

06. ACUSTICA DE RECINTOS

presentación preparada por:
Arq. Ricardo Estellés Díaz
diagramación de impresión:
Bach. Alejandro Fernández Rodeiro

2007

ACUSTICA DE RECINTOS Propagación del sonido en espacios cerrados

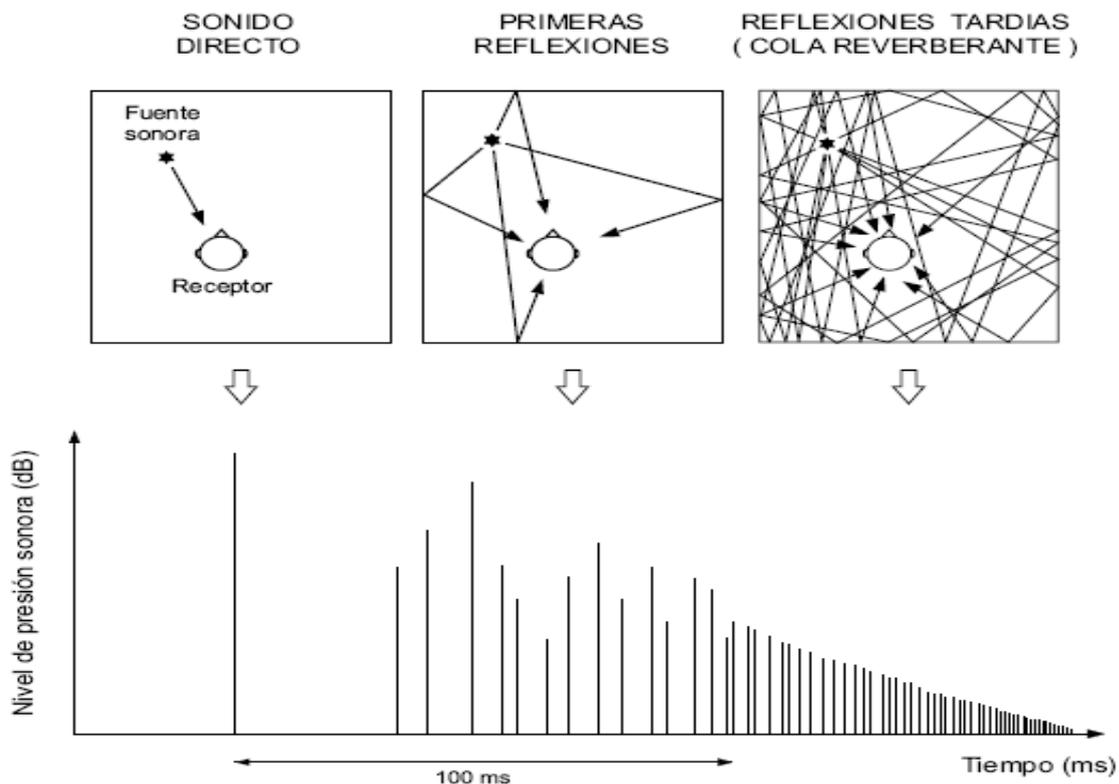
6.1_ Propagación del sonido

La energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre; mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado)

6.2_ Propagación en el interior de un local

En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora y la potencia de esta, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, la potencia de la fuente y el grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas.

Cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como al de las sucesivas reflexiones.



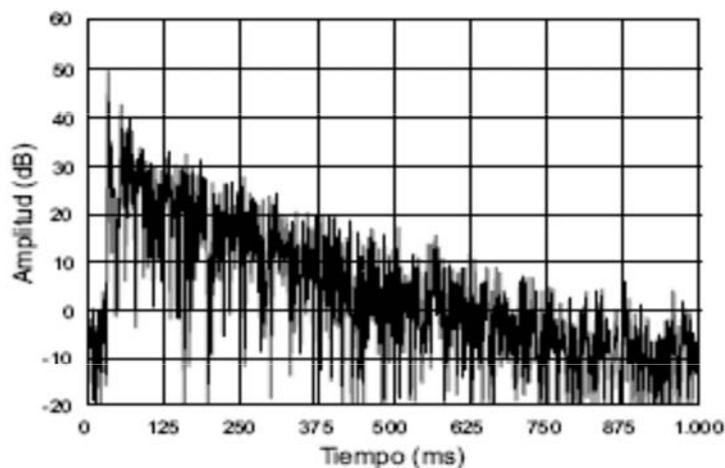
6.3_ Enfoque temporal

En un recinto real, la manera más elemental de obtener dicha representación gráfica es emitiendo un sonido intenso y breve como, por ejemplo, un disparo.

En la actualidad existen sofisticados equipos de medida basados en técnicas TDS ("Time Delay Spectrometry") o MLS ("Maximum Length Sequence") que permiten obtener en cada punto de interés la curva de decaimiento energético, denominada curva energía-tiempo ETC ("Energy-Time Curve") de forma rápida, precisa y automatizada.

A partir de la obtención de dicha curva en distintos puntos del recinto considerado es posible extraer una gran cantidad de información sobre las características acústicas del mismo.

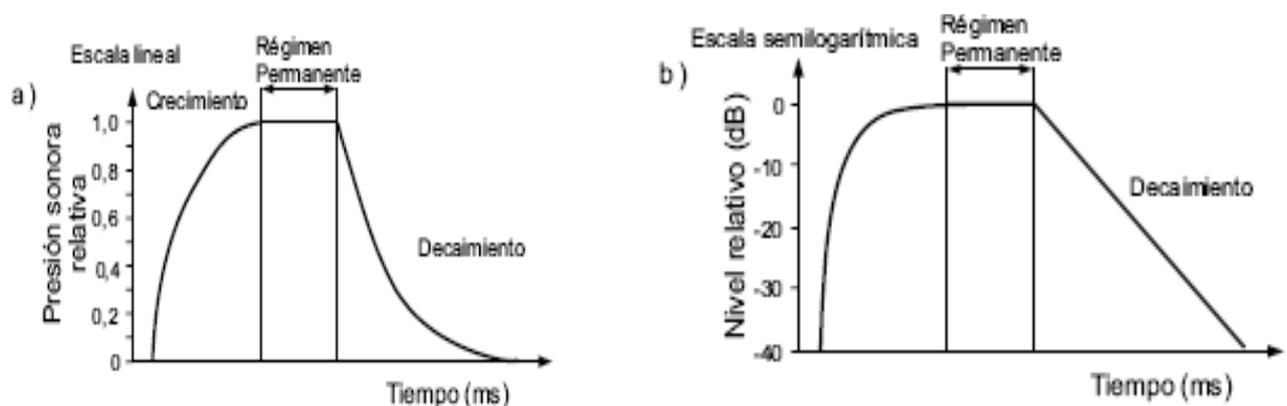
En la figura se muestra una curva ETC medida en un punto de un recinto. En abscisas se indica el tiempo, expresado en ms (milisegundos), mientras que en ordenadas se indica el nivel, expresado en dB.



De lo anterior surge que el nivel sonoro producido por un sonido singular, tiene una determinada tasa de extinción (velocidad con que decrece el nivel sonoro), siendo esta característica la cual distingue la propagación al aire libre de la que se realiza en el interior de un recinto.

Se puede analizar desde el punto de vista teórico el comportamiento de la presión sonora y el nivel sonoro en dB.

En las figuras a continuación se muestra la evolución teórica de la presión sonora en un punto de un recinto al conectar y posteriormente desconectar una fuente sonora



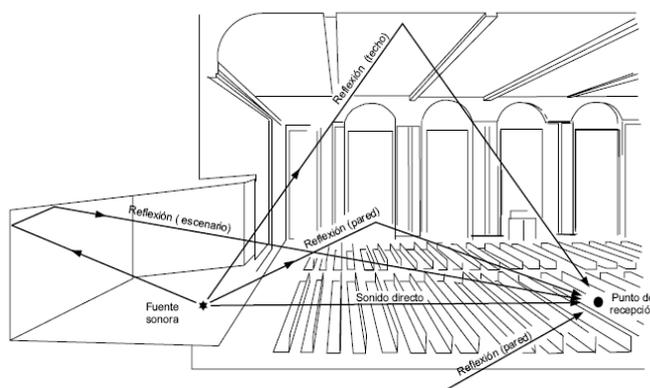
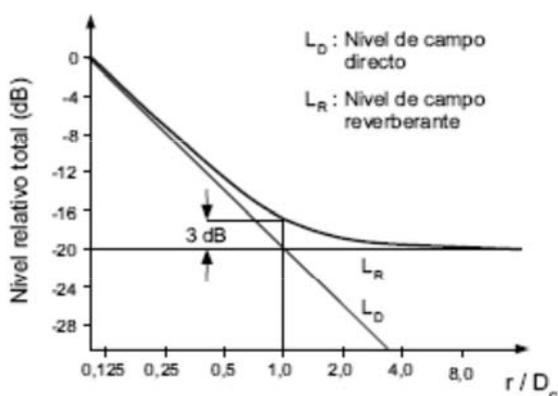
6.5_ Enfoque espacial

La relación entre el sonido directo y el reverberado que alcanzan a un receptor depende de la ubicación relativa de éste con respecto a la fuente sonora.

El nivel sonoro directo dependerá básicamente de la potencia de la fuente y la distancia del receptor a la misma, comportándose bajo las mismas leyes de propagación del sonido al aire libre:

$$L_d = L_w - 20 \lg d - 11 + ID \tag{3.1}$$

En cuanto al sonido reverberado, debemos considerar que también depende de la potencia de la fuente, de la calidad reflejante de los cerramientos y del camino recorrido por los rayos reflejados que, en su conjunto, forman el fenómeno de la reverberación.



Si midiéramos el nivel sonoro que produce una fuente puntual dentro de un recinto, notaríamos que después de alejarnos una cierta distancia de la fuente, el nivel sonoro permanece aproximadamente constante.

Este experimento nos indica que el nivel sonoro reverberado (L_r) resulta constante, siendo su valor el que surge de aplicar la siguiente fórmula:

$$L_r = L_w - 10 \log CL + 6 \tag{6.4}$$

donde:

L_r = nivel sonoro reverberado en dB

L_w = nivel de potencia sonora de la fuente en dB

CL = constante del local

siendo:

$$CL = \frac{A_t}{(1-a_m)} \tag{6.5}$$

donde:

CL = constante del local

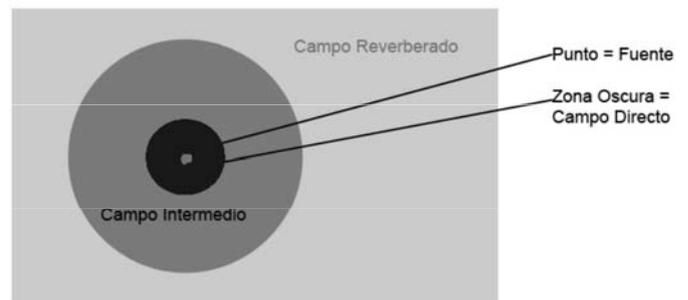
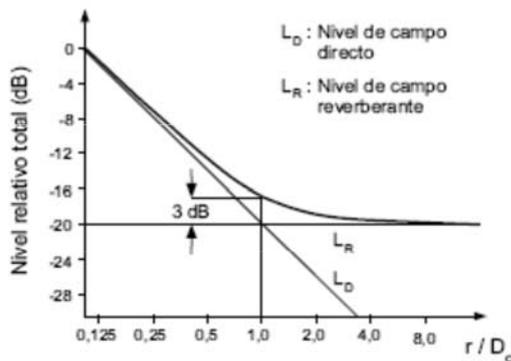
A_t = absorción total del recinto en sabines

a_m = coeficiente medio de absorción de las superficies interiores del recinto

6.6_ Campos sonoros

Llamamos campo directo a la región del recinto donde predomina el nivel sonoro directo (L_D) y campo reverberado a aquella región en donde predomina el nivel sonoro reverberado (L_R).

El punto de equilibrio de ambos campos representa un aumento de 3 dB respecto al nivel de los mismos.

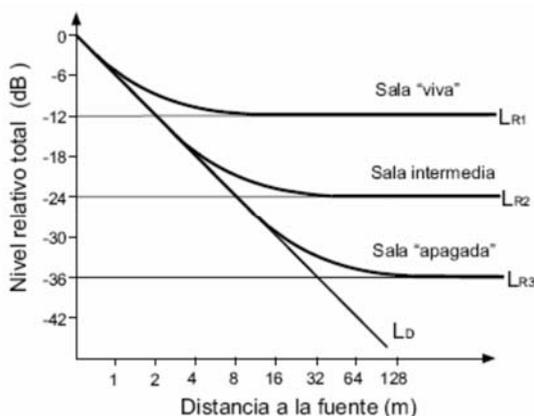


Cuando varían las condiciones de absorción del local considerado varían las relaciones entre los campos acústicos del recinto.

Al aumentar la absorción disminuye el nivel sonoro reverberado (L_R) produciendo un aumento de la zona de predominio del campo directo.

Recíprocamente al disminuir la absorción aumenta el nivel reverberado (L_R) produciendo un aumento en la zona de predominio del campo reverberado.

Los recintos muy reverberantes se llaman "vivos", mientras aquellos recintos poco reverberantes se llaman "apagados", "sordos" o "muertos", esta situación se da cuando existe mucha absorción en el local, estando α (coeficiente de absorción.) cercano a 1



6.7_ Enfoque estadístico

Cuando en un recinto no se conoce o no se puede determinar a priori la ubicación de las fuentes sonoras, el enfoque espacial resulta inaplicable, no pudiéndose determinar analíticamente L_D y L_R

En esta situación o cuando se trata de locales sin una exigencia acústica muy específica se puede recurrir al enfoque estadístico.

Conociendo el nivel de potencia sonora (L_w) de las fuentes existentes en el recinto, y la absorción (A_t) del mismo, se puede determinar el nivel sonoro medio (L_m) aplicando la siguiente fórmula:

$$L_m = L_w - 10 \log A_t + 6 \quad (6.6)$$

donde:

L_m = nivel sonoro medio en dB

L_w = nivel de potencia sonora de la fuente en dB

A_t = absorción total del recinto en sabines

6.8_ Enfoque ondulatorio: modos propios de una sala

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o modos propios de la sala.

Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora (L_{ps}) que varía en función del punto considerado.

El estudio analítico de los modos propios se realiza mediante la denominada acústica ondulatoria que, conjuntamente con la acústica geométrica (enfoque espacial) y la estadística (enfoque estadístico) anteriormente expuestas, constituyen las tres teorías clásicas que hacen posible conocer con rigor el comportamiento del sonido en un recinto.

El número de modos propios es ilimitado, si bien su distribución a lo largo del eje de frecuencias es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual confiere un sonido característico a cada sala. Dicho sonido recibe el nombre de "coloración" y normalmente se pone de manifiesto en espacios de dimensiones relativamente reducidas, como por ejemplo los estudios de grabación y los salones de clase pequeños.

Los valores de las frecuencias propias asociadas a los diferentes modos propios dependen de la geometría y de las dimensiones del recinto y, en general, su determinación resulta muy compleja.

Únicamente cuando se trata de recintos de forma paralelepédica con superficies totalmente reflejantes es posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la siguiente fórmula:

Fórmula de Rayleigh

$$f_{(l,m,n)} = \frac{C}{2} \sqrt{(l/a)^2 + (m/b)^2 + (n/c)^2} \quad (6.7)$$

donde:

$f_{(l,m,n)}$ = frecuencia o modo propio en Hz asociado a los valores l, m, n

l, m, n = números enteros cualquiera

C = velocidad de propagación del sonido en m/seg

a, b, c = dimensiones en mts de la sala tal que $a \geq b \geq c$

Cada combinación de valores l, m, n da lugar a una frecuencia y modo propio asociado que recibe el nombre de modo propio l, m, n . Por ejemplo, la combinación: $l = 2, m = 1, n = 1$ da lugar al modo propio 2, 1, 1.

Partiendo de que la existencia de modos propios es inevitable, conviene elegir una relación entre las dimensiones de la sala de manera que la distribución de los mismos en el eje de frecuencias sea lo más uniforme posible.

De esta manera se consigue evitar concentraciones de energía en bandas estrechas de frecuencias o, lo que es lo mismo, coloraciones intensas del sonido.

A título de ejemplo, en la figura siguiente se representa la distribución de los modos propios más significativos de dos salas: la primera, con una relación óptima entre sus dimensiones y la segunda, de forma cúbica.

a) sala de dimensiones: $l_x = 6.25\text{mts}$ $l_y = 3.75\text{mts}$ $l_z = 2.5\text{mts}$



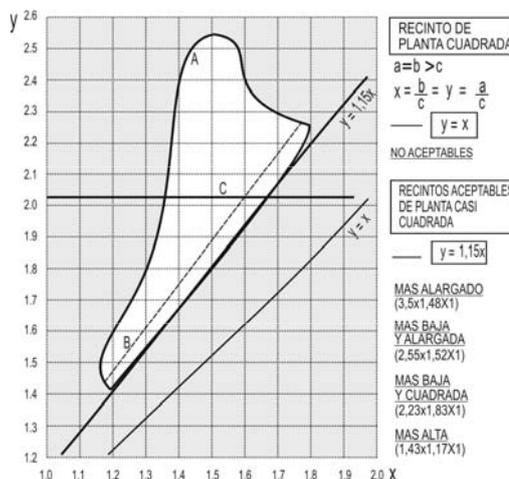
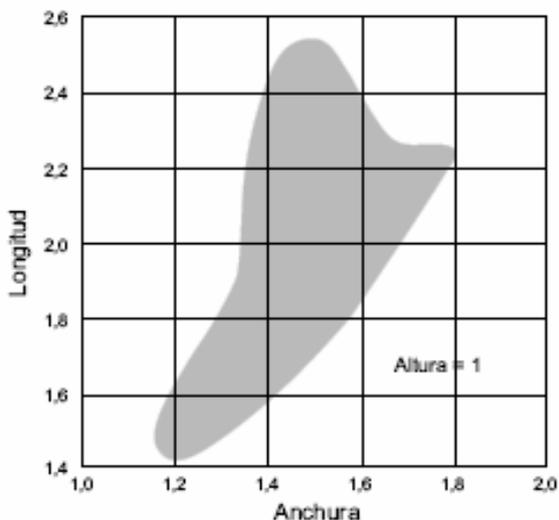
b) sala de dimensiones: $l_x = 4.00\text{mts}$ $l_y = 4.00\text{mts}$ $l_z = 4.00\text{mts}$



Se observa claramente que, en el primer caso, la distribución es uniforme, mientras que en el segundo existe una concentración de modos propios que provocará, sin lugar a dudas, la aparición de coloraciones.

En la figura siguiente se representa una zona sombreada indicativa del conjunto de relaciones recomendadas entre las dimensiones a y b de una sala rectangular (suponiendo una dimensión mínima normalizada de valor 1), con objeto de obtener una distribución lo más uniforme posible de sus frecuencias propias.

Criterio de Bolt



Por otra parte, y como se ha mencionado anteriormente, la densidad de modos propios aumenta con la frecuencia. Ello significa que, a partir de una cierta frecuencia, el concepto de coloración del sonido deja de tener sentido, ya que una gran densidad de modos propios es equivalente a la ausencia de éstos, por el hecho de que dejan de existir concentraciones discretas de energía.

La fórmula empírica que permite calcular, para cada sala, la frecuencia límite superior a partir de la cual los modos propios tienen una influencia prácticamente nula, es la siguiente:

$$f_{\max} = 1849 \sqrt{(TR_{\text{med}}/V)} \quad (6.8)$$

donde:

f_{\max} = frecuencia límite superior en Hz

TR_{med} = tiempo medio de reverberación en seg (promedio del TR para las bandas de octava centradas en 500Hz y 1 KHz)

V = Volumen de la sala en m^3

De la anterior se desprende que el efecto de los modos propios tiene una mayor incidencia cuanto más pequeña es la sala en consideración, como es el caso de los estudios de grabación y las salas de los mismos.

La manera práctica de minimizar dicho efecto es mediante la utilización de elementos resonadores, siendo las frecuencias propias cuyo efecto se pretende atenuar aquellas que se sitúan por debajo de los 200 Hz.

En el caso de recintos grandes, como teatros y salas de conciertos, la coloración del sonido a causa de los modos propios es prácticamente nula y, por tanto, no se tiene en cuenta en la fase de diseño.

6.9_ Referencias bibliográficas específicas

Beraneck, Leo L.:

“Acústica” Editorial Hispanoamericana S.A. Buenos Aires (Arg.), 1961

Knudsen, Vern O; Harris, Cyril M.:

“Acoustical Designing in Architecture”. American Institute of Physics, 1978

Everest, F. Alton:

“The Master Handbook of Acoustics”. McGraw-Hill. Blue Ridge Summit (USA), 1989

Harris, Cyril M.:

“Handbook of Acoustics”. McGraw-Hill. Blue Ridge Summit (USA), 1989

Antoni Carrión Isbert :

“Diseño acústico de espacios arquitectónicos”

Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1998

Miyara, Federico:

“Acústica y Sistemas de Sonido” UNR Editora. Rosario (Arg.), 1999

Hakas, Jorge:

“Proyecto de Memoria General Constructiva (parte Acondicionamiento Acústico)”

Ministerio de Transporte y Obras Públicas , 2003