma del altavoz (el excedente de área es para alojar la suspensión y el bastidor del diafragma), y por el otro, evitar subir el valor de la frecuencia f_3 , que define la frecuencia menor de operación de la FSO. La relación entre los parámetros del altavoz y la Ec. (6) se detallan en las siguientes ecuaciones:

$$M_{MS} = 1.17 \times 10^{-4} \frac{\rho_0 c^2}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{k_3^2 \alpha} \cdot \frac{S_D^2 f_3}{\eta_0}, \tag{7}$$

$$C_{MS} = \frac{1}{1.17 \times 10^{-4}} \cdot \frac{\alpha}{\rho_0 c^2} \cdot \frac{\eta_0}{S_D^2 f_3^3}, \tag{8}$$

$$Bl = \sqrt{\frac{\rho_0 c^2}{2\pi} \cdot \frac{1.17 \times 10^{-4}}{k_3 \alpha Q_{ES}}} \cdot \sqrt{\frac{R_E}{\eta_0}} \cdot S_D f_3, \quad (9)$$

$$R_{ME} = \frac{\rho_0 c^2}{2\pi} \cdot \frac{1.17 \times 10^{-4}}{k_3 \alpha Q_{ES}} \cdot \frac{S_D^2 f_3^2}{\eta_0}, \quad (10)$$

donde

$$\begin{aligned} \rho_0, & \text{ densidad del aire} = 1.21 \text{ kg/m}^3 \\ c, & \text{ velocidad del sonido} = 345 \text{ m/s.} \end{aligned}$$

Además, los valores de α , k_3 y Q_{ES} , para que el filtro que representa al sistema caja-altavoz sea tipo Butterworth (sin rizo), zona plana y con eficiencia constante [10], son

$$\begin{aligned} \alpha, & \text{ relación de compliancias} = 5, \\ k_3, & \text{ relación de frecuencia} = 0.433, \\ Q_{ES}, & \text{ factor de calidad del altavoz} = 0.334. \end{aligned}$$

Resolviendo el conjunto de Ecs. de (7) a (10), para estos últimos valores junto con el valor de S_D , tendremos los parámetros del altavoz que son necesarios para nuestro diseño.

Como en el mercado no siempre se consiguen altavoces con estos parámetros, es necesario hacer ajustes para lograr un diseño óptimo. Esta última tarea exige un proceso interactivo de cálculo que se instrumentó mediante una computadora con un programa desarrollado especialmente para ello.

Otro requisito para el diseño de la FSO, es que la excitación eléctrica de los 12 altavoces deberá estar en fase. Esto es difícil de lograr debido a que la impedancia eléctrica de cada altavoz no sólo incluye el efecto de la resistencia (R_E) y la inductancia de la bobina (L_E), sino también el efecto de la impedancia de movilidad, que surge al considerar que se cambian las relaciones entre voltaje y corriente, debido a la corriente que se induce en el conductor de la bobina al moverse ésta en el campo magnético del imán. Por esta razón, se evitó utilizar una combinación de conexiones en serie y paralelo y se optó por utilizar 12 amplificadores, uno para cada altavoz. De esta forma, además de asegurar que la fase de los altavoces sea igual, se aísla su impedancia y se acopla mejor la carga, que representa cada altavoz, a la respuesta de salida de cada amplificador. Además, con esto se subsana la limitante de tener una eficiencia baja, ya que podremos aumentar la potencia de los amplificadores, para lograr el nivel de presión necesario.

3. Construcción

Para la construcción del dodecaedro se maquinaron 12 pentágonos regulares de 9.0 cm por lado, con los cantos biselados a 57.5° , para facilitar las uniones, y con un orificio de 8.0 cm al centro para colocar el altavoz. El diámetro de la esfera en la cual está inscrito el dodecaedro, es de 25.5 cm y su peso es de 859.6 g sin altavoces y de 5417.2 g con altavoces. El volumen interior neto del dodecaedro, omitiendo el

ocupado por el cableado y el imán de los altavoces, es de 2 litros, aproximadamente. También, se le hizo una perforación en una de sus esquinas para que el cable de conexión pudiera salir. El material que se utilizó en su elaboración (por su dureza y densidad) fue madera de caoba de 19 mm de espesor, silicón como pegamento y barniz transparente como protección y para darle una mejor apariencia.

Los altavoces, marca THUMP, modelo T8351, son de respuesta en frecuencia extendida (full-range) de 8.9 cm (3.5 pulgadas) de diámetro, 4Ω de impedancia nominal, con una capacidad de manejo de potencia de 50 W, sensibilidad de 87 dB y una respuesta en frecuencia de 120 Hz a 16 kHz.

El V_{AS} obtenido del promedio de la medición de los 12 altavoces fue de 0.37 litros (volumen equivalente a la compliancia de la suspensión C_{MS}). Por lo tanto, la compliancia del volumen interior del dodecaedro permitirá un funcionamiento adecuado de los altavoces.

Los amplificadores de potencia se diseñaron y construyeron utilizando el circuito integrado LM1876, de National Semiconductors, el cual contiene en un mismo encapsulado dos amplificadores, que se configuraron para entregar una potencia máxima de 15 W c/u en un intervalo de frecuencias de 20 Hz a 20 kHz. La ganancia de cada amplificador se ajustó para que cada altavoz emita el mismo NPS en el intervalo de frecuencias de interés. En la Fig. 2, se muestra la FSO desarrollada con la apariencia que tiene actualmente, incluyendo el soporte de sostén.



FIGURA 2. Fuente Sonora Omni-direccional (FSO) completa con su soporte para tripié.

4. Caracterización

La caracterización de la FSO se realizó en la cámara anecoica del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET-UNAM. Se midió el patrón de radiación y se determinó la variación de la desviación direccional; el procedimiento de medición se ajustó a las recomendaciones especificadas en normas internacionales [1,2].

El equipo de medición utilizado en las mediciones fue el siguiente:

- Analizador de frecuencias en tiempo real, Brüel & Kjær tipo 2133
- Micrófono de medición de 1/2", Brüel & Kjær Tipo 4166
- Calibrador, Brüel & Kjær Tipo 4230

La caracterización de la FSO se realizó midiendo el NPS en bandas de 1/3 de octava, desde la banda de 100 Hz hasta la de 5 kHz, por cada giro de 5° de la fuente en su eje vertical, en los 360°, utilizando ruido rosa (igual energía en cada banda por tercio de octava) como señal de excitación. La fuente se colocó en el centro de la cámara anecoica; el micrófono de medición se colocó sobre el plano horizontal de la fuente, dirigiéndolo hacia el centro geométrico de la misma, a una distancia de 1.5 m, como lo indican las normas. Los espectros se almacenaron en disco magnético de 3 1/2", para posteriormente procesar la información obtenida en una computadora personal utilizando MATLAB [13].

En la Fig. 3 se muestra un ejemplo del espectro obtenido en una de las posiciones de medición. Cada espectro muestra, además el NPS en las 18 bandas de 100 a 5 000 Hz, el NPS total con ponderación (A) y sin ponderación (L). En la Fig. 4, se muestra el patrón de radiación de la FSO en las frecuencias límite de funcionamiento, la más baja en 100 Hz y la más alta en 5000 Hz. Como se esperaba, el padrón tiende a ser omni-direccional en frecuencias bajas, como el trazo para la frecuencia de 100 Hz de la Fig. 4.

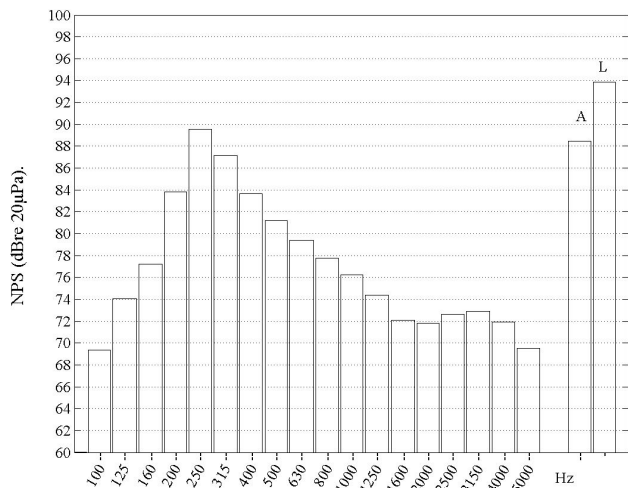


FIGURA 3. Ejemplo de espectro medido en alguna posición, se muestran los niveles de las 18 bandas entre 100 Hz y 5 000 Hz y el nivel de presión sonora sin ponderación (L) y con ponderación (A).

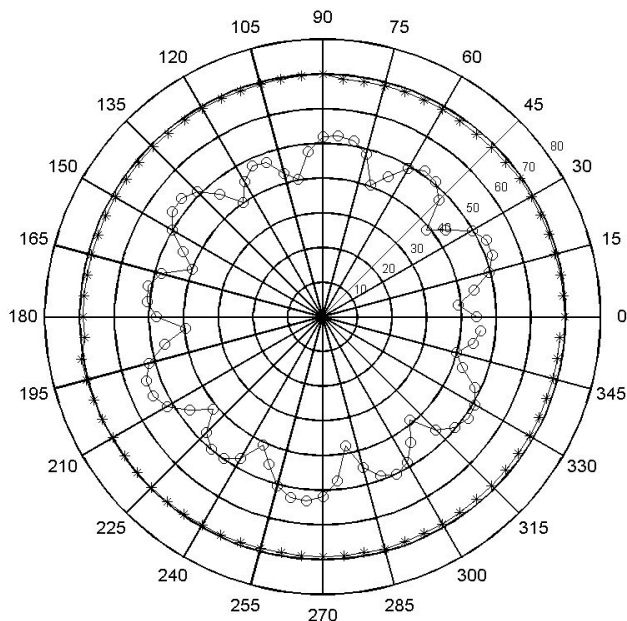


FIGURA 4. Patrón de radiación de la FSO en las bandas de 100 (*) y 5000 (o)Hz.

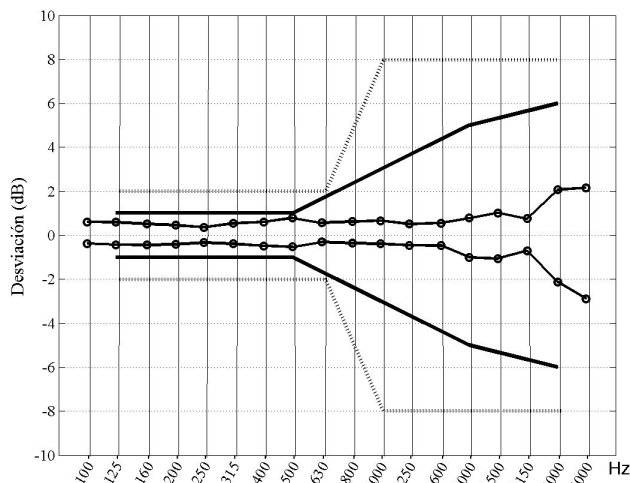


FIGURA 5. Desviación del patrón omni-direccional en función de la frecuencia (o); la línea punteada muestra el límite máximo permitido por la norma ISO 140-3; la línea continua muestra el límite máximo permitido por la norma ISO 3382.

A medida que se aumenta la frecuencia el patrón de radiación de la FSO se desvía del patrón omni-direccional. Las normas especifican un límite máximo permitido para esta desviación. Por esta razón, con los datos medidos se calculó la desviación del patrón omni-direccional. Los resultados obtenidos se presentan en las gráficas de la Fig. 5, donde se muestra la desviación de la fuente junto con los límites máximos que permite tanto la norma ISO-140 como la norma ISO-3382.

5. Discusión

Como se puede observar en las gráficas de la Fig. 5, la evaluación muestra un resultado satisfactorio, ya que indica que la fuente no rebasa las condiciones de desviaciones máximas que establecen las normas, incluso en los límites establecidos en la norma ISO-3382, que es más exigente.

Aunque el NPS total (L) es relativamente bajo (94 dB), comparado con el que ofrecen las fuentes comerciales (120 dB) [14,15], es suficiente para efectuar las mediciones de absorción, potencia y aislamiento en condiciones de laboratorio, donde el ruido de fondo es muy bajo y en consecuencia se cubre, holgadamente, la gama dinámica exigida. Sin embargo, la estrategia de diseño que se instrumentó, permite elevar el NPS, modificando los componentes electrónicos sin alterar el resto del diseño; actualmente se está trabajando en esa dirección, rediseñando la etapa de amplificación, en cuanto a su ganancia y fuente de alimentación.

Por otro lado, examinando la forma de los espectros individualmente, se observa una configuración en la que, en algunas bandas de frecuencia, el NPS es ligeramente bajo con respecto al que se consigna en los equipos comerciales. Esto se puede corregir mediante ecualización electrónica. Esta alternativa es muy sencilla de instrumentar en nuestro diseño con circuitos de amplificación individuales, ya que es fácil insertar filtros electrónicos de ecualización, sin alterar en absoluto el desempeño del resto del sistema. Actualmente trabajamos en esta dirección.

6. Conclusiones

En este trabajo se presentó el desarrollo de un prototipo de FSO, tipo dodecaedro de dimensiones pequeñas y de bajo costo en su construcción (aproximadamente a un 25 % del costo de los equipos comerciales).

Nuestra evaluación muestra, que la FSO tiene un desempeño muy aceptable al cumplir con los requisitos que exigen las normas internacionales, para mediciones en condiciones de laboratorio. Aunque este fue nuestro objetivo, pensamos que nuestro diseño de FSO puede emplearse en otras condiciones menos controladas modificando ligeramente el diseño.

Consideramos, que podemos lograr un diseño de FSO que pueda emplearse incluso en exteriores (donde el ruido de fondo es bastante alto), simplemente modificando la parte de amplificación y de ecualización en frecuencia. Actualmente estamos trabajando en esta tarea y evaluando si es conveniente ofrecer un sólo modelo o tener uno para laboratorio y otro para trabajar en exteriores.

-
1. ISO 140-3: Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements. Part 3: Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements. Second edition, 1995-05-15.
 2. ISO 3382: Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Second edition, 1997-06-15.
 3. Takahashi Yasuo, Otsure Toru y Tomiku Reiji, *Acoust. Sci. & Tech. Vol. 24* (2003) 382.
 4. M. Garai, *Applied Acoust. 39* (1993) 119.
 5. Ando, Yoichi, Beyer, R. *Architectural Acoustics: Blending Sound Sources, Sound Fields, and Listeners*. AIP Press (1998).
 6. R. Mason, T. Brookes y F. Rumsey, *Acoustical Science & Tech. Vol. 26* (2005) 102.
 7. C. Busbridge, P.A. Fryer y Y. Huang, “Digital Loudspeaker Technology: Current State and Future Developments”, Audio Eng Soc. 112th Convention (May 2002).
 8. M. Colloms, *High Performance Loudspeakers*, 5th edition (John Wiley & Sons, 1997).
 9. P.M. Morse y U.K. Ingard, *Theoretical Acoustics* (Princeton University Press, 1968).
 10. Loudspeakers Vol. I “An anthology of articles on Loudspeakers of the Audio Engineering Society 1953-1977. Audio Engineering Society (1978).
 11. Loudspeakers Vol. II “An anthology of articles on Loudspeakers of the Audio Engineering Society 1978-1983. Audio Engineering Society (1985).
 12. C. Zuccatti, *J. Audio Eng. Soc. 53* (2005) 307.
 13. MATLAB marca registrada de MathWorks, Inc. South Natick, MA, USA
 14. Brüel & Kjær, *OmniPowerTM Sound Source, type 4296, including Power Amplifier- type 2716*. Product datasheet.
 15. Norsonic, *Dodecahedron Loudspeaker - model Nor-270*. Product datasheet.