

ACÚSTICA DE RECINTOS Y AURALIZACIÓN

JOSUÉ QUERO¹, SIMON COSTANTINO¹ Y DIEGO N. ACOSTA¹

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC). Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.
josuequero@hotmail.com, simoncosta86@hotmail.com, diegoacosta_66@hotmail.com

Resumen – Actualmente existen diversas maneras de afrontar el diseño o la corrección acústica de un recinto. En este trabajo se presenta la auralización como una poderosa herramienta de diseño y análisis, detallando sus características y su uso para la resolución de problemas acústicos. También se presenta en forma sintética la acústica de recintos, la cual se basa en modelos físicos y matemáticos. Sobre este tema, se analizan conceptos como tiempo de reverberación, modos de resonancia y propiedades acústicas de diversos materiales. El objetivo del trabajo es establecer las reglas generales sobre diseño y acondicionamiento de espacios acústicos, y presentar la auralización como la herramienta más útil para el análisis, desarrollo, corrección y diseño de espacios acústicos, así como también llegar a una comprensión de los fenómenos psicoacústicos de la localización y la especialización.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversas maneras de desarrollar el diseño o acondicionamiento acústico de un recinto. En este trabajo se presenta la auralización como una poderosa herramienta de diseño y análisis, detallando sus características y su uso para la resolución de problemas acústicos. También se presenta en forma sintética la acústica de recintos, la cual utiliza modelos físicos y matemáticos para describir las transformaciones acústicas que ocurren en un recinto. Se analizan algunos parámetros de recintos como tiempo de reverberación, modos de resonancia y propiedades acústicas de diversos materiales.

El objetivo del trabajo es establecer las reglas generales sobre diseño y acondicionamiento de espacios acústicos, y presentar la auralización como la herramienta más útil para el análisis, desarrollo, corrección y diseño de espacios acústicos, así como también llegar a una comprensión de los fenómenos psicoacústicos de la localización y la especialización.

La primer parte de este trabajo desarrolla la acústica de recintos desde un punto de vista físico matemático, modelando con ecuaciones los fenómenos que suceden en un recinto, los cuales se deben tener en cuenta durante la etapa de diseño ó acondicionamiento de un recinto.

La segunda parte trata sobre los fenómenos psicoacústicos de localización, y de la información del recinto contenida en la señal acústica. Finalmente, se presenta la auralización y su relación con los temas descriptos anteriormente lo cual posibilita generar un entorno de Realidad Acústica Virtual, que puede ser luego utilizado como herramienta para el diseño acústico de recintos.

2. ACÚSTICA DE RECINTOS

En un recinto en el cual una fuente emite un sonido, pueden producirse fenómenos de resonancia que estarán relacionados con la naturaleza de la sala, su geometría, dimensiones y materiales, así como con las características del sonido en cuestión (fundamentalmente su intensidad y su frecuencia).

Al igual que en un diapasón, todo objeto, incluido un recinto, posee una serie de frecuencias o modos propios de vibración que son característicos del mismo. Por ejemplo si golpeamos una tubería metálica esta sonará con un sonido de frecuencia característica, que dependerá de las dimensiones y materiales de la tubería.

Las frecuencias propias de resonancia de un recinto rectangular están dadas por, la ecuación de Rayleigh [1]:

$$f = \frac{v}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (1)$$

Siendo $v(t)$ la velocidad del sonido. Donde las distintas frecuencias se obtienen dándole valores enteros a los modos n .

La presión acústica de las correspondientes ondas estacionarias es:

$$P = A \cos\left(\frac{n_x \pi}{l_x} x\right) \cos\left(\frac{n_y \pi}{l_y} y\right) \cos\left(\frac{n_z \pi}{l_z} z\right) \cos(2\pi f t) \quad (2)$$

Siendo $A = A_1 A_2 A_3 D$.

En los puntos en que los cosenos son cero, se producirán presiones acústicas nulas. Estos puntos producirán tres conjuntos de planos equidistantes, que se llaman planos nodales, que son ortogonales entre sí [1].

Los modos naturales de vibración de un recinto se pueden clasificar como:

-Modos axiales: se produce cuando dos de los argumentos de los cosenos es 0.

-Modos tangenciales: se produce cuando uno de los argumentos de los cosenos es 0.

-Modos oblicuos: se produce cuando ninguno de los argumentos de los cosenos es 0.

A bajas frecuencias se forman menos ondas estacionarias, pues a altas frecuencias existen múltiples modos de resonancia. Aumentando el número de frecuencias de resonancia con el volumen del recinto. Existe una expresión experimental que nos da la frecuencia (frecuencia de corte) a partir de la cual se puede considerar que la influencia de los modos propios se debilita:

$$f = \frac{v^2 t_r}{8,8 \pi V} \quad (3)$$

Donde $v(t)$ es la velocidad del sonido en el aire, V el volumen de la sala en m^3 y t_r es el tiempo de reverberación de la misma en s.

Si el sonido contiene frecuencias superiores a f , se excitará un número alto de modos propios y el resultado total será un campo casi difuso. Para frecuencias inferiores a f , los fenómenos de resonancia pueden afectar gravemente a las condiciones acústicas de la sala creando máximos y mínimos de presión acústica y evitando una distribución uniforme del campo sonoro. Por lo tanto, los modos de resonancia pueden ocasionar problemas acústicos sobre todo en salas pequeñas a bajas frecuencias. Estos problemas se resuelven en parte adecuando las dimensiones de la sala y evitando una distribución de paredes muy regular y de grandes superficies paralelas.

Obviamente, las ondas estacionarias van perdiendo energía a partir de que la fuente deja de emitir sonido, y se irán amortiguando debido a la atenuación del aire y a la absorción de las paredes.

Wallace Clement Sabine desarrolló alrededor de 1890 una teoría sobre el decaimiento del sonido y comprobó que el tiempo de reverberación podría ser útil para evaluar la calidad acústica de la sala [2]. Sabine se basó para desarrollar su teoría en dos condiciones:

- El campo dentro del recinto es difuso (su intensidad no decae en ningún punto).
- Las partículas sonoras son incoherentes, con lo que se pueden sumar energías.

Durante un proceso de aumento y decaimiento sonoro en un recinto podemos distinguir tres fases:

- El primero es un régimen transitorio en el que la densidad de energía (energía por unidad de volumen) aumenta. Existirá un balance energético entre la energía que se gana y que se pierde durante el proceso.

- El segundo es un régimen estacionario en el que ambas densidades de energía se compensan.

- El tercero corresponde al período en el que la fuente sonora ha dejado de emitir.

La fórmula simplificada propuesta por Sabine es:

$$t_r = \frac{0,161 V}{\sum s_i \alpha_i} \quad (4)$$

Siendo α los coeficientes de absorción de Sabine, los cuales dependen del material y están tabulados; S las distintas superficies y V el volumen total en m^3 [1].

Aparte de la fórmula del tiempo de reverberación de Sabine existen otras fórmulas como las de Eyring y la de Millington. Los principios en los que se basan son ligeramente diferentes, y proporcionan diferentes valores del tiempo de reverberación. Eyring y Millington suponen que el descenso de energía acústica cuando cesa la fuente se produce a saltos, mientras que para Sabine es lineal. Además Eyring supone que cada reflexión sobre una pared se reparte siempre sobre el resto de las superficies casi simultáneamente, mientras que Millington supone que lo hace secuencialmente.

Fórmula de Eyring simplificada es [1]:

$$t_r = \frac{0,161 V}{-S \ln\left(1 - \frac{\sum s_i \alpha_i}{S}\right)} \quad (5)$$

Fórmula de Millington simplificada es:

$$t_r = \frac{0,161 V}{-\sum s_i \ln\left(\frac{1}{1 - \alpha_i}\right)} \quad (6)$$

Las tres fórmulas suponen que el tiempo de reverberación:

- No varía dentro de la sala.
- No depende de la posición de la fuente.
- No depende de la forma ni de la geometría de la sala.
- No depende de la situación de los diferentes materiales en la sala.

Entre los diversos inconvenientes de cada fórmula, podemos citar:

- La fórmula de Sabine no da nunca un tiempo de absorción nulo, incluso aunque los cerramientos tuvieran una absorción perfecta. En salas absorbentes se obtienen tiempos de reverberación superiores a los reales.

- La fórmula de Sabine permite obtener valores de coeficientes de absorción superiores a la unidad, lo cual no posee sentido físico.

- Si entre los materiales hay alguno que tenga un coeficiente de absorción unidad, la fórmula de Millington siempre da un tiempo de reverberación nulo.

La fórmula de Sabine produce buenos resultados para materiales de baja absorción, mientras que a medida que los materiales son más difusores y están distribuidos más uniformemente, las fórmulas de Eyring o Millington proporcionan mejores resultados bastante similares entre sí. Por otra parte no hay que olvidar que a medida que las absorciones aumentan, nos alejamos más de las condiciones de campo difuso, con lo que el concepto de tiempo de

reverberación va perdiendo un poco de sentido [2]. Actualmente, el tiempo de reverberación se puede calcular o medir directamente. En este último caso se suelen presentar los resultados del tiempo de reverberación para diversas bandas de octava, ya que la absorción, depende de la frecuencia.

Como criterio general, se puede afirmar que recintos que tienen un fin musical pueden tener un tiempo de reverberación global definido en el intervalo de tiempo entre 0,7 a 2,5 s, mientras que recintos cuyo fin es la palabra habla (aula, sala de conferencias, auditorios) entre 0,5 a 1,5 s [1].

3. ESPACIALIZACIÓN

La espacialidad es la característica del sonido que nos da información para ubicar la fuente que lo produce, en un punto en el espacio. Esta capacidad de ubicación de la fuente recibe el nombre de localización.

La localización es posible gracias a las diferencias percibidas por el sistema binaural. Estas diferencias son fundamentalmente diferencias de intensidad y diferencias de tiempo (o de fase), además de otro conjunto de pistas como diferencias espectrales y aquellas producidas por la difracción dada por la cabeza del oyente [2].

El sistema auditivo responde de diferente forma respecto a la espacialidad de un sonido dependiendo de la frecuencia del mismo. Para frecuencias altas las diferencias de intensidad nos dan buena información sobre localización, mientras que para frecuencias bajas estas diferencias no son de utilidad. Asimismo, las diferencias de tiempo son una buena fuente de información para localizar el origen de sonidos de baja frecuencia, pero a partir de las frecuencias medias (en las que la información puede ser ambigua) moviéndonos hacia los agudos la información se torna inútil [2].

3.1 Simulación de espacios acústicos

Cuando se graba una orquesta en un teatro, en ocasiones se utiliza una técnica que consiste en colocar una cabeza tipo maniquí con micrófonos en sus oídos, como si fuera un espectador más y grabar la función en dos canales. Estas cabezas artificiales (dummy heads), pueden poseer también un torso recibiendo el nombre de cabeza y torso artificial (Head And Torso Simulator, HATS) estos dispositivos permiten la reproducción de las características acústicas y antropométricas promedio del torso, cabeza y pabellones auditivos de un adulto medio, actualmente están normalizadas para diferentes aplicaciones.

Las grabaciones hechas de esta forma registran la información agregada por el recinto, así como la reflexión y difracción producida por el cuerpo del oyente, los pabellones auditivos y la interacción con el canal auditivo de una forma de simular la percepción natural del fenómeno acústico [2]. Luego se distribuyen especificando en que teatro y butaca fueron grabadas y con la indicación de que se deben

escuchar con auriculares. Se podría decir que, si los sistemas de grabación y de reproducción son lo suficientemente fieles, se está reproduciendo el mismo fenómeno acústico en el oyente.

Sin embargo esto no es totalmente cierto ya que, como se sabe, la respuesta auditiva de cada persona, su “función de transferencia” es distinta.

De todas maneras este tipo de procedimiento tiene especial interés en aquellos casos en que la sala juega un papel esencial, y en la grabación de música de alta calidad (en donde las diferencias con una grabación tradicional se hacen más notorias).

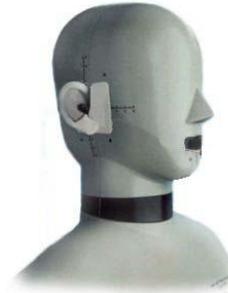


Figura 1: Cabeza y torso artificial 4128 (Brüel & Kjaer)

4. AURALIZACIÓN

Dado que el fenómeno acústico puede ser modelado como un sistema lineal, surge la posibilidad de simularlo una vez caracterizado por su respuesta al impulso (IR).

Una técnica relativamente nueva utilizada en la espacialización y en la reconstrucción de las características temporales y espaciales del campo sonoro en un recinto, consiste en aplicar un filtrado FIR a señales monofónicas anecóicas obteniendo señales binaurales que recrean la audición en el recinto. Esta técnica es conocida como auralización.

Las señales anecóicas son señales de audio que no tienen contenido de espacio, es decir que se registra solo el sonido directo que proviene de la fuente ó instrumento. Esto se realiza en cámaras anecóicas.

Los filtros FIR pueden ser obtenidos experimentalmente a través de la grabación de la respuesta al impulso. Hay distintas técnicas para obtener la respuesta al impulso como la grabación directa de una explosión, o la grabación de una secuencia conocida y el posterior procesamiento de la señal grabada. Estas respuestas al impulso pueden ser también derivadas de un modelado para obtener la respuesta deseada, como ocurre en programas CAD que en base a las características de un proyecto de espacio acústico determinan la respuesta al impulso del sistema en diferentes puntos [2].

En la reconstrucción de espacios acústicos mediante auralización se pretende reproducir en el oyente la sensación psicoacústica en cuanto a la reverberación, coloración o tibieza, disparidad binaural, impresión espacial; y en cuanto a la respuesta del obstáculo compuesto por el torso, cabeza y pabellones auditivos [4].

En la espacialización o simulación de 3D mediante auralización, se pretende recrear la imagen

acústica del sonido ubicando artificialmente la fuente en un lugar deseado del espacio, para lo cual se utiliza la respuesta de una cabeza artificial excitada desde distintos puntos espaciales.

4.1 Aplicaciones

Las aplicaciones de estas técnicas son muy variadas.

En primer lugar se puede mencionar el diseño de espacios para la audición. Es importante resaltar que normalmente este tipo de proyectos implican un costo muy alto y una duración que puede rondar los diez años. Otra característica importante de los mismos es la gran cantidad de variables subjetivas que están en juego, y la dificultad por ende de cuantizarlas. Las técnicas de auralización permiten contar con una herramienta de simulación capaz de reproducir la sensación psicoacústica del oyente en la sala diseñada, antes de que ésta sea construida. De esta forma se puede recurrir a la opinión de oídos entrenados, y realizar correcciones, durante el diseño [2, 3].

Una aplicación interesante es la reconstrucción de espacios acústicos. Es posible recrear las características acústicas de espacios distantes geográficamente del oyente, o de espacios que ya no existen. En relación a esto se está desarrollando un proyecto de registro y preservación del patrimonio acústico de Europa. Estas técnicas permiten incluir salas que fueron destruidas durante la guerra [3].

La realidad virtual es un vasto campo de aplicaciones para la auralización [1]. Desde presenciar conciertos multimedia como si estuviéramos en determinada butaca de un teatro en particular, hasta todo lo relacionado con aplicaciones interactivas como viajes, juegos, eventos, etc.

Otra aplicación que se señaló en la introducción es la posibilidad de obtener grabaciones en las que la espacialización (la ubicación de los instrumentos) esté dada por técnicas de auralización. La mezcla de una grabación podría tratar las señales de diferentes instrumentos de forma de obtener un panorama más definido de la localización de los sonidos (en especial para frecuencias graves).

5. CONCLUSIONES

El diseño de un recinto es un proceso complejo en el que hay que considerar diversos factores.

La posibilidad de error, como en todo proceso de ingeniería, aumenta considerablemente a medida que se buscan resultados más exactos, por lo que en la auralización se encuentra la herramienta perfecta para el trabajo durante la etapa de diseño y en la corrección de ambientes acústicos, proporcionando ella la capacidad de prever las características acústicas del lugar a construir antes de que sea iniciada la obra.

Por otro lado, como el efecto de la espacialización puede ser evocado cuando los oídos son sometidos al campo acústico cercano (donde aún no hay reflexiones y por lo tanto no hay información acústica

de la sala) actualmente existen sistemas de audio que posibilitan que un recinto acústico tenga la función de transferencia aparente de otro.

Para esto es necesario que los oyentes sean atacados solamente por el campo cercano, por lo que es necesaria una distribución de emisores tal que sea posible que todos ellos estén a un nivel de volumen bajo (para reducir el efecto de las reflexiones) y que cada oyente en la sala esté inmerso en el campo directo.

Este efecto hace posible una virtualización de un espacio acústico sin la necesidad de la modificación física del recinto, si bien su costo puede llegar a ser elevado por el número de elementos necesarios.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carrión Isbert A, “*Diseño acústico de espacios arquitectónicos*”, Editorial Alfaomega, Barcelona España, 2001
- [2] <http://fisica.laguia2000.com/acustica/acustica-de-recintos-i>
- [3] <http://fisica.laguia2000.com/acustica/acustica-de-recintos-ii>
- [4] <http://iie.fing.edu.uy/ense/asign/dsp/proyectos/2002/localizacion/motiva.htm>

7. DATOS BIOGRÁFICOS

Josué Quero, nacido en Libertador General San Martín, Jujuy el 19/12/1986. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Del 09/2010 al 02/2011 fue pasante en la empresa C&S – Communications and Systems en Wolfrenbüttel – Alemania. Sus intereses son: Auralización, realidad Acústica Virtual, Espacialización y Física Acústica.

E-mail: 50209@electrónica.frc.utn.edu.ar

Costantino Simón, nacido en Río Tercero, Córdoba el 24/11/1986. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: Electrónica de potencia, Electrónica industrial, Automatización y acústica de recintos.

E-mail: 50446@electrónica.frc.utn.edu.ar

Acosta Diego Nazario, nacido en Río Tercero, Córdoba el 31/03/1987. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Sus intereses son: Electrónica de potencia, Automatización, Auralización y acústica de recintos.

E-mail: 50447@electrónica.frc.utn.edu.ar