
XV Congreso Argentino de Acústica, AdAA 2017

Bahía Blanca, 23 y 24 de noviembre de 2017

AdAA2017-09

Acústica de salas: campo sonoro difuso y las fórmulas más simples

Ernesto Accolti,
Fernando di Sciascio.

Instituto de Automática, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de San Juan, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Avda. San Martín 1109 oeste, San Juan, Argentina. E-mail: eaccolti@inaut.unsj.edu.ar

Abstract

The simplest room acoustics formulas are valid in a diffuse sound field. How is a diffuse sound field defined? Which is the scope of these formulas? These questions are analyzed through more general theories, in turn explained with figures instead of formulas with the intention to approach quickly to the concepts. The scope of the diffuse field model is analyzed and simple tools are presented to address the cases in which it would not be adequate assuming diffuse field. The wave theory model and the ray model are presented in a simple format with visual support and a succinct reference to the underlying mathematical models. A discussion about the current criteria to define a diffuse sound field in the frequency domain as well as in the time domain is proposed.

Resumen

Las fórmulas más simples de acústica de salas son válidas en campo sonoro difuso. ¿Cómo se define un campo sonoro difuso? ¿En qué medida son válidas esas fórmulas? Se analizan estas preguntas a través de teorías más generales, a su vez explicadas con figuras en lugar de fórmulas con la intención de acercarse rápidamente a los conceptos. Se analiza el alcance de los modelos de campo difuso y se presentan herramientas simples para abordar los casos en los cuales no sería correcto asumir campo difuso. El modelo de ondas y el modelo de rayos se presentan en un formato simple con soporte visual y una sucinta referencia a los modelos matemáticos subyacentes. Se plantea una discusión sobre los criterios vigentes para definir un campo sonoro difuso en el dominio de la frecuencia así como en el dominio temporal.

1 Introducción

Un campo sonoro difuso es una idealización de un campo sonoro en el cuál todas las direcciones de propagación son igualmente probables. Esta condición nunca se logra totalmente en salas reales, pero bajo ciertos criterios se puede suponer un campo difuso.

En la figura 1a se muestra una representación del concepto mediante un esquema de las posibles direcciones de propagación en la columna izquierda y cómo esa energía se distribuye en el tiempo en la columna derecha. La figura 1b muestra lo propio para un caso más realista, en el cuál la energía sonora puede llegar desde varias direcciones pero no necesariamente en el mismo instante.

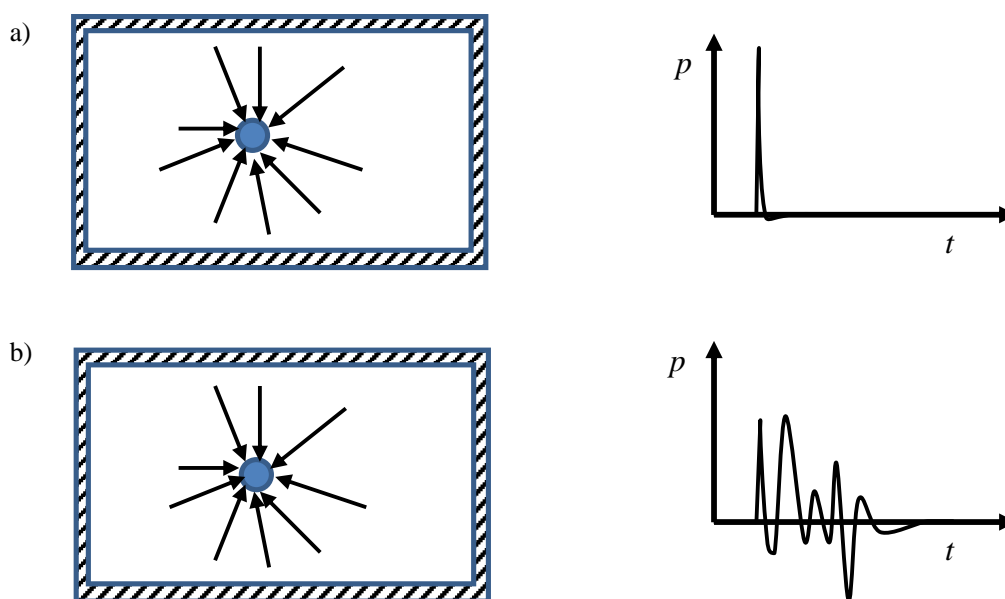


Figura 1. Representación esquemática de un campo acústicamente difuso a) ideal y b) real.

Cuando se asume campo difuso en la teoría ondulatoria o la de rayos, es posible describir propiedades acústicas importantes de las salas mediante fórmulas simples (Kuttruff, 2004). Un ejemplo es la fórmula del tiempo de reverberación T que obtuvo empíricamente Sabine (1922), esto es

$$T = 0,161 \frac{V}{A}, \quad (1)$$

donde V es el volumen total de la sala y A la absorción sonora total dentro de la sala.

Otro ejemplo es la fórmula para estimar el nivel de presión sonora L_p dentro de una sala con coeficiente de absorción sonora promedio $\bar{\alpha}$ a una distancia r de una fuente sonora de nivel de potencia sonora L_W y factor de directividad Q en la dirección del sonido directo

$$L_p = L_W + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + 4 \frac{1-\bar{\alpha}}{A} \right). \quad (2)$$

2 Teoría Ondulatoria

La teoría ondulatoria en acústica, como una rama de la física, se basa en ecuaciones derivadas de un diagrama de fuerzas y consideraciones de continuidad de masa en un volumen infinitesimal. Una tercera ecuación que interviene es la relación de la presión sonora

con las variaciones de la densidad del medio como un proceso adiabático. Esta relación puede asumirse como una relación lineal para una amplia gama de aplicaciones de acústica de salas. Considerando una fuente de sonido puntual, estas ecuaciones dan lugar a la ecuación de Helmholtz no homogénea.

La ecuación de Helmholtz no homogénea para una fuente puntual de velocidad volumétrica Q , es la ecuación:

$$\nabla^2 p + k^2 p = -j\omega\rho Q, \quad (3)$$

bajo las condiciones de borde

$$\zeta \frac{\partial p}{\partial n} + jkp = 0, \quad (4)$$

donde k es el número de onda, ω es la frecuencia angular, ρ es la densidad del aire, $\partial p/\partial n$ es el gradiente de presión sonora en la dirección n y ζ es la impedancia acústica específica.

La solución a este tipo de ecuaciones se puede escribir como una combinación lineal de las soluciones para la ecuación de onda homogénea. La ecuación de onda homogénea se obtiene reemplazando por cero el lado derecho de la ecuación (3). Esas soluciones se conocen como los modos normales de vibración de una sala. En la figura 2 se muestran los modos axiales y tangenciales para una sala de una geometría simple. Los modos axiales se propagan paralelos a un par de superficies, los tangenciales a dos pares y existen también los oblicuos que se propagan paralelos a tres pares de superficies.

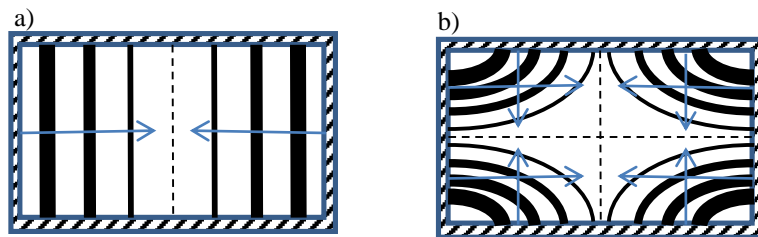


Figura 2. Modos normales de vibración de una sala con forma de paralelepípedo rectangular. Superficies de igual energía sonora, el espesor de las curvas indica la energía de cada superficie. a) Modo axial. b) Modo tangencial.

En la figura 2a se puede observar que el modo axial se puede descomponer en dos frentes de onda plana que se propagan en direcciones opuestas. En el caso del modo tangencial es posible descomponer en cuatro frentes de onda plana según se observa en la figura 2b. En el caso de modos oblicuos se puede descomponer en ocho frentes de onda plana. Esto además se puede demostrar matemáticamente y extender conclusiones similares para salas con otras formas (Kuttruff, 2004).

En las frecuencias correspondientes a los modos normales, las direcciones de propagación están bien definidas por la física del problema. Es decir, a dichas frecuencias no sería correcto asumir que todas las direcciones de propagación son igualmente probables y por lo tanto tampoco se podría considerar un campo sonoro difuso.

3 Teoría de Rayos

La teoría de rayos acústicos, heredada de la teoría de rayos en óptica permite modelar la respuesta de una sala mediante distintas técnicas como el trazado de rayos o la representación

de fuentes imágenes. Mediante la representación de fuentes imágenes es posible contar la cantidad de reflexiones promedio por unidad de tiempo.

En la figura 3 se muestra un esquema del método de las fuentes imágenes sobre una representación de planta de una sala.

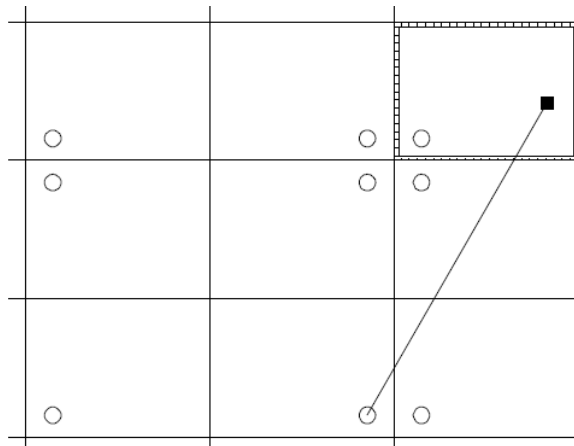


Figura 3. Fuentes sonoras imagen de una sala de forma paralelepípedo rectangular. Círculo: fuente real e imágenes. Cuadrado negro: receptor. (Accolti y Miyara, 2009).

Expresando matemáticamente esta definición de las fuentes imágenes es posible demostrar que la cantidad de reflexiones por unidad de tiempo aumenta proporcionalmente al cuadrado del tiempo transcurrido desde el arribo del sonido directo. En la figura 4 se muestra un modelo de la respuesta al impulso de una sala y en Accolti et al., 2017 se puede observar una respuesta al impulso medida para una sala de conciertos. Tanto en el modelo cómo en la medición real es posible observar el crecimiento con el tiempo de la cantidad de reflexiones en la respuesta al impulso.

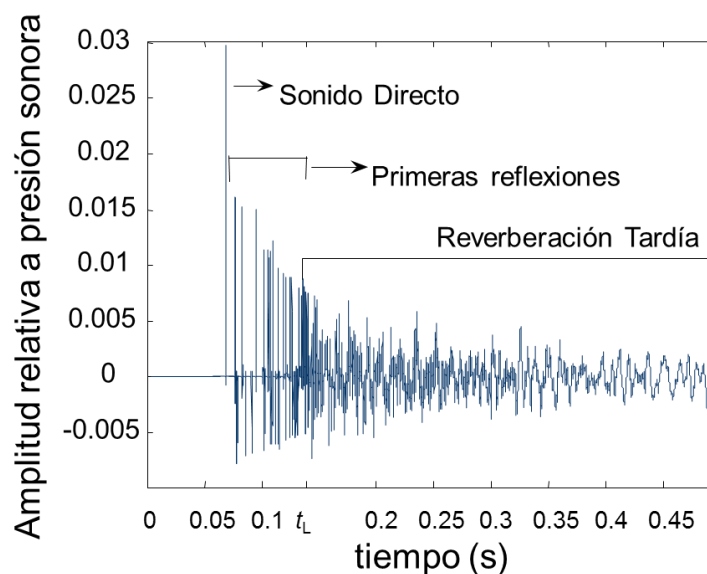


Figura 4. Respuesta al impulso de una sala generado sintéticamente (Accolti y Miyara, 2009).

Es evidente que para el sonido directo la dirección de propagación es solo una (la dirección del camino más corto entre el emisor y el receptor). Observando la Figura 3 se puede advertir que para cada reflexión solo habrá una dirección de propagación, llamada la dirección especular. En las reflexiones reales se debe aclarar que una parte de la energía sonora llegará desde otros ángulos también pero retardadas respecto a la reflexión especular ya que los caminos de propagación serán más largos. La parte de energía que llega desde otros ángulos será mayor cuanto más difusora sea la superficie. De allí que el campo sonoro será más difuso en cuanto más difusoras sean las superficies interiores de la sala.

En los instantes correspondientes a una reflexión aislada, las direcciones de propagación están bien definidas por la física del problema. Es decir, en dichos instantes no sería correcto asumir que todas las direcciones de propagación son igualmente probables y por lo tanto tampoco se podría considerar un campo sonoro difuso sin alguna otra condición.

4 Criterios para aceptar un campo sonoro difuso

Uno de los criterios más conocidos en referencia a los modos normales es el criterio de Schroeder (Kuttruff, 2004). Este criterio parte por identificar aquella frecuencia para la cuál en el ancho de banda de la resonancia de un modo hay tres o más modos. La idea subyacente es que sobre esa frecuencia el efecto de las resonancias no es perceptible, independientemente de que se pueda calcular o medir. Partiendo del modelo ondulatorio es posible demostrar que el criterio de Schroeder se cumple sobre la frecuencia

$$f = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}, \quad (5)$$

Hidaka et al. (2007) propone un criterio que es útil para definir a partir de qué instante se puede asumir campo sonoro difuso en salas de concierto, de cámara y de ópera. Mediante una evaluación perceptiva empírica logro determinar que la respuesta al impulso se puede modelar usando un ruido de fase aleatoria, lo cuál puede ser entendido cómo el resultado de un campo sonoro difuso, una vez transcurrido el 8% del tiempo de reverberación. Entonces la parte tardía se puede modelar con un ruido y las primeras reflexiones mediante un modelo de rayos hasta el tiempo

$$t = 0,08 \times T. \quad (5)$$

5 Discusión

Mediante la ecuación (1) se obtiene el tiempo de reverberación general para una sala. Este no depende de la posición de la fuente ni del receptor. Por el contrario si se mide en la realidad o se estima el tiempo de reverberación mediante un modelo de rayos o en un modelo ondulatorio es posible observar diferencias según la posición de la fuente y el receptor. Incluso manteniendo la distancia r fija entre la fuente sonora y el receptor la fórmula de la ecuación (2) daría siempre el mismo resultado independiente de la posición exacta que ocupen la fuente y el receptor. Ese fenómeno tampoco se cumple en la realidad y es posible dar cuenta de ello usando modelos ondulatorios o de rayos.

Tanto el criterio de Hidaka et al. como el de Schroeder tienen una base perceptiva. El de Hidaka directamente empírica y el de Schroeder usando una hipótesis que parece bastante plausible cuando se analizan conceptos de enmascaramiento sonoro.

Una forma de comprender estos fenómenos es mediante la definición de una ventana temporal que se desplaza a lo largo del eje tiempo en la respuesta al impulso (ver figura 4). Al principio entran pocas reflexiones dentro de la ventana, pero a medida que se desplaza la cantidad de reflexiones aumenta. Se puede definir un criterio en función del tamaño de esa ventana y la distribución espacial de la energía sonora en relación a condiciones perceptivas o a condiciones de precisión al determinar el nivel sonoro.

El mismo criterio temporal se puede extender al dominio frecuencial usando una ventana cuyo ancho de banda y cantidad de modos o distribución espacial dentro de esa ventana cumplan las condiciones para aceptar un campo sonoro difuso. Este criterio también puede terminar de moldearse mediante aspectos subjetivos o de precisión por ejemplo en cuanto a la precisión para las fórmulas de las ecuaciones (1) y (2) en alguna aplicación en particular como puede ser un tipo de actividad o un tipo de sala.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ).

Referencias

- Accolti, E., Alamino Naranjo, Y., Frank, A., Kuchen, E. Arballo, B. (2017) "The acoustics of the concert hall Auditorio Juan Victoria from San Juan, Argentina" Proceedings of Meetings on Acoustics; vol. 28.
- Accolti, E., Miyara, F. (2009) "Fast and controllable box-shaped room impulse response algorithm" RPIC (Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control), Rosario.
- Bonello, O. (1981) "A new criterion for the distribution of normal room modes", Journal of the Audio Engineering Society 597-606.
- Hidaka T, Yamada Y, Nakagawa T. (2007) "A new definition of boundary point between early reflections and late reverberation in room impulse responses" J Acoust Soc Am. 122(1):326-32.
- Jeong, C. H. (2016) "Diffuse sound field: Challenges and misconceptions" Proceedings of the INTER-NOISE 2016, 1015-1021.
- Kinsler, L., Frey, A. R., Coppens, A. B., Sanders, J. V. (2000) "Fundamentals of Acoustics" 4ª edición, Wiley
- Kuttruff H. (2004) "Acoustics: An Introduction" 2ª edición, Springer Verlag.
- Miyara, F., Pasch, V., Accolti, E. (2017) "Analysis of lightweight acoustic reflectors" Proceedings of Meetings on Acoustics, vol. 28.
- Sabine, W. C., (1922) "Collected papers on acoustics" Harvard University Press, Cambridge.