

ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO DE RECINTOS, ANÁLISIS Y DISEÑO

GERARDO PELLIS¹, GERMAN VARGAS¹ y EMANUEL ZAMBRONI¹

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC). Maestro López esq. Cruz Roja Argentina, CP X5016ZAA, Córdoba, Argentina
Gerardo_pellis@hotmail.com, Gernesto.v@gmail.com, Zambroni.emmanuel@gmail.com

Resumen – Cuando se realiza el estudio acústico arquitectónico de un recinto se deben tener en cuenta los métodos y modelos para el análisis. En este trabajo se hará una breve definición de cada uno de ellos para luego encarar el estudio del mismo. Se realizarán los cálculos en forma analítica y se presenta un esquema de cómo simular la sala con el software ODEON.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo desarrolla las distintas teorías y metodologías para el cálculo acústico de recinto, para ser aplicado en el análisis de una sala de la Universidad Tecnológica Nacional.

El objetivo del trabajo es realizar el estudio acústico de la sala antes mencionada y obtener los parámetros objetivos que la caracterizan, en base a esto sacar una conclusión acorde a los resultados obtenidos.

El trabajo se dividirá en diversas secciones donde se detallaran los métodos y modelos de análisis, luego puntualizaremos en un ejemplo práctico uno de los modelos tratados y realizaremos una breve introducción en la simulación de un recinto con el programa ODEON.

2. ACUSTICA FISICA, PSICOACUSTICA Y ESTETICA

En palabras del profesor L.I. Makrinenko, "el principal objetivo de la Acústica Arquitectónica es poder conocer y predecir la evolución y características del campo sonoro en una sala con el fin de garantizar una buena acústica".

En esta sencilla declaración de intenciones cabe destacar tres aspectos diferentes y fundamentales en el estudio de la acústica: por un lado, se hace referencia a un conocimiento físico del problema, pero, por otro lado, con el término "buena acústica", se hace referencia al fenómeno de cómo el oyente percibe el sonido, e incluso a la evaluación subjetiva que de ese mismo sonido pueda hacer. Este triple carácter de la acústica arquitectónica queda perfectamente delimitado por el profesor Schroeder [1] según el cual en el fenómeno acústico hay que distinguir tres elementos diferenciados:

a) El aspecto físico del problema: dada una sala con una forma y materiales en las paredes conocidos, ¿Cómo viajarán las ondas sonoras en ella?. Veremos más tarde los distintos modelos teóricos que nos permiten abordar dicho problema aunque debemos

señalar que todavía existen muchas cuestiones abiertas sobre este tema, y que incluso la medición de algunos parámetros físicos tan necesarios como la impedancia de las superficies presenta serios problemas.

b) La parte psicoacústica del problema: dado un campo sonoro conocido, ¿Qué oiremos?. No está completamente establecida una correlación entre categorías subjetivas y parámetros físicos medibles (por ejemplo, sensación de impresión espacial frente al parámetro factor de energía lateral, claridad en la señal frente al parámetro definición, etc.). Todo esto sin entrar en consideraciones sobre las preferencias del oyente.

c) El problema de la estética: dado un campo sonoro perfectamente conocido ¿Qué cualidades acústicas son preferidas por los oyentes?. En función de la actividad que se desarrolle, por ejemplo una conferencia, un concierto o una ópera, habrá que conocer cuáles son los valores óptimos o preferidos de los parámetros acústicos de la sala en la que se desarrolla la audición. Esta pregunta sólo tiene sentido desde el momento en que se tiene el conocimiento físico y psicoacústico del problema.

2.1 Modelos Teóricos de Acústica de Salas

Nos vamos a centrar exclusivamente sobre el primero de los aspectos del problema, el aspecto físico. En este sentido, cabe recordar que existen tres modelos teóricos fundamentales que describen el proceso del sonido en auditorios y salas de concierto, y cada uno de ellos tiene sus propias ventajas y sus propias desventajas o limitaciones.

El primero de ellos, físicamente el más preciso, es la Acústica Ondulatoria o teoría de ondas de la acústica de auditorios. Según esta teoría, el volumen de aire del espacio de una sala es un sistema vibrante lineal de parámetros distribuidos. El desarrollo de la teoría de ondas ha llevado a una mejor comprensión

de la influencias del espacio y del contorno de una sala cuando una fuente irradia una señal dentro de ella. Sin embargo, la solución analítica de la ecuación de ondas sólo es posible para salas de geometría muy sencilla y para condiciones de contorno ideales. En las salas reales, de forma más o menos complicada, aparecen dificultades prácticamente insuperables, ya que sería necesario tener en cuenta todos los detalles de la reflexión, absorción, refracción y difusión del sonido en todos los puntos de las superficies de dichas salas, así como todas las propiedades físicas de la fuente sonora.

Esto requeriría un nivel de descripción elevadísimo que, aunque fuese realizable, significaría un esfuerzo computacional tal que sobrepasaría las posibilidades de los ordenadores actuales.

El segundo modelo es la teoría de la Acústica Geométrica, que, como en la óptica Geométrica, puede aplicarse cuando consideramos longitudes de onda pequeñas, es decir, Frecuencias altas. Esta hipótesis puede aceptarse cuando las dimensiones de la sala y sus Paredes son grandes comparadas con la longitud de onda. Por ejemplo, para una frecuencia media de 1000 Hz, a la que corresponde una longitud de onda de 34 cm, las dimensiones lineales de las paredes y del techo, así como las distancias cubiertas por la onda sonora, son mayores que la longitud de onda en varios órdenes de magnitud. Los métodos de la acústica geométrica se utilizaron inicialmente para estudiar la distribución de las primeras reflexiones del sonido desde las paredes de la sala mediante técnicas para dibujar los frentes de onda tras sus reflexiones en todo tipo de superficies. En la actualidad, los métodos de la acústica geométrica conocidos como método de las fuentes imagen y método del trazado de rayos, han sido implementados en ordenador, lo que ha hecho posible la simulación y estudio de diversos parámetros acústicos de interés así como la obtención de la respuesta impulsiva de la sala.

El tercer modelo es la Teoría Estadística, que está basada en la suposición de la existencia de un campo sonoro difuso en la sala. Las principales magnitudes estadísticas utilizadas en esta teoría son el recorrido libre medio, así como el coeficiente de absorción medio. Las ecuaciones clásicas de Sabine, Eyring y Millington han pasado a ser parte fundamental en el estudio y conocimiento de la acústica de salas.

Sin embargo, esta última teoría está poco correlacionada con la forma de la sala, porque no puede tener en cuenta detalles importantes de la geometría (balcones, etc.), ni tampoco permite la caracterización del campo sonoro en un punto dado de la sala.

2.2 El Campo Sonoro en una Sala Cerrada

Una manera de describir y calcular el campo sonoro en salas es encontrar y superponer soluciones de la ecuación de ondas, también llamadas modos normales, que satisfacen la condiciones de contorno del recinto. En 1936, Philip M. Morse, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, publicó "Vibration

and Sound", en el que explicaba su teoría de los "modos normales de vibración" en recintos rectangulares (Recuero, 1983).

Como señala este autor (Morse, 1948), cuando una fuente empieza a emitir en una sala y después es apagada, podemos distinguir los siguientes procesos:

a) Una vibración transitoria, con la forma necesaria para satisfacer las condiciones iniciales en el recinto (formada por muchas ondas) en la que cada modo normal de la vibración transitoria vibra con su frecuencia propia.

b) Después de que el transitorio desaparece, tenemos una vibración de estado estacionario formada por muchas ondas estacionarias con sólo la frecuencia de la fuente, cuyas amplitudes dependen de la impedancia de la onda estacionaria en cuestión, y de la posición de la fuente en la sala.

c) Cuando la fuente sonora cesa de emitir, las ondas estacionarias permanecen en el recinto (las correspondientes a las frecuencias propias de la sala), cayendo exponencialmente de acuerdo con sus propiedades de vibración libre y, quizás, interfiriendo unas con otras (latidos). Este fenómeno es la base de la reverberación.

Otro problema es el tremendo número de modos que son necesarios para describir el campo sonoro en el rango de frecuencias usual, incluso en una sala de tamaño moderado. Por ejemplo, para una habitación con un volumen de 1.000 m³ y un rango de frecuencias hasta 10.000 Hz el número mínimo de modos a estudiar sería más de 100 millones.

La ecuación de ondas en un recinto cerrado puede resolverse aplicando métodos numéricos:

a) Con el Método de Diferencias Finitas (Finite Difference Method, FDM), o con el Método de Elementos Finitos (Finite Element Method, FEM), el volumen de la sala y su contorno se subdividen en elementos de tamaño finito.

b) Con el Método de los Elementos de Contorno (Boundary Element Method, BEM) sólo el contorno se subdivide en elementos de tamaño finito.

Sea como fuere, la ecuación de ondas debe resolverse para cada uno de los elementos definidos, en lo que se convierte en un inmenso sistema de ecuaciones lineales.

3. ACÚSTICA GEOMÉTRICA

3.1 Partículas Sonoras

En acústica geométrica de salas, el concepto de onda tiene menor importancia y es sustituido por el concepto de rayo sonoro. Un rayo sonoro es una idealización de una onda plana que ocupa una región finita determinada del espacio. Su composición espectral incluye componentes monocromáticos cuyas frecuencias están comprendidas en un intervalo determinado.

Veamos las hipótesis teóricas sobre las que se construye la acústica geométrica:

1. Propagación rectilínea del sonido. El método geométrico se basa fundamentalmente en la propagación rectilínea de la energía. De acuerdo con el principio de Fermat, en un medio libre de obstáculos toda onda se propaga por el camino más rápido, que para una velocidad de propagación constante, es el más corto (la línea recta entre dos puntos). El concepto de rayo sonoro es, para un medio homogéneo e isótropo, una porción significativa de energía acústica con frecuencia constante, propagándose en la proximidad de una estrecha línea recta.

2. Las ondas esféricas pueden aproximarse por ondas planas. Como vimos cuando $kr \gg 1$, siendo k el número de onda y r la distancia recorrida desde la fuente, una onda esférica se comporta como una onda plana cuya amplitud decrece con $1/r$.

3. Los fenómenos de difracción son poco importantes o despreciables. Suponiendo longitudes de onda pequeñas, es posible aplicar una descripción geométrica de las reflexiones. Esta suposición es plausible si las dimensiones de la sala y sus paredes son grandes comparadas con la longitud de onda del sonido.

4. Reflexión. Si en el recorrido de un rayo se sitúa un obstáculo, que no participa en absoluto en el movimiento ondulatorio (el movimiento excitado en él por la onda sonora es despreciable), parte de la energía acústica retorna, originando el fenómeno de la reflexión. Si la superficie del obstáculo es lisa, el rayo incidente se refleja en una sola dirección (reflexión especular) siguiendo las leyes de Snell. Si la superficie del obstáculo es rugosa, el rayo incidente se refleja en todas direcciones (reflexión difusa), de acuerdo con la ley de Lambert.

5. Incoherencia. Se supone incoherencia entre las diferentes ondas. En otras palabras, los fenómenos de interferencia no se toman en consideración, por lo que si varios frentes sonoros inciden en un punto al mismo tiempo, no se tienen en cuenta las relaciones entre sus fases. En su lugar, simplemente se suman sus intensidades.

Si las anteriores condiciones son válidas, podemos introducir la idea de rayos sonoros, que son líneas tales que la tangente a las mismas en un punto cualquiera coincide con la dirección de propagación, y podemos decir que el sonido se propaga a lo largo de rayos, ignorando su naturaleza ondulatoria.

3.2 Distribución Direccional Dependiente del Tiempo de la Intensidad Sonora.

Veremos a continuación cuáles son las funciones o magnitudes que podemos evaluar con el método geométrico. Supongamos una fuente sonora

localizada en un recinto cerrado, emitiendo un sonido impulso, que viene a ser una compresión o rarefacción de presión avanzando en el espacio. Para nosotros, las partículas sonoras son una desratización del frente de ondas saliente de la fuente. Según encuentran obstáculos en su camino, son reflejadas en distintas direcciones, de forma que para cualquier receptor en el espacio que ocupa un diferencial de área, dA , podemos hablar de una diferente distribución direccional dependiente del tiempo de la intensidad sonora [8] caracterizada por:

$$I_t(\varphi, \theta) \quad (1)$$

Donde φ es el ángulo polar y θ el ángulo azimutal que definen cualquier dirección en un sistema de referencia dado.

La energía total por unidad de área aportada por las reflexiones llegadas durante un intervalo de tiempo dt desde un elemento de ángulo sólido $d\Omega$ es:

$$I_t(\varphi, \theta) dt d\Omega \quad (2)$$

Cuando integramos $I_t(\varphi, \theta)$ sobre todas las direcciones, obtenemos la distribución temporal de la intensidad sonora reflejada:

$$I(T) = \iint I_t(\varphi, \theta) d\Omega \quad (3)$$

Esta función es de gran importancia porque describe la naturaleza de la respuesta impulsiva de la sala. El estudio va a dar lugar a dos modelos de simulación fundamentales: el método de las fuentes imagen (source-image-method) y el método de la traza-do de rayos (ray-tracing-method). Cuando integramos para todo el tiempo desde cero hasta infinito, distinguiendo para cada uno de los posibles ángulos, tenemos la distribución direccional de estado estacionario:

$$I(\varphi, \theta) = \int_0^{\infty} I_t(\varphi, \theta) dt \quad (4)$$

Cuya representación gráfica recibe el nombre coloquial de "diagrama de erizo" para todo tiempo, y que puede medirse perfectamente con micrófonos direccionales, o calcularse con la ayuda de un programa de simulación.

Si integramos $I(t)$ en un intervalo $[t, t+\Delta t]$ obtenemos la energía por unidad de área captada por el receptor durante Δt :

$$E(t, t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} I(t) dt \quad (5)$$

Si integramos $I_t(\varphi, \theta)$ para todos los ángulos y para todo el tiempo, estaremos calculando la energía total por unidad de área que recibe un receptor:

$$E = \iiint I_t(\varphi, \theta) dt d\Omega = \int I(t) dt \quad (6)$$

El valor dado por esta ecuación, cuando la señal de la fuente es de tipo impulsivo, corresponde con el nivel de presión sonora en el receptor (SPL), que solemos expresar en decibelios. Todos los valores anteriores están referidos al área total del receptor, por lo que bastaría integrar sobre toda su área A para tener los correspondientes valores energéticos:

$$E_A = \iint_a^{\infty} I dA \quad (7)$$

En el desarrollo que estamos siguiendo todavía no hemos expuesto el carácter de la función $I(\varphi, \theta)$ y su relación con la fuente sonora, el receptor y la sala que los contiene. Esta dependencia queda manifiesta de un modo descriptivo a través de dos modelos diferentes:

a) El modelo de fuentes imagen. Este modelo consiste en calcular todas las reflexiones a partir del espacio de fuentes imagen cuya posición se determina a través de sucesivas reflexiones especulares de la fuente original.

b) El modelo de trazado de rayos. En este caso, se hallan todas las reflexiones a partir de reconstruir el frente de ondas discretizando a través de un cierto número de rayos sonoros que son seguidos y reflejados sucesivamente.

El carácter fenomenológico de estos dos modelos, los hace especialmente idóneos para su simulación por ordenador. En el siguiente Capítulo, estudiaremos este tema con más detenimiento.

4. ACÚSTICA ESTADÍSTICA

Este modelo teórico se basa en la suposición de la existencia de un campo acústico difuso a lo largo de toda la sala. Un campo sonoro es difuso cuando:

1. La densidad de energía es la misma en cualquier punto de la sala.
2. El flujo de energía es igual para todas las direcciones.
3. El tiempo de reverberación es el mismo en toda la sala.

Con estas suposiciones, la intensidad sonora reverberante es igual para cualquier punto de la sala.

Aprovechando la conocida relación estadística del recorrido libre medio de una onda sonora en una sala de idéntica a la utilizada en la teoría cinética del calor de Clausius [2]:

$$l = \frac{4V}{S} \quad (8)$$

Donde V es el volumen de la sala, y S el área de las superficies de la sala, podemos expresar la intensidad sonora reverberante en función del tiempo cuando la fuente cesa de emitir como [8]:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{cS}{4V} t \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (9)$$

Donde introducimos el coeficiente de absorción media de una sala de paredes de área S_i y coeficiente de absorción α_i , como:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i \quad (10)$$

El tiempo de reverberación se define como el tiempo necesario para que, suprimida la fuente, el nivel de presión sonora caiga en 60 dB.

$$T_{\text{Eyring}} = 0.161 \frac{V}{-S \ln(1-\bar{\alpha})} \quad (11)$$

Que es la fórmula de Eyring y que data del año 1930 [2] Cuando el coeficiente α de esta última ecuación es pequeño comparado con la unidad, podemos quedarnos con los dos primeros términos del desarrollo en serie del neperiano del denominador. Esto nos lleva directamente a la fórmula de Sabine para el tiempo de reverberación:

$$T_{\text{Sabine}} = 0.161 \frac{V}{S\bar{\alpha}} \quad (12)$$

Si en el proceso de reverberación consideramos que la energía encuentra todas las superficies de la sala, una tras otra, llegamos a la expresión de Millington-Sette:

$$T_{\text{Millington}} = 0.161 \frac{V}{-\sum S_i \ln(1-\alpha_i)} \quad (13)$$

Que difiere de la fórmula de Eyring sólo en la forma en la que los coeficientes de absorción son promediados.

En la práctica, las condiciones en que las fórmulas anteriores predicen correctamente el Tiempo de Reverberación son las siguientes:

- a) Sabine: Recintos vivos, con coeficiente de absorción medios inferiores a 0,2.
- b) Eyring: Coeficiente de absorción superior a 0,2 y absorción uniformemente distribuida.
- c) Millington: Coeficiente de absorción medio superior a 0.2 y absorción muy dispar entre los distintos materiales, siempre que no exista algún coeficiente de absorción próximo a la unidad.

Todas estas expresiones provienen de un tratamiento puramente estadístico. Así por ejemplo se está suponiendo un mismo recorrido libre medio l para todos los rayos. Podemos analizar la influencia que las diferentes longitudes de caminos recorridos por los múltiples rayos existentes poseen sobre el Tiempo de Reverberación. Recordemos que se usó el recorrido libre medio en la deducción: obviamente, este valor posee una varianza relativa:

$$Y^2 = \frac{(l^2) - (\bar{l}^2)}{\bar{l}^2} \quad (14)$$

Cuanto más pequeña sea esta varianza relativa mejor será la predicción del Tiempo de Reverberación aportada por las fórmulas citadas anteriormente.

El efecto estadístico de esta varianza en el Tiempo de Reverberación es el siguiente [8]:

$$T_{\text{Estadist}} = 0.161 \frac{V}{-S \ln(1-\alpha) \left[1 + \frac{V^2}{2} \ln(1-\alpha) \right]} \quad (15)$$

Por lo que el Tiempo de Reverberación resulta superior al evaluado por la fórmula de Eyring, ya que g^2 es mayor o igual que cero. En definitiva, la varianza relativa del recorrido libre medio tiene en cuenta la forma de la sala.

5. PARÁMETROS OBJETIVOS DE ACÚSTICA DE SALAS

Para valorar las condiciones acústicas de una sala se han desarrollado diversos criterios objetivos, generalmente derivados de la respuesta impulsiva. Emitida una señal acústica impulsiva en la posición del hipotético orador, se registra la señal recibida en las posiciones de los oyentes; esta señal consta de una parte debida al sonido directo (la cual llega en primer lugar) y todas las sucesivas reflexiones, las cuales llegan de múltiples direcciones y con diferente intensidad.

Desde que a comienzos de siglo, Sabine definiese el Tiempo de Reverberación de una sala un gran número de nuevos parámetros acústicos han sido definidos e introducidos en la Acústica de Salas. A continuación, y siempre refiriéndose a una respuesta impulsiva, veremos la definición de algunos de ellos, así como sus valores óptimos para Salas de Concursos.

1. Tiempo de Reverberación (Reverberation Time-RT). Se define como el tiempo en que se producen 60 dB de caída siguiendo la línea recta que mejor se ajuste al intervalo -5 a -35 dB de decaimiento de la curva de Schroeder.

2. Tiempo de Reverberación Temprano (Early Decay Time - EDT). Se define como el tiempo en que se producen 60 dB de caída siguiendo una línea recta que se ajuste a los primeros 10 dB en la curva de decaimiento de Schroeder.

EDT está determinado fundamentalmente por las primeras reflexiones y varía con la posición de medida en forma más notable que el Tiempo de Reverberación clásico. Su intervalo óptimo, más estrecho que el del RT, es de 1.8 a 2.6 s. Un predominio del EDT sobre el RT equivale a un predominio del campo directo y las primeras reflexiones sobre el campo reverberado.

3. Definición (Definition - D). Mide, en tanto por ciento, la relación entre la energía recibida durante los primeros 50 ms y la energía total que compone la

respuesta impulsiva, asumiendo que la primera es beneficiosa para la inteligibilidad. Fue definido por primera vez por Thiele en 1953 [2]:

$$D = \int_0^{50\text{ms}} P^2(t) dt / \int_0^{\infty} P^2(t) dt \quad (16)$$

donde la presión $p(t)$ es la respuesta a una señal impulsiva y $t=0$ coincide con la llegada del sonido directo al punto de observación. Los resultados pueden darse en banda ancha o en bandas de octava, previo filtrado de la respuesta al impulso. Para asegurar una buena inteligibilidad se recomienda que sus valores se encuentren en el intervalo 40% a 60% [8].

4. Claridad (Clarity - C80 y C50). La Claridad C80 es un parámetro formalmente similar a la Definición pero más indicado para caracterizar la transparencia de la música en una sala de conciertos, se considera beneficiosa la energía que llega en los primeros 80 ms y perjudicial la posterior:

$$C_{80} = 10 \lg \left(\int_0^{80\text{ms}} P^2(t) dt / \int_{80\text{ms}}^{\infty} P^2(t) dt \right) \quad (17)$$

El intervalo de valores óptimos cambia según los autores consultados. Según Cremer y Müller estos valores deben encontrarse entre ± 1.6 dB [2]. Según Jordan es recomendable el intervalo ± 2 dB. Según el trabajo más detallado de Reichardt y Lehmann en 1981, dependiendo de que se trate de filas delanteras o traseras en la sala.

El umbral de percepción para este parámetro en el rango de frecuencias medias, según Cox es de 0,67 ± 0.13 dB, aunque para frecuencias bajas aumenta hasta 3.7 dB.

El parámetro C50 se define de igual manera que el C80 pero cambiando el límite temporal de integración del numerador.

5. Tiempo Central (Center Time, T_s). Es la distancia T_s en segundos desde el origen hasta el "centro de gravedad" de la respuesta impulsiva. Fue introducido por Kürer en 1969 y está relacionado con la valoración subjetiva de claridad. Se calcula como:

$$T_s = \int_0^{\infty} t P^2(t) dt / \int_0^{\infty} P^2(t) dt \quad (18)$$

Se recomienda que su valor no exceda los 140 ms [2]. Para frecuencias medias, el umbral de percepción de este parámetro según Cox es de 8 ms, aunque para bajas frecuencias puede aumentar hasta 46 ms.

6. Tiempo de Ascenso (Rise Time, T_r). Es el tiempo necesario para que la energía recibida en el receptor, una vez alcanzado el valor estacionario, decrezca a la mitad respecto al valor asintótico final, es decir, disminuya 3 dB.

$$\int_0^{T_r} P^2 dt = \int_{T_r}^{\infty} P^2 dt \quad (20)$$

Este parámetro fue introducido por Jordan en 1959 [2]. No disponemos de valores óptimos.

7. Fracción de Energía Lateral (Lateral Energy Fraction, LEF' y LEF) [3] experimentaron con reflexiones laterales simuladas con altavoces distribuidos en una sala anecoica, y encontraron la existencia de una alta correlación entre el atributo subjetivo que denominaron "impresión espacial" (equivalente al "ancho aparente de la fuente") y el valor de la energía lateral. En su artículo definieron el parámetro fracción de energía lateral como:

$$LEF' = \frac{\int_{5ms}^{80ms} P^2 \cos \theta dt}{\int_0^{80ms} P^2 dt} \quad (21)$$

Donde θ es el ángulo lateral ($\theta = 0$ es en el eje de los oídos) y p es la presión sonora medida en el mismo punto con un micrófono omnidireccional. Según esta expresión, el factor de energía lateral es el cociente entre la proyección, sobre el eje de los oídos, de la energía de las reflexiones que llegan entre 5 y 80 ms, y la energía total del conjunto de reflexiones entre 0 y 80 ms.

Este parámetro, fuera de las condiciones controladas de un experimento en una cámara anecoica, es muy difícil de obtener experimentalmente. Para facilitar su medida, se recomienda utilizar esta otra expresión:

$$LEF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} P_{\infty}^2 dt}{\int_0^{80ms} P^2 dt} \quad (22)$$

Donde P_{∞} es la presión sonora medida en un punto de la sala con un micrófono de figura de ocho (micrófono de gradiente de presión), donde el eje nulo apunta a la fuente. Como P_{∞}^2 introduce un factor de directividad de $\cos^2 \alpha$. El intervalo óptimo del parámetro LEF se encuentra entre el 0.2 y 0.3

8. Tiempo de Retraso (Initial Time Delay Gap). La intimidad o sensación de que la música se percibe como interpretada en una sala pequeña, está muy relacionada con el tiempo que separa la llegada del sonido directo y del primer sonido reflejado. En 1992 Beranek ha encontrado una importante correlación entre la calidad sonora subjetiva de varios auditorios, y el hecho de que el tiempo de retraso sea corto. Como regla general, se recomienda que el tiempo de retraso debe ser menor de 20 ms en salas de concierto y de 25 ms en salas de ópera [5][6].

6. PARAMETROS SUBJETIVOS DE ACUSTICA DE SALAS.

Realizamos una encuesta a 15 estudiantes de la carrera de Ing. electrónica que utilizan el laboratorio frecuentemente el cual nos dio el siguiente resultado

Un gran número de estudiantes opinaron que dentro de la sala luego de un tiempo determinado se siente un murmullo constante que no permite

comunicarse de una mesa a otra. Esto aumenta a medida que más personas se encuentran trabajando en el laboratorio.

7. PSICOACUSTICA

En la investigación de acústica musical, ha mostrado ser de gran utilidad el procedimiento analítico y sintético: análisis acústico y psicoacústico de objetos y procesos para proceder a síntesis en interacción con nuevos análisis. Esto vale para las cuatro orientaciones especificadas en el apartado 2, donde están inmersos planteamientos y problemáticas que podemos clasificar de la siguiente forma:

1. Planteamientos y problemáticas de tipo físico. Estas investigaciones conllevan análisis físicos de la producción y comportamiento de las señales acústicas utilizadas en la comunicación musical y oral. El proceso puede ser llevado a efecto con los analizadores de Fourier y procesadores en fracciones de octava. Se trata de expresar en términos físicos los parámetros que inciden en la vivencia auditiva, permitiendo desmembrar en elementos esenciales que posibiliten la expresión en términos de causa-efecto versus estímulo-vivencia sonora. Estos parámetros básicos son: frecuencia, amplitud de las vibraciones, distribución espectral de la energía vibratoria, análisis temporales; es decir, análisis correspondientes tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia.

2. Planteamientos y problemáticas de tipo psicoacústico. La conexión entre el estímulo acústico y la vivencia sonora es frecuentemente complicada, no sólo por la propia complejidad de las señales acústicas, sino también por las peculiaridades con que oído humano lleva a efecto el procesamiento auditivo. Actualmente se conocen leyes de psicoacústica que permiten referenciar los fenómenos perceptivos sonoros dentro de un marco normalizado. A partir de ahí, se trata de desarrollar aplicaciones y adaptaciones de interés para la psicodidáctica.

3. Planteamientos y problemáticas de tipo preferencial. En los juicios de valor relativos a señales acústicas se encuentran aspectos preferenciales debidos no sólo a peculiaridades auditivas de los enjuiciadores, sino también las ligadas a aspectos de tipo cultural y de costumbres; sin olvidar en ciertos procesos las que puedan derivar de un determinado estado de ánimo. Una dilucidación de problemáticas preferenciales aconseja un análisis de cualidades y calidades en conexión con los parámetros que las determinan. Estos parámetros pueden ser evaluados cuantitativamente y correlacionados con medidas y valoraciones de parámetros físico-acústicos y psicoacústicos. Las evaluaciones de aceptabilidad, validez, "objetividad", etc., pueden hacerse mediante las herramientas usuales de Estadística: valores medios, varianzas, desviaciones estándar, líneas de regresión, coeficientes de correlación.

Dado que con los citados procedimientos se trata de preparar un material y desarrollos fenomenológicos de utilidad para la didáctica

musical, es importante evaluar, en lo posible, la efectividad [7]

8. CALCULO ANALITICO DE LA SALA

En los cálculos que realizaremos consideraremos un recinto como el que se muestra en la figura 1. Pero considerando que el mismo es un rectángulo macizo de hormigón luego definiremos cuales son las superficies a tratar del recinto. El cual consta: techo y cuatro paredes de hormigón macizo pintado Fig.1. Una de las paredes es de yeso y el suelo es de granito sobre hormigón.

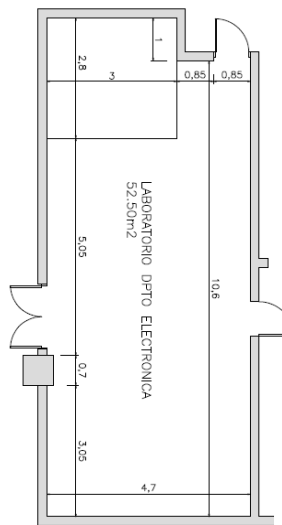


Figura 1: Plano del laboratorio.

Frecuencias [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Hormigón macizo	0,02	0,02	0,02	0,3	0,4	0,4
Cerámica con contar piso de hormigón	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Placas de yeso de 9.5 mm de espesor	0,3	0,2	0,15	0,05	0,05	0,05
Vidrio	0,35	0,25	0,18	0,12	0,7	0,4

Tabla 1. Coeficiente de absorción

Las superficies y el volumen a tratar serán los siguientes.

Piso a	3,06 [m ²]
Piso b	41,36 [m ²]
total	44,42 [m ²]
Vol total	177,68 [m ³]

Sup 1	6,8 [m ²]
Sup 2	42,4 [m ²]
Sup 3	18,8 [m ²]
Sup 4	35,2 [m ²]
Sup 5	12 [m ²]
Sup 6	7,2 [m ²]

Tabla 2. Superficies del recinto.

Ahora calcularemos todas las áreas de la absorción total en las bandas de 125 a 4000 Hz.

Área 125	9,8058
Área 250	8,6058
Área 500	8,45
Área 1000	87,9124
Área 2000	116,7204
Área 4000	116,7204

Tabla 3. Área efectiva de absorción.

Con estos datos se calcula el tiempo de reverberación por octava de 125 a 4000 Hz utilizando la ecuación (12).

Frecuencias [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Rt60	2,92	3,32	3,39	0,33	0,25	0,25

Tabla 4. Tiempo de reverberación.

Tomando el tiempo de reverberación RT a 500 Hz y 1 kHz y promediándolos obtenemos el RT_{mid}. En los volúmenes situados entre 100 y 10000 m³ se halla entre $0,7 \leq RT_{mid} \leq 15$.

Rt (125-500)	3,208925769
Rt (1000-4000)	0,271856199
Rt (500-1000)	1,855389902
Rt (125-4000)	2,088469181

Tabla 5. Tiempos de reverberación promedio.

Tomando el RT_{mid} observamos un alto valor del tiempo de reverberación para el volumen de nuestra sala que el óptimo para un aula es aproximadamente 0,85 s.

Utilizaremos una fórmula empírica para calcular la frecuencia límite superior a partir de las cuales los modos propios tiene una influencia prácticamente nula.

$$f_{max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{mid}}{V}} \quad (23)$$

$$f_{max} = 188,94 \text{ Hz} \quad (24)$$

Los valores de las frecuencias asociadas a las dimensiones del recinto nos darán los distintos modos de resonancia de la sala lo cual los calcularemos de una forma muy sencilla mediante la fórmula de Rayleigh.

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (25)$$

Ahora presentaremos una tabla con los valores a modo de ejemplo:

Modo	Frecuencia [Hz]
1 1 1	58,92
2 1 1	86,68
3 1 1	119,37
4 1 1	153,87
1 2 1	65,32
1 3 1	83,29
1 4 1	100,69
1 1 2	95,14
1 1 3	147,70
1 1 4	195,02

Tabla 6: Modos normales ó de resonancia.

9. ODEON

A continuación vamos a familiarizarnos con el programa Odeon, tenemos en la figura 2 la imagen de una sala en vista 3D View.

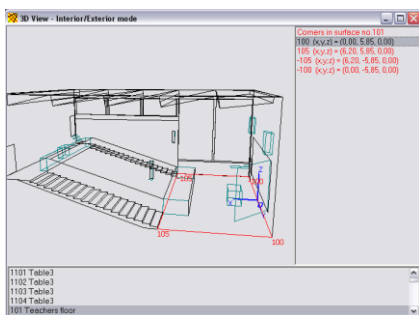


Figura 2: Modelo tridimensional del recinto (3D View).

A continuación abriéremos una de las salas que vienen predefinidas entrando en el menú *File->Open Room*. Escogemos por ejemplo la sala auditorium 21 (los archivos son los de extensión .par). Se abre una ventana denominada 3D View en la que aparece el modelo 3D de dicha sala que podemos girar y colocar a nuestro aire mediante el mouse. También pulsando la barra espaciadora podemos cambiar ciertas vistas predeterminadas (planta, alzado, etc.)

Aparece también un nuevo menú, el 3D View que permite realizar distintas tareas con la ventana de representación 3D: Podemos ampliar o reducir con la opción zoom; mediante Highligh Surfaces se nos muestra una lista de superficies en la parte inferior. Pulsando en alguna de ellas la resalta en el dibujo; mediante Show Corner numbers and coor se pueden ver las coordenadas de las esquinas de la superficie seleccionada y se resalta la esquina seleccionada con un círculo azul.

La ventana 3D View nos muestra nuestra sala en 3D.

En el menú Toolbar hay algunas opciones más que son interesantes como primera toma de contacto. Una de ellas es Room Information que nos da datos sobre las dimensiones de la habitación. Otra es la vista 3D OpenGL que nos permite echar un vistazo a la sala como si estuviéramos dentro de ella. También es interesante la opción 3D Reflector Coverage que nos muestra mediante código de colores que zonas de la sala son reforzadas por los reflectores para distintas fuentes (sources).

9.1 DEFINICIÓN DE MATERIALES USADOS

Si tenemos abierta la sala *Example*, podemos seleccionar la opción del menú *Toolbar->Material List* y se abrirán dos ventanas. En la superior aparece la representación de la sala y en la inferior la lista de superficies a la izquierda y la librería de materiales disponibles en el programa a la derecha.

Podremos modificar los materiales de nuestra sala seccionando sobre cualquier material de la lista de la derecha, aparece en la parte inferior su repuesta en frecuencia (en referencia al coeficiente de absorción) en las bandas de octava 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz que son estándar en medidas acústicas Figura 3.

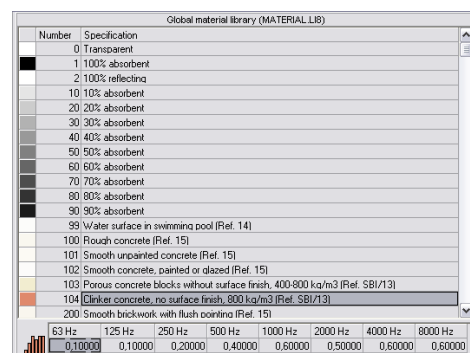


Figura 3: Lista de Materiales

También mediante un grafico de barras a la izquierda se puede intuir de forma visual la respuesta en frecuencia del material.

Los primeros materiales de la lista son ideales. Es decir, son materiales con un porcentaje de absorción determinado en todas las frecuencias. Los materiales reales aparecen a partir del 99.

La parte interesante de esto es la posibilidad de asignarle los materiales que nos interesan a las distintas superficies de la sala.

9.2 FUENTES Y RECEPTORES

Una vez que tenemos definida la sala, para realizar algún tipo de simulación es necesario especificar donde colocamos las fuentes sonoras y donde se desea colocar el receptor o los receptores.

Seleccionamos del menú *Toolbar* la opción *Source Receiver List*. Se nos abre una ventana donde podemos especificar fuentes (sources) y receptores (receivers).

Pulsando la letra P o en el icono *New Point Source* (similar a una diana roja) añadimos fuentes y pulsando R o sobre el icono del micrófono (*New Receiver*) añadimos receptores.

9.3 CÁLCULOS DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Lo primero que haremos será hacer una estimación del tiempo de reverberación mediante teoría estadística.

Para ello tenemos que abrir primero la *Materials list* y luego seleccionar la opción *Quick Estimate* en el menú *Materials*.

Nos aparece un grafico (Figura 4) que nos muestra el tiempo de reverberación de la sala (RT) en segundos para distintas frecuencias según 3 métodos distintos: ecuación de Eyring, de Sabine y de Arau-Puchades. Estos métodos cambian en cuanto a precisión y complejidad de cálculo.

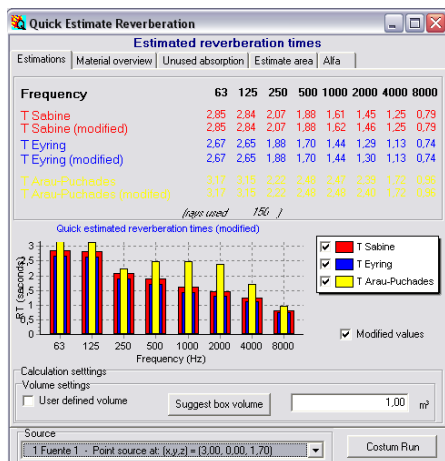


Figura 4: Tiempo de reverberación.

En la pestaña *Material Overview* podemos ver la absorción de cada uno de los materiales según la frecuencia Figura 5.

Esto es muy útil ya que nos puede ayudar a ajustar los materiales de la sala si notamos que hay excesiva absorción o demasiada reflexión para algunas frecuencias. Cabe destacar también que el aire realmente afecta mucho en altas frecuencias y las

atenúa por absorción. La pérdida de altas frecuencias provoca una pérdida en el “brillo” de la música.

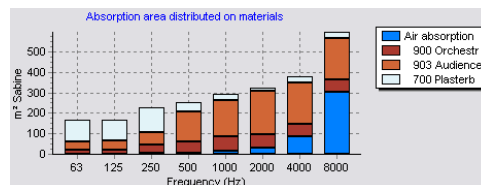


Figura 5: Distribución del área de absorción en los materiales por octava de frecuencia.

9.4 ¿Y COMO SUENA LA SALA?

Las simulaciones y los cálculos para mejorar una sala están muy bien, pero en el fondo lo que nos gustaría es saber como suena. Para eso en Odeon existe la Auralización que crea un entorno sonoro virtual que simula el sonido en la sala. Es decir, que seleccionando un receptor podemos saber cómo se escucharía cierto sonido en dicha sala.

Sin entrar en detalles, para que el programa pueda hacer los cálculos hay que establecer una respuesta al impulso de la sala lo suficientemente larga.

9.5 ODEON NOS PERMITE SIMULAR COMO SONARA NUESTRA SALA

Ahora realizamos los cálculos necesarios para crear el sistema que obtiene la respuesta al impulso de la sala. Para ello apretamos el icono *Run All Jobs* que lo se encuentra tanto en los iconos de la derecha como en el menú *Job Lists*.

Una vez hechos los cálculos, si no hay errores los trabajos aparecerán en verde. Para escuchar el sonido de la sala se debe pulsar en la opción *Streaming Convolution* del menú *Job Lists* (también están en los iconos de la derecha).

Nos sale una nueva ventana que permite en la parte superior seleccionar la señal de entrada. Por defecto trae 3 señales. Una de aplausos (bastante parecido a un impulso o delta), otra de música y otra de voz. Si seleccionan *Listen to input signal* y hacemos click en *play* escucharemos el fichero original. Si lo deseleccionamos escucharemos como se oíría ese sonido en esa sala en la situación de uno de los receptores (el que tengamos seleccionado).

9.6 SIMULACION CON ODEON

En la parte inferior se puede seleccionar el otro trabajo, se puede disminuir la ganancia si el volumen está muy alto (o aumentarla en caso contrario) y se puede ver la sala desde la posición del receptor como si estuviéramos en la sala además de escucharla.

Ahora podemos probar a cambiar materiales o fuentes en la sala.

9.7 ¿Y QUE MÁS PUEDO HACER?

Abriendo una de las salas predefinidas distinta a la *Example*, por ejemplo el *Hagia Irene*. Abre el *Job*

List y aparecerán ya un montón de trabajos predefinidos y en algunas salas como esta, ya calculados (en verde). Además de escuchar como hicimos antes, podemos pulsar en la opción *View Grid Response* del menú *Job List*. Aparece una maya de colores sobre el edificio que representan los niveles de algún parámetro. Estos parámetros se cambian con los cursores hacia arriba y abajo y en frecuencia con los cursores izquierda y derecha. Algunos parámetros de fácil explicación son:

SPL: Nivel de presión sonora

T₃₀: una medida del tiempo de reverberación.

LF: Eficiencia Lateral. Es una relación entre el sonido que viene frontalmente (directo) y lateralmente (normalmente reflexiones).

STI: Índice de transmisión del habla. Indica si se entiende bien al oyente. Puede tomar valores de 0 (no se entiende nada) a 1 (se entiende de maravilla). Las reflexiones estropean el parámetro.

Estos parámetros se fijaran de acuerdo al uso que vaya a tener la sala. Por ejemplo una conferencia en una sala determinada puede ser que la oratoria se escuche relativamente mal, es decir, las frases del orador no se entienden demasiado bien y, sin embargo, si escuchamos música en dicha sala es posible que nos haya gustado como suena.

Este problema está relacionado con la reverberación del sonido y es complicado conseguir una "sala perfecta" para todo tipo de uso.

Sin embargo, si disminuimos mucho la reflexión de las superficies de la sala y tratamos de dar algún tipo de concierto musical en la misma vamos a notar que el sonido está "apagado" sin fuerza. Un cierto nivel de reverberación para la música (ojo, tampoco debe ser excesiva) va a provocar un sonido más envolvente, con mayor "calidez". De ahí que sea complicado realizar una sala multiusos [6].

10. CONCLUSIONES

Analizando los tiempos de reverberación calculado de la sala con los criterios de diseño encontramos que este tiempo es demasiado elevado para un aula o laboratorio, lo cual no favorece a la inteligibilidad de la palabra y dicho grado aumenta a medida que el tiempo de reverberación es menor. Dado que este término es de vital importancia debemos realizar modificaciones en la estructura del recinto para lograr llevar el mismo a valores aceptables. Esto se lograría haciendo un tratamiento acústico al techo donde existe la posibilidad de colocar junto con el cielo rasó un filtro de segundo orden para lograr que las reflexiones del techo se minimicen, también podríamos realizar en las paredes laterales también un tratamiento para cambiar los modos de resonancias los cuales como calculamos se encuentran en el orden de los 100 a 200 Hz.

Por ello debemos hacer énfasis en mantener el RT lo más bajo y constante posible respecto a las bajas frecuencias ya que la reverberación produce un empeoramiento del grado de la inteligibilidad de la palabra. Por otro lado en las altas frecuencias existe

una disminución inevitable de los valores de RT debido a la absorción producida por el aire.

11. REFERENCIAS

[1] Yoichi A. and Schoeder M., "*Architectural acoustics*", Springer-Verlag. Berlin-New York, 1985.

[2] Cremer, L. and Müller H.A., "*Principles and Applications of Room Acoustics*", Applied Science Publishers Ltd. England Edicions 1982.

[3] Barron M. and Marshall A., "*Spatial Impression Due to Early Lateral Reflections in Concert Halls: the Derivation of a Physical Measure*", Journal of Sound and Vibration, 1981.

[4] Carrión Isbert A., "*Diseño acústico de espacios arquitectónicos*", Edición de la Universitat Politècnica de Catalunya UPC, Barcelona, España, 1998.

[5] Giner Rubio J., "*Tesis Doctoral*" Directores: Dr. Carmelo Militello Militello y Dr. Amando García Rodríguez, UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA, OCTUBRE 1997.

[6] Sobreira, E. A., "*Ingeniería Acústica*". Servicio de Publicaciones de Teleco Vigo. 2003.

[7] Fletcher, N. and Rossing, T. "*The physics of the musical instruments*". Springer-Verlag, 1991.

[8] Kuttruff H, "*Room Acoustics*". Elsevier, 4th Edition. 2000.

12. DATOS BIOGRAFICOS

Germán E. Vargas, Nacido en Córdoba. Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Sus intereses son: Electrónica Aplicada, Sistemas de Comunicación, Técnicas digitales. e-mail: gernesto.v@gmail.com.

Gerardo, Pellis, Nacido en Monte Maíz – Córdoba. Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Sus intereses son: Sistemas de control, Sistema Biomédicos, Medidas electrónicas. email: Gerardo_pellis@hotmail.com.

Emanuel, Zambroni, Nacido en Vicuña Mackenna - Córdoba. Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina. Sus intereses son: Electrónica de Potencia, Sistemas de Comunicación, Técnicas digitales, Sistemas de control. e-mail: zambroni.emmanuel@gmail.com.