

Introducción a la acústica

Marta Ruiz Costa-jussà
Helenca Duxans Barrobés

PID_00188066



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

Índice

Introducción.....	5
Objetivos.....	6
1. Definición y caracterización del sonido y del ruido.....	7
1.1. Propagación del sonido, presión sonora, amplitud del sonido, potencia e intensidad	7
1.2. La longitud de onda, la frecuencia, el período y la velocidad de propagación	8
1.3. Espectro del sonido y densidad espectral	9
1.4. Caracterización de una sala mediante la respuesta impulsional. Auralización	13
2. Percepción humana del sonido. Fenómenos sonoros.....	15
2.1. Estructura del oído humano	15
2.2. Percepción del sonido	16
2.2.1. Niveles audibles según la frecuencia. Curvas isofónicas	17
2.2.2. Enmascaramiento del sonido	19
2.3. Medición del sonido. Sonómetro y filtros de ponderación	21
3. Fuentes sonoras y propagación del sonido.....	23
3.1. Ejemplo de fuente sonora: el mecanismo de fonación humana	23
3.2. Propagación del sonido en recintos abiertos y cerrados. Reflexión y absorción	24
3.3. Reverberación	25
3.4. Eco	28

Introducción

Por un lado, oír es uno de los medios más importantes de la supervivencia en el mundo animal. Por otro, el habla es una de las características más distintivas del desarrollo humano. Por lo tanto, el objetivo de aprender acústica puede estar motivado desde el ámbito musical (por ejemplo, aprender a afinar un instrumento) hasta el ámbito arquitectónico (por ejemplo, aprender a diseñar un bloque de pisos en el que no se oiga a los vecinos), pasando por el ámbito sociológico (por ejemplo, saber cómo afecta el ruido ambiental de una ciudad y a qué niveles se debe reducir este idealmente).

Para obtener un conocimiento correcto del mundo de la acústica en cualquiera de las ramas existentes (por ejemplo, bioacústica, psicoacústica o electroacústica), debemos conocer los conceptos principales relacionados con el sonido, que es lo que veremos en este módulo.

Ejemplo

Escuchemos, durante unos segundos, a Gaspar Hernández en su programa radiofónico *L'ofici de viure* desde los estudios de Catalunya Ràdio. Ahora bien, ¿qué sucedería si la sala desde la que habla Gaspar estuviera acondicionada de otro modo? Si esto fuera así, lo oiríamos de forma muy diferente. El acondicionamiento de salas es uno de los ejemplos de la aplicación de la acústica.

Objetivos

En este módulo veremos los conceptos básicos relacionados con el sonido que nos permitirán tener una base sólida sobre acústica. En general, definimos la acústica como la ciencia que estudia el sonido. Por lo tanto, veremos qué es el sonido, cómo lo percibimos, cómo lo medimos, cómo se genera y cómo se propaga. Fundamentalmente, al acabar este módulo deberéis ser capaces de lo siguiente:

1. Explicar y aplicar los conceptos básicos que definen el sonido: velocidad de propagación, longitud de onda y nivel de presión sonora.
2. Comprender básicamente cómo funciona la acústica fisiológica, es decir, cómo percibe el sonido el oído humano, cómo emite el sonido el sistema de fonación humana y qué directividad tiene la voz humana.
3. Conocer las herramientas de percepción del sonido (curvas isofónicas, filtros de ponderación, nivel de ruido de fondo) y de medición del sonido (sonómetro).
4. Saber qué tipología de fuentes sonoras existe y el comportamiento que tienen en diferentes tipos de recintos. Asimismo, aprender cómo se propaga el sonido y qué es la reverberación y la inteligibilidad del sonido.
5. Conocer de manera básica herramientas que facilitan el procesamiento de audio, como Audacity y Matlab.

1. Definición y caracterización del sonido y del ruido

El **sonido** se puede definir como una onda de presión que transporta información y que, para que exista, necesita como mínimo una fuente que la origine y un medio físico por el que se propague. Una definición más extensa del sonido también requiere un receptor, entre otras cosas, para que pueda juzgar si la onda en cuestión transporta información o no.

El **ruido** se puede definir como sonido sin información.

Para diferenciar entre sonido y ruido necesitamos fijarnos en la definición extensa de sonido, porque la información es relativa al receptor que percibe la sensación audible. Por ello, en la práctica, es este receptor el que diferencia entre sonido y ruido.

Entendiendo el sonido como una onda, podemos utilizar diferentes parámetros que la caractericen (figura 1). A continuación, definimos brevemente los parámetros más importantes.

1.1. Propagación del sonido, presión sonora, amplitud del sonido, potencia e intensidad

La **propagación del sonido** se hace por compresión y dilatación del medio. Así, cuando se da un golpe en un tambor, la tapa de este se desplaza hacia adentro, se dilatan las partículas de aire cercanas a la superficie del tambor y, cuando la tapa se desplaza hacia afuera, se contraen las partículas de aire. Por otra parte, las partículas de aire más cercanas al tambor van contrayendo y dilatando las partículas (también de aire) cercanas a ellas mismas.

La **presión sonora (P)** es la magnitud que describe la variación de la fuerza de la onda ondulatoria ejercida sobre el medio (por unidad de superficie). Así, la presión sonora es causada por la propagación de la perturbación sonora. Se mide en pascales (Pa) o, dicho de otra manera, fuerza por unidad de área. El oído humano puede percibir desde 20×10^{-6} (20 μ Pa) hasta 200 Pa (200.000.000 μ Pa), y no es operativo hablar, por ejemplo, de 232.121 μ Pa. Por ello, a menudo se habla de **nivel de presión sonora (L)**, elemento que permite definir la cantidad de presión sonora en términos relativos:

$$L = 10 \log \frac{P}{P_{ref}}$$

donde P_{ref} es la presión sonora de referencia y L se mide en decibelios (dB).

Para saber más

En aplicaciones acústicas, una de las magnitudes de referencia son los dB SPL, donde un sonido de $20 \mu\text{Pa}$ ($20 \times 10^{-6} \text{ Pa}$) son 0 dB SPL. Las siglas SPL significan *nivel de presión sonora* o *sound pressure level*, y normalmente no se especifican dado que por convención, si no se dice nada, los decibelios son dB SPL. Por lo tanto, si queremos calcular el nivel de presión sonora de un medio concreto en dB SPL, la presión sonora de referencia (P_{ref}) es de $20 \mu\text{Pa}$.

La **amplitud (A)** es la cantidad máxima (en términos absolutos) de presión sonora que ejerce la onda sobre el medio. El valor máximo (en términos absolutos) que puede adquirir la onda se conoce como *cresta* si es positivo y como *valle* si es negativo. El punto en el que la onda se anula se conoce como *nodo*. La amplitud se define en decibelios.

La **potencia sonora** es la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo. Se mide en watts (W). Igual que ocurría con la presión sonora (P) a menudo se habla de nivel de potencia. Este permite definir la potencia sonora en términos relativos a una potencia de referencia, se mide en decibelios y también se conoce como **volumen**.

La **intensidad sonora** es la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo y por superficie. Por lo tanto, es la cantidad de potencia sonora por superficie. Se mide en $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. A menudo, también se habla de nivel de intensidad sonora, que se mide en decibelios.

1.2. La longitud de onda, la frecuencia, el período y la velocidad de propagación

La **longitud de onda (λ)** se define como la distancia, medida en la dirección de propagación de la onda, entre dos puntos idénticos. Es una medida de longitud, como dice el nombre, y se mide en metros.

La **frecuencia (f)** tiene una relación inversa con el concepto de longitud de onda y, como sabemos, es el número de repeticiones por unidad de tiempo. O, dicho de otra manera, el número de oscilaciones por unidad de tiempo. Se mide en hercios (Hz) o ciclos por segundo (c/s).

Ejemplo

En este ejemplo veremos cómo se generan diferentes tonos puros (como vemos en la figura 1) con Audacity.

Abrid Audacity. Id al menú *Genera*, seleccionad *Tono* y la frecuencia y pulsad *Genera un tono*.

A continuación, generaremos dos tonos de octavas diferentes. Entendemos por *octava* el intervalo de frecuencias en el que la frecuencia máxima es el doble de la frecuencia mínima (ejemplos de octava: 300 Hz y 600 Hz, de 1 kHz a 2 kHz).

Generemos un tono de 1 kHz y un tono de 2 kHz.

Nota

No se debe confundir presión sonora, amplitud, potencia sonora e intensidad sonora. Por otra parte, observad que todas estas magnitudes son directamente proporcionales: cuando crece una, crecen todas las demás, y al revés.

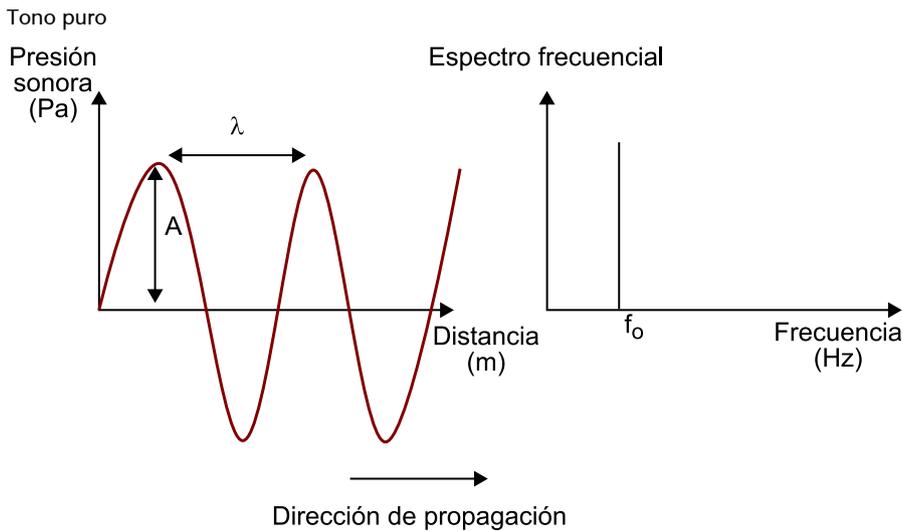


Figura 1. Representación gráfica de un tono puro, indicando algunos de los parámetros o elementos básicos de este tono

El **período** (T) de una onda periódica es el intervalo de tiempo que hay entre dos puntos idénticos de la onda en cuestión. Por lo tanto, el período de una onda no periódica es infinito. El período se mide en segundos y es la inversa de la frecuencia.

La **velocidad de propagación** (c) es el ritmo al que se propaga la onda y depende del medio físico en el que esté. Se mide en metros por segundo (m/s). Se relaciona con la longitud de onda y la frecuencia:

$$c = \lambda f$$

Por definición sabemos que el sonido, dado que es una onda de presión, no se propaga en el vacío. La velocidad de propagación varía según el medio físico en el que se propague el sonido. Por lo tanto, la velocidad de propagación es mayor en los sólidos, menor en los líquidos y todavía más pequeña en los gases. Veamos algunos ejemplos de velocidad de propagación¹:

- En el aire (a una temperatura de 20 °C) es de 340 m/s.
- En el agua (a 35 °C) es de 1.493 m/s.
- En la madera (a 25 °C) es de 3.900 m/s.

⁽¹⁾La velocidad de propagación del sonido depende del medio físico donde se de la propagación, no de las características del sonido ni del emisor. Por lo tanto, todos los sonidos se propagan a la misma velocidad en un mismo medio. Si no fuera así, sería muy difícil, por ejemplo, coordinar las orquestas: los sonidos emitidos por un violín y un tambor no coincidirían en el tiempo, dado que tienen características diferentes (como, por ejemplo, la amplitud y la forma).

1.3. Espectro del sonido y densidad espectral

Una onda periódica está formada por un conjunto de señales sinusoidales, cada una con una frecuencia múltiple de la frecuencia fundamental. Así, cuando oímos un sonido de 100 Hz, percibimos ondas sinusoidales de frecuencias 100 Hz, 200 Hz, etc., que son los armónicos de la frecuencia original. Solo en caso de que el sonido esté formado propiamente por una onda sinusoidal

tendremos un tono puro, es decir, una única frecuencia. Así, un sonido puede tener asociada una frecuencia o unas cuantas frecuencias. **La representación gráfica de las frecuencias que forman el sonido se denomina *espectro***. En la figura 1 se muestra la forma de onda de un tono puro y el espectro que tiene.

Hay que tener en cuenta que la representación de la figura 1 es totalmente teórica. Si generamos un tono puro con Matlab, por ejemplo, uno a 1.000 Hz muestreado a 44,1 kHz [`t=0:1/44100:10; s=sin(2*pi*1000*t)`] y dibujamos el espectro² en decibelios (`easyspec(s, 44100)`) no obtenemos una delta ideal:

⁽²⁾Esta función aparece en el apéndice (`easyspec.m`).

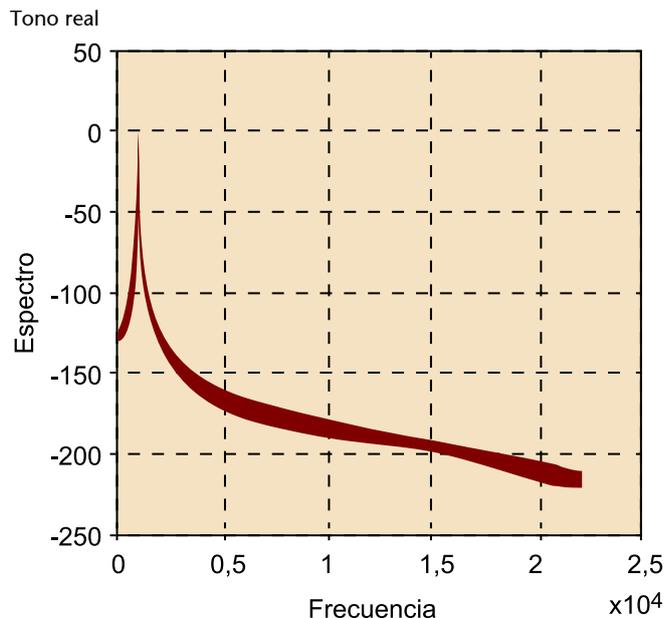


Figura 2. Representación real de un tono utilizando Matlab

La delta es el valor teórico del espectro, y el valor real se puede representar mediante una función sinc o una función gaussiana.

La delta es la representación de un tono puro de duración infinita, pero como analizamos sonidos reales estos sonidos tienen duración finita y, por lo tanto, la respuesta frecuencial queda afectada.

Nota

La sinc es una función infinita: sinc/x , y en el límite es una delta:

$$\lim_{a \rightarrow 0} \frac{1}{a} \text{sinc}\left(\frac{x}{a}\right) = \delta(x)$$

Para saber más

También es una delta una gaussiana en el límite:

$$\lim_{a \rightarrow 0} \frac{1}{a\sqrt{\pi}} e^{-x^2/a}$$

Por lo tanto, en la práctica, los analizadores espectrales no nos dan respuestas como la mostrada en la figura 1, es decir, una delta ideal, sino que nos dan respuestas como la de la figura de estas líneas, una delta no ideal.

En el caso del ruido, las frecuencias que lo constituyen tienen valores imprevisibles. Por este motivo, no es práctico representar el espectro frecuencial (ya que genéricamente hay una gran variedad de frecuencias y no se distinguen correctamente). En su lugar, se utiliza la densidad espectral de potencia, que es

la potencia sonora por unidad de frecuencia. Precisamente, se utiliza la **densidad espectral de potencia** porque nos informa del modo como está distribuida la potencia de la señal sobre las diferentes frecuencias que componen la señal (es decir, el espectro que tienen).

Nota

Desde el punto de vista teórico, el sonido y el ruido se analizan de manera diferente: el primero, con el espectro, y el segundo, con la densidad espectral. Ahora bien, desde el punto de vista práctico, el sonido y el ruido se analizan con la densidad espectral, porque un analizador de espectros no puede mostrar, por ejemplo, una delta.

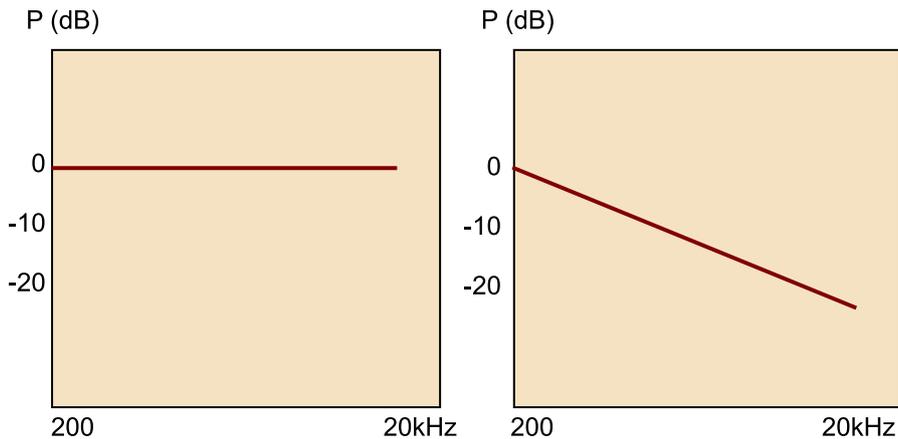
En acústica hay dos ruidos especialmente interesantes (figuras 3 y 4). Uno es el **ruido blanco**, que se caracteriza por tener una densidad espectral de potencia plana, lo que significa que el ruido en cuestión contiene todas las frecuencias y que todas tienen la misma potencia. El ruido blanco se utiliza mucho en procesamiento de la señal; por ejemplo, como hemos visto en las asignaturas *Señales y sistemas I y II*, se utiliza para determinar la función de transferencia de cualquier sistema lineal e invariante en el tiempo. Observad que si hacemos la antitransformada del ruido blanco (es una constante en frecuencia) es la función delta de Dirac. Al mismo tiempo, esta función de transferencia, en acústica arquitectónica, se utiliza para medir el comportamiento de la sala.

El otro es el **ruido rosa**, que es aquel en el que la densidad de potencia es inversamente proporcional a la frecuencia. Es decir, el ruido rosa disminuye a la mitad de cada octava. Por lo tanto, también se puede definir como aquel que tiene densidad de potencia constante por ancho de banda (por octava, por tercio de octava, etc.). De este modo, el perfil del espectro de un ruido rosa es plano cuando el eje de frecuencias sigue una escala logarítmica (graduada en octavas). Si el eje de frecuencias sigue una escala lineal, el perfil del espectro es una línea recta que baja con una pendiente de 3 dB/octava. El ruido rosa se utiliza en acústica para ecualizar³ salas y equipos de grabación, entre otras cosas. El procedimiento es el siguiente: se genera un ruido rosa entre 20 Hz y 20 kHz (el ancho de banda audible para el oído humano) y se utiliza un micrófono que recoge el sonido de la sala. Este sonido se pasa por un analizador de espectros y se ecualiza hasta que todas las bandas se encuentren en el mismo nivel. De este modo, se garantiza que no hay ninguna pérdida ni ganancia para ninguna frecuencia.

⁽³⁾Ecualizar significa modificar las diferentes amplitudes de las frecuencias que componen una señal. Generalmente, se ecualiza para compensar la respuesta de los equipos de audio y así recuperar el sonido original.

Ruido blanco y ruido rosa

Representación de la densidad espectral de potencia por frecuencias



Representación de la densidad espectral de potencia por bandas de frecuencia

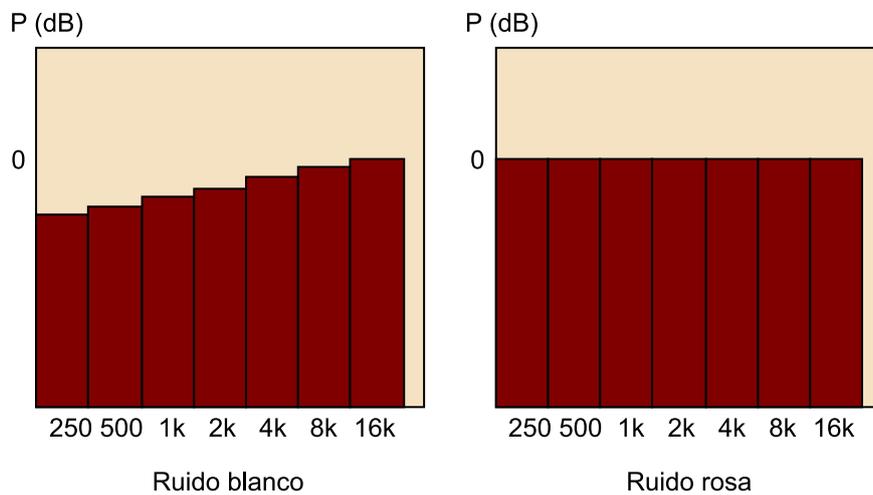


Figura 3. Representación del ruido blanco y el ruido rosa

Generación de ruido blanco en Matlab

Podemos generar ruido blanco a partir del orden siguiente en Matlab:

```
w=randn(1,100000); %wgn with a variance of 1
```

Podemos oír el ruido blanco si hacemos *sound(w)*.

Observad que en la naturaleza sí hay ruidos que generan este sonido; por ejemplo, un salto de agua.

Nota

Cuando se hace *sound(x)* la frecuencia de muestreo por defecto es de 8 kHz.

Generación de ruido rosa en Matlab

Podemos generar ruido rosa en Matlab si generamos ruido blanco y lo filtramos. Esto es lo que hace el programa siguiente:

```
Nx = 100000; % número de muestras que hay que sintetizar
B = [0.049922035 -0.095993537 0.050612699 -0.004408786];
A = [1 -2.494956002 2.017265875 -0.522189400];
%A i B son los coeficientes del filtro 1/f
nT60 = round(log(1000)/(1-max(abs(roots(A)))));
% estimación del periodo transitorio
```

```
v = randn(1,Nx+nT60);
% generación del ruido blanco
p = filter(B,A,v); % se aplica el filtro 1/f
p = p(nT60+1:end); % saltamos el transitorio
```

Podemos percibir el ruido rosa si hacemos *sound(p)*.

Si queremos ver la densidad espectral de cada uno de los ruidos, podemos utilizar el programa siguiente en Matlab:

```
H = spectrum.periodogram('kaiser');
plot(psd(H,w)) % la densidad espectral del ruido blanco es plana en f
plot(psd(H,p)) % la densidad espectral del ruido rosa disminuye
                como 1/f
```

Ruido blanco y rosa

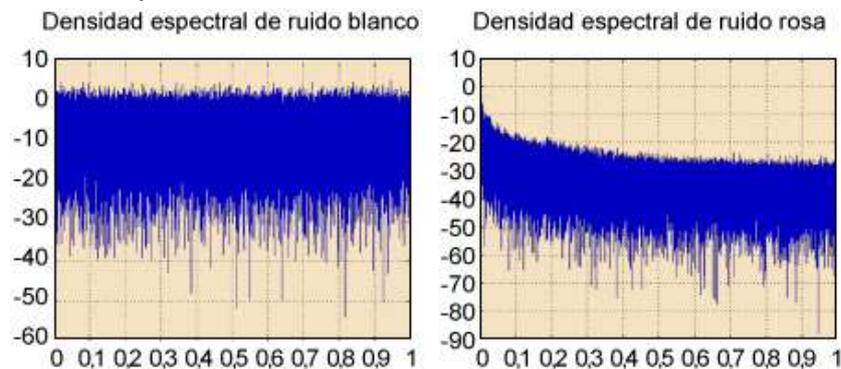


Figura 4. Potencia sonora según la frecuencia del ruido blanco y rosa. En el eje de abscisas vemos la frecuencia normalizada. El rango 0-1 se corresponde con $0-(F_m/2)$ (Hz).

1.4. Caracterización de una sala mediante la respuesta impulsional. Auralización

Como ya hemos comentado en el apartado “Definición de sistema” del módulo 2, la respuesta impulsional permite caracterizar un sistema lineal e invariante en el tiempo (SLTI). Por lo tanto, si suponemos que una sala se puede modelar acústicamente como un SLTI, tendremos una función $h(t)$, que será la respuesta impulsional de la sala. Esta función permite modelar lo que percibe el oyente en un punto determinado de la sala y según el sonido que se emite. Concretamente, esta percepción del sonido se obtiene de convolucionar el sonido y la respuesta impulsional. La respuesta impulsional depende de los acabados de la sala y de la posición de la fuente sonora, entre otras cosas. No está claro qué se debe hacer para encontrar la respuesta impulsional o función de transferencia⁴ de una sala y hay muchos estudios respecto a esta cuestión.

¿Para qué sirve la respuesta impulsional en acústica?

1) Para conocer el nivel de inteligibilidad de una sala. Es decir, para saber qué calidad tiene la acústica de una sala. Este factor es muy importante a la hora de decidir el emplazamiento de un concierto, por ejemplo.

2) Para diseñar una sala según la respuesta impulsional que se desea. Según el uso de las salas se busca que el sonido no llegue a determinados lugares (en salas de espera, por ejemplo) o que todos los sonidos lleguen sin distorsión (en salas de conciertos, por ejemplo).

3) Para hacer simulaciones acústicas.

⁽⁴⁾Como ya sabéis, la función de transferencia contiene la misma información que la respuesta impulsional, dado que no es más que la respuesta impulsional en el dominio transformado.

Referencias bibliográficas

Entre otras:

A. Carrión Isbert (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Edicions UPC.

J. O. Smith (2008, octubre). “Spectral Audio Signal Processing”.

El estudio de la respuesta impulsional ha dado lugar a lo que se conoce como **auralización**, que es precisamente la simulación auditiva. Así, la **auralización modela cómo se comporta acústicamente un determinado recinto**. La auralización diferencia entre oído izquierdo y derecho; por lo tanto, se construyen dos respuestas impulsionales (una por oído). Cada respuesta impulsional se convoluciona con la señal emitida y como resultado de esto tenemos el sonido que se oirá en la sala, en un determinado punto.

Fijaos que el primer ejemplo de este módulo es un ejemplo de auralización. Observad que el discurso de Gaspar Hernández se simula con o sin revestimiento y su inteligibilidad es muy diferente.

El sonido es una onda mecánica que se propaga en un medio determinado. Los parámetros principales que caracterizan un sonido son la propagación, la presión sonora, la amplitud, la longitud de onda, la frecuencia y la velocidad de propagación.

El espectro del sonido es la representación gráfica de las frecuencias que componen un sonido. Dado que no se puede predecir qué frecuencias componen un ruido, en este caso se utiliza la densidad espectral de potencia, que nos da la potencia sonora por unidad de frecuencia.

Existen dos ruidos que son especialmente interesantes en acústica por las aplicaciones que tienen: el ruido blanco y el ruido rosa.

El comportamiento acústico de una sala se puede modelar o simular para una determinada respuesta impulsional y esto da lugar a la auralización.

2. Percepción humana del sonido. Fenómenos sonoros

El **sistema auditivo humano** es el encargado de convertir los estímulos físicos que recibe, en forma de ondas acústicas y en impulsos eléctricos, para transmitirlos después al córtex cerebral, donde se produce la sensación de audición.

En este apartado veremos brevemente la estructura del oído humano y el mecanismo de audición. Asimismo, veremos de qué manera percibimos el sonido los humanos y qué medidas utilizamos para que se adapten a esta percepción del sonido.

2.1. Estructura del oído humano

El oído humano presenta un mecanismo muy complejo. En este apartado haremos una introducción muy breve de los elementos que lo constituyen. A menudo, para simplificar la descripción, decimos que el oído se divide en tres partes: **oído externo**, **medio** e **interno**.

Imagen del oído humano

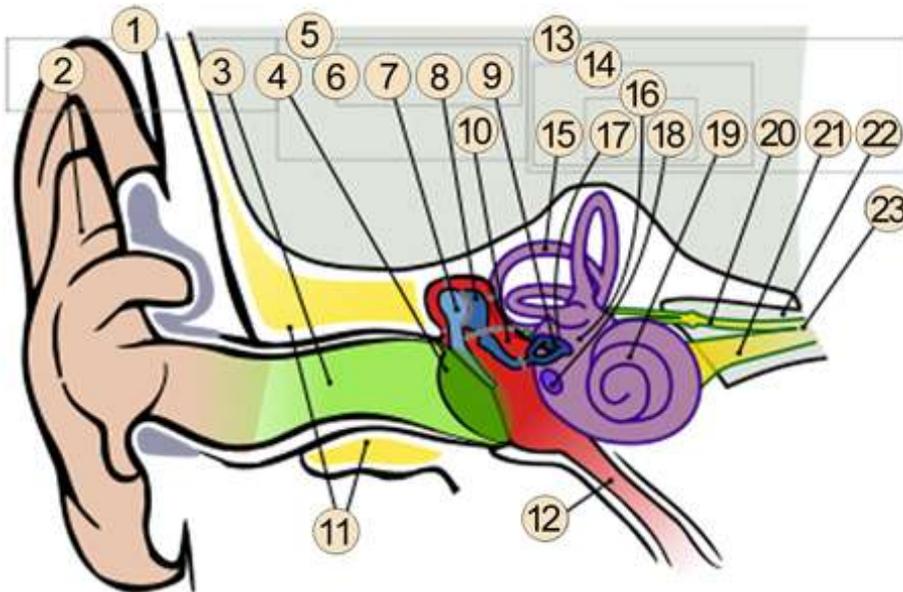


Figura 5. Anatomía del oído humano: 1: oído externo; 2: pabellón auricular; 3: conducto auditivo externo; 4: tímpano; 5: oído medio; 6: osículos; 7: martillo; 8: yunque; 9: estribo; 10: caja timpánica; 13: oído interno; 14: laberinto; 15: conducto semicircular; 16: vestíbulo; 17: ventana oval; 18: ventana redonda; 19: cóclea; 20: nervio vestibular; 21: nervio coclear; 22: conducto auditivo interno. Otros: 11: hueso temporal; 12: trompa de Eustaquio; 23: nervio auditivo. Fuente: Wikipedia

El oído está constituido por el pabellón auditivo externo, el conducto auditivo exterior y el tímpano. El primero actúa como colector del sonido y el segundo tiene una doble función: evitar el acceso directo del sonido sobre el tímpano y actuar como resonador y, así, aumentar la sensibilidad auditiva. El tímpano transforma las variaciones de presión asociadas a las ondas incidentes en vibraciones mecánicas.

El oído medio está constituido básicamente por una cavidad y cuatro ventanas; dentro de esta cavidad encontramos los “huesecitos” del oído y ciertos músculos. En esta parte, se protege el oído interno y se aumenta el nivel de presión sonora con vistas al oído interno respecto al nivel existente en el tímpano.

Finalmente, el oído interno contiene una parte ósea y una parte membranosa en forma de caracol en la que se sitúa la membrana basilar y el órgano de Corti, que es el receptor de la audición.

2.2. Percepción del sonido

La gama de presiones sonoras a las que responde el oído humano (dicho de otro modo, los niveles audibles) es muy amplia y depende de la frecuencia del sonido. Por ejemplo, con la misma intensidad sonora, los sonidos graves se perciben como si tuvieran más volumen que los sonidos agudos. Asimismo, es importante saber que **nuestro sistema auditivo responde de manera logarítmica** a los estímulos que recibe. Por ejemplo, para percibir el doble de fuerte cualquier tono puro, el nivel de presión sonora de aquel tono se debe multiplicar por 3,16 (observad que $\log 3,16 = 2$).

Actividad

Haced la comprobación de la percepción logarítmica con Audacity:

- Generad un primer tono de una determinada frecuencia con una determinada amplitud.
- Seleccionad la pestaña *Efecto* y la opción *Amplifica*.
- Probad diferentes amplificaciones.

¿En qué casos percibís un tono el doble de fuerte?

La figura 6 muestra una ilustración con los niveles de presión sonora correspondientes a diferentes ejemplos cotidianos de sonidos y ruidos.

Relación de decibelios

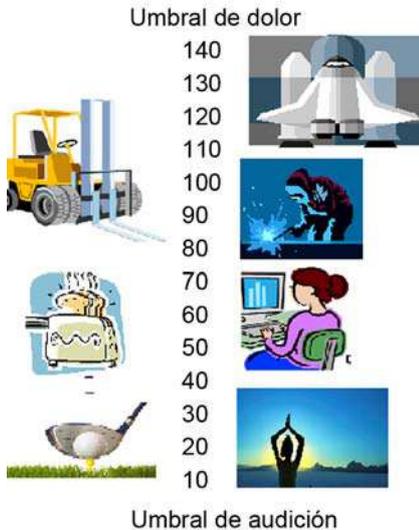


Figura 6. Cantidad de decibelios asociados a diferentes actividades

Nota

Según la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) una exposición prolongada a sonidos por encima de 85 dB puede suponer una pérdida de audición. Por lo tanto, tened cuidado con los auriculares y en las discotecas.

Podéis leer el artículo “The MP3 Generation: At Risk for Hearing Loss?” de Tom Valeo.

Precisamente, habla de la pérdida de audición que puede provocar escuchar música con auriculares con un volumen alto y de manera continuada.

2.2.1. Niveles audibles según la frecuencia. Curvas isofónicas

Como comentábamos, los niveles de presión sonora (o, dicho de otro modo, los niveles audibles) dependen de la frecuencia. Vemos en la figura 7 la relación existente entre la frecuencia y el nivel de presión sonora. Concretamente, la presión sonora más débil que se puede detectar en la frecuencia de 20 Hz es de 20 μ Pa. Este valor se toma como referencia cuando utilizamos decibelios. Por lo tanto, se establece que una **señal de presión 20 μ Pa son 0 dB**. La figura también muestra las zonas representativas de la generación sonora asociada a la voz humana y a la música (notad que el umbral de dolor se sitúa a 140 dB, que son 20 Pa).

Frecuencia y nivel de presión sonora

Nivel de presión sonora (dB)

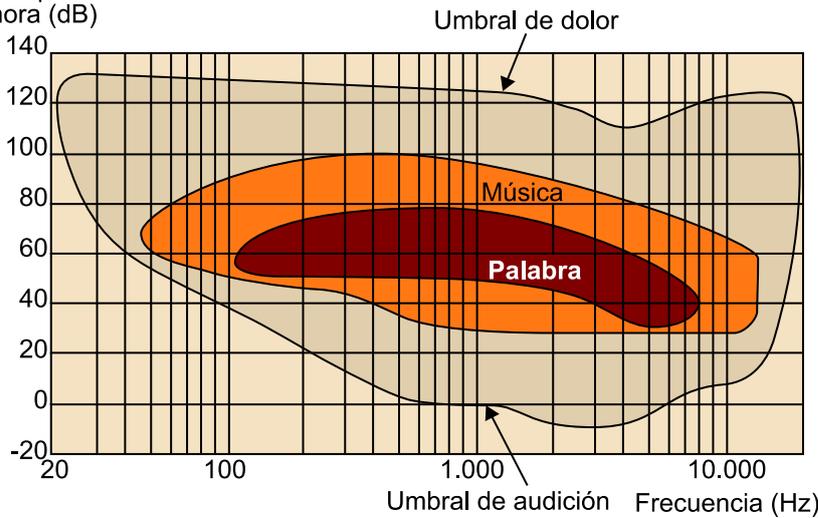


Figura 7. Relación entre frecuencia y nivel de presión sonora indicando el margen de valores de la música, la palabra y el margen audible por el oído humano. Fuente: Wikipedia.

Es importante entender que si un sonido se emite a 30 Hz solo lo percibiremos si el nivel de presión sonora es superior a 50 dB, mientras que si el sonido se emite a 4 kHz lo percibiremos si tiene un nivel de presión sonora superior a 10 dB.

Otro concepto importante son las denominadas *curvas isofónicas*. Previamente, debemos definir el fonio. **Un fonio determina el nivel de sonoridad; la sonoridad es la sensación subjetiva de percepción del sonido.** Por consenso se determinó que a 1 tono de 1 kHz y un nivel de presión sonora de 40 dB le corresponde un nivel de sonoridad de 40 fonios. A partir de aquí, tal como se muestra en la figura 8, las curvas isofónicas representan las curvas del mismo nivel de sonoridad (medido en fonios).

Curvas isofónicas

Nivel de presión sonora (dB)

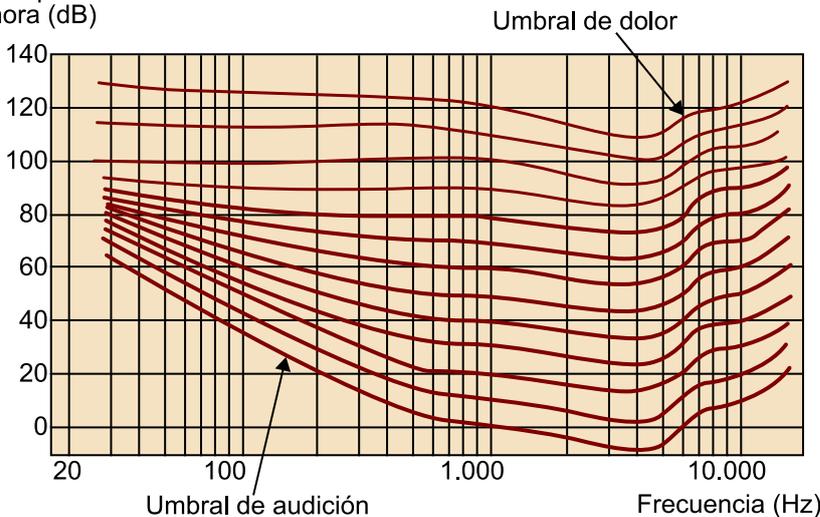


Figura 8. Representación de las curvas isofónicas según el nivel de presión sonora y la frecuencia. Fuente: Wikipedia

Nota

Si un sonido se emite a menos de 20 Hz (*infrasonido*) o a más de 20.000 Hz (*ultrasonido*), no es percibido por el oído humano. Recordemos que el oído humano solo capta ondas sonoras que oscilan entre 20 y 20.000 Hz. Hay animales que sí que lo pueden percibir; por ejemplo, un perro puede llegar hasta los 50.000 Hz.

Los límites auditivos dependen de cada persona y de la edad, dado que están relacionados con la flexibilidad del tímpano, entre otros factores. Cuanto más mayores nos hacemos, más disminuye nuestro límite agudo. Por lo tanto, la mayoría de los niños pueden percibir sonidos más agudos que los adultos.

Ejemplo

El sonido que emite un tambor o un bajo es más grave que el de una trompeta.

Observamos que:

- Con el mismo de nivel de presión sonora, el oído responde de manera distinta en función de la frecuencia. Por ejemplo, con la misma presión sonora (dB), los sonidos graves se perciben como si tuvieran más volumen que los sonidos agudos. El oído es poco sensible a los graves (que son las frecuencias bajas).
- La curva isofónica inferior no es tan lineal como las otras.

Contaminación acústica

Entendemos por *contaminación acústica urbana* el conjunto de sonidos y ruidos que circulan por el aire de una población. Las cifras medias de las legislaciones europeas marcan unos límites de 65 dB durante el día y de 55 dB durante la noche, dado que la capacidad auditiva se deteriora a partir de 75 dB.

Buscad información sobre la contaminación acústica de vuestra ciudad y sobre la legislación que la regula.

2.2.2. Enmascaramiento del sonido

Pasa relativamente a menudo que cuando mantenemos una conversación en un lugar ruidoso –por ejemplo, en una calle transitada por coches– no entendemos lo que dice nuestro interlocutor si no levanta el tono de voz. Observamos que el ruido emitido por los coches “enmascara” la palabra cuando esta no tiene un nivel de presión sonora bastante alto.

Cuando el oído está expuesto a diferentes fuentes de ruido, puede ser que uno enmascare el otro (dependiendo del nivel de presión sonora de cada uno). El fenómeno de enmascaramiento se explica, de manera simplificada, al considerar cómo varía la excitación de la membrana basilar del oído (interno) según la frecuencia. Esta membrana se extiende a lo largo de la cóclea desde la ventana oval, de modo que si no recibe ningún estímulo se encuentra a una distancia cero de la ventana oval. Cuando recibe un estímulo sonoro, esta membrana vibra y se aleja de la ventana oval. La figura 9 muestra que si tenemos tonos del mismo nivel de potencia sonora, los tonos de una frecuencia inferior enmascaran los de una frecuencia más alta. Esto sucede porque la excitación de la membrana basilar es mayor para tonos de menos frecuencia y las colas de esta excitación son más extensas. Así, vemos que un tono puro de 50 Hz enmascara (encabalgaa) los tonos puros de 200 Hz, 400 Hz e incluso un poco el de 1.600 Hz. Por su parte, el de 1.600 Hz enmascara menos. Por lo tanto, podemos decir que los tonos de menos frecuencia hacen que la membrana basilar se aleje más de la ventana oval que los de más frecuencia; de ahí el enmascaramiento que se ve en la figura 9.

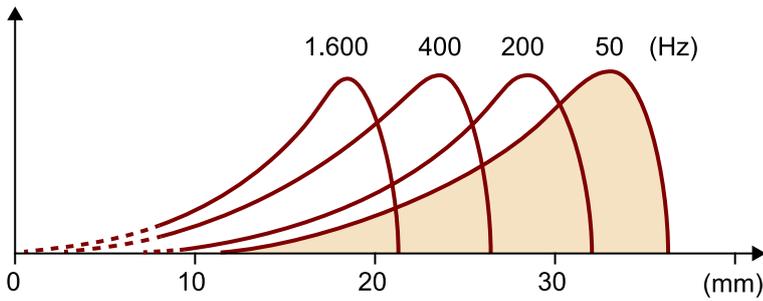


Figura 9. Desplazamiento en milímetros de la membrana basilar para cuatro tonos puros (50 Hz, 200 Hz, 500 Hz y 1.600 Hz) respecto a la ventana oval. El eje de ordenadas es la amplitud relativa y el eje de abscisas es la distancia a la ventana oval en milímetros. Fuente: Wikipedia

A continuación, presentamos diferentes situaciones de enmascaramiento posibles. Presentamos dos tonos (T1 y T2) con las frecuencias correspondientes (F1 y F2) y los niveles de amplitud correspondientes (L1 y L2):

- $F2 < F1$ y $L1 = L2$: el T2 enmascara parcialmente el T1.

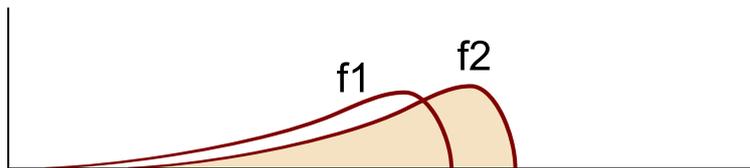


Figura 10. Amplitud en el eje de ordenadas y distancia a la ventana oval en el eje de abscisas. Fuente: Wikipedia

- $F2 < F1$ y $L1 \gg L2$: el T2 casi no enmascara el T1.

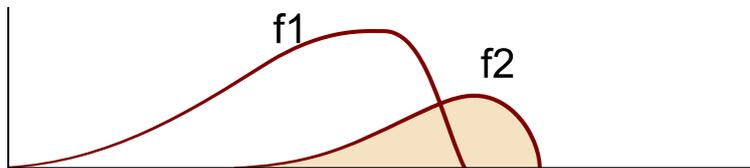


Figura 11. Amplitud en el eje de ordenadas y distancia a la ventana oval en el eje de abscisas. Fuente: Wikipedia

- $F2 < F1$ y $L1 \ll L2$: el T2 enmascara casi totalmente el T1.

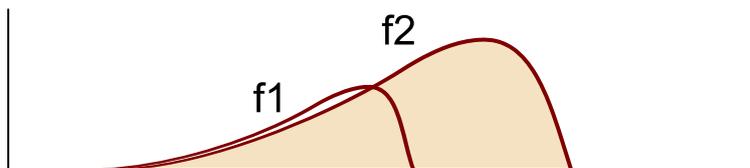


Figura 12. Amplitud en el eje de ordenadas y distancia a la ventana oval en el eje de abscisas. Fuente: Wikipedia

La conclusión principal que extraemos del enmascaramiento de los sonidos es que **un sonido de baja frecuencia enmascara con mucha más facilidad un sonido de alta frecuencia que al contrario.**

Reflexión

Pensad para qué nos puede servir saber cómo percibimos los sonidos y cómo se enmascaran los sonidos. Relacionadlo con el módulo de filtros de esta asignatura.

Este conocimiento es directamente aplicable en procesamiento de audio. Por ejemplo, permite filtrar las partes de las señales acústicas que son inaudibles para el oído humano, de modo que las señales ocupen menos (esto es lo que hace precisamente el MP3). Por lo tanto, es una aplicación en una codificación de audio, como veremos más adelante.

Referencia bibliográfica
 L. Cremer; H. A. Muller (1982). *Principles and Applications of Room Acoustics* (vol. 1). Londres: Applied Science Publishers.

2.3. Medición del sonido. Sonómetro y filtros de ponderación

El aparato electrónico que se utiliza para medir el sonido es el sonómetro, que intenta dar una medida objetiva de lo que percibe el oído humano. El **sonómetro mide exclusivamente los niveles de presión sonora**. Para evitar el sesgo entre las diferencias en las medidas de diferentes sonómetros, hay normas internacionales.



Figura 13. Imagen de un sonómetro.

Los sonómetros miden la presión sonora en términos de dB SPL, es decir, la escala que no aplica ningún tipo de atenuación ni acentuación a las frecuencias del sonido. Por defecto, la presión sonora se mide en dB SPL. Ahora bien, existe el llamado filtro de ponderación A (conocido como *dBA*), que enfatiza las frecuencias en torno a 3 kHz y 6 kHz (que es donde el oído humano es más sensible) y atenúa el resto de las frecuencias, en las que el oído humano es más insensible. Esta escala dBA permite que la media sea lo más parecida posible a la sonoridad que recibe el oído humano.

Ved también

Podéis ver el apartado “Percepción del sonido”.

La percepción humana del sonido tiene unas características particulares. Así, el oído humano puede percibir sonidos desde 20 Hz hasta 20 kHz, pero para cada una de estas frecuencias hay un umbral de audición o de dolor diferente –las curvas isofónicas nos dan esta información (figura 8).

Si escuchamos simultáneamente dos sonidos diferentes, puede ser que uno no nos deje oír el otro. Este fenómeno se denomina *enmascaramiento* y, genéricamente hablando, un sonido de baja frecuencia enmascara con más facilidad un sonido de alta frecuencia que al contrario.

El instrumento más utilizado como medida de los sonidos es el sonómetro. Este aparato utiliza tanto la escala dB SPL como la dBA. Esta segunda escala se utiliza por el parecido que tiene con lo que percibe el oído humano.

3. Fuentes sonoras y propagación del sonido

Entendemos como **fente sonora** el elemento que emite un sonido. Una de las características acústicas más relevantes de una fuente sonora es la **directividad** (o **características direccionales**). La **directividad de una fuente** se mide mediante el factor de directividad Q , que depende de la relación entre el nivel de intensidad sonora producido en la dirección considerada (θ) y el nivel que se obtiene si la fuente emite igual en todas las direcciones, es decir, si es omnidireccional⁵.

$$Q = \frac{I(\theta)}{I_{\text{omni}}}$$

3.1. Ejemplo de fuente sonora: el mecanismo de fonación humana

Los órganos que forman parte del sistema de fonación humana son los pulmones, la faringe, la cavidad nasal y la cavidad bucal.

Actividad

Buscad cuál es el factor de directividad de la voz humana.

Los sonidos que emite una persona se pueden clasificar de acuerdo con varios criterios según diferentes aspectos de emisión. Así, una clasificación puede ser según el carácter vocálico o consonántico del sonido. La tabla siguiente presenta las características principales de estos sonidos:

	Vocal	Consonante
Duración media	90 ms	20 ms
Contenido frecuencial dominante	Bajas frecuencias	Bajas frecuencias
Contribución a la inteligibilidad de la palabra	Baja	Alta

La inteligibilidad de una palabra depende principalmente del ruido de fondo, del tiempo de reverberación y del tamaño de la sala. Para medir la inteligibilidad de la palabra se utilizan medidas como estas:

- % ALCONS (porcentaje de pérdida de articulación de consonantes). Idealmente se piden valores menores que 5%.
- STI (*speech transmission index*). El valor que tiene oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1. Las variantes más utilizadas son las siguientes:

⁽⁵⁾Sabemos que una fuente sonora omnidireccional es aquella que emite el mismo sonido en todas las direcciones. Por lo tanto, el factor de directividad que tiene es 1.

Reflexión

¿Por qué es importante saber cómo funciona el sistema de fonación humana?

Por ejemplo, si queremos crear una voz sintética podemos intentar imitar el mecanismo humano. La aplicación de síntesis de voz la veremos en el módulo 8.

Nota

Medir la inteligibilidad de la palabra en lenguajes tonales (como el chino) puede ser más complejo, dado que se debe tener en cuenta que el tono se transmite correctamente.

- RASTI (índice de transmisión de la rapidez del discurso). El valor de este índice también oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total).
- STI-PA (índice de transmisión del discurso para sistemas públicos). El valor que tiene también oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total).

Actividad

Los lenguajes tonales son los que varían según cómo se pronuncien las sílabas. Buscad en Internet sobre lenguas tonales y qué tonos diferentes utiliza cada una.

3.2. Propagación del sonido en recintos abiertos y cerrados. Reflexión y absorción

El comportamiento del sonido en un recinto abierto y cerrado varía principalmente en el modo como percibe el sonido el oyente. En el primer caso, la energía de una fuente sonora llega a un oyente solo de manera directa (sonido directo), mientras que en el segundo caso llega de dos maneras diferentes: de manera directa (sonido directo) y de manera indirecta (sonido reflejado). El sonido indirecto o reflejado al mismo tiempo puede llegar con primeras reflexiones o con reflexiones tardías tal y como se muestra en la figura 14. La energía del sonido directo depende de la distancia respecto a la fuente sonora y de la posición del oyente respecto a la directividad de la fuente. En el caso del sonido reflejado, la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, y también del grado de absorción acústico de los materiales utilizados y el revestimiento de estos materiales que provocan que el sonido pierda energía.

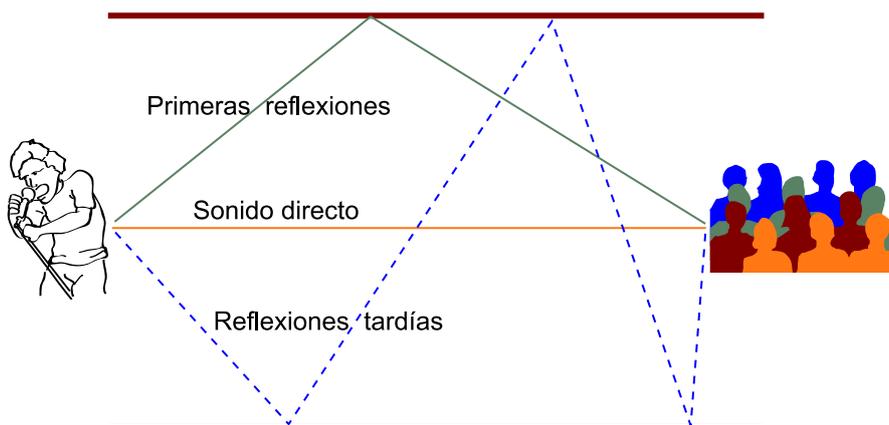


Figura 14. Sonido directo. Primeras reflexiones (líneas azules continuas). Reflexiones tardías (líneas azules discontinuas)

Para saber más

La acústica geométrica estudia el comportamiento del sonido dentro de un recinto cerrado y, en concreto, estudia qué trayectoria siguen las ondas: cómo se propagan, cómo rebotan y cómo se absorben.

Analicemos algo más los conceptos de **reflexión** y **absorción**. Si una onda se propaga en espacio libre, no hay reflexión ni absorción, pero si se propaga en un recinto cerrado, cuando “choque” contra una superficie habrá una parte

de la onda que se reflejará y otra que la propia superficie absorberá. Estos dos efectos producen la reverberación y el eco, que los veremos en los próximos apartados.

La cantidad de onda que se refleja o se absorbe depende del material de la superficie en cuestión. Así, cada material se caracteriza por un **coeficiente de absorción** que indica qué proporción de la onda se absorbe (el resto se refleja). El coeficiente de absorción de un material es diferente según cuál sea la frecuencia del sonido. Por ejemplo, en la frecuencia de 1 kHz el vidrio tiene un coeficiente de absorción de 0,03 y un tapiz tiene un coeficiente de absorción de 0,75; y en la frecuencia de 250 Hz el vidrio tiene un coeficiente de absorción de 0,04 y el tapiz, de 0,35.

El coeficiente de absorción se define de la manera siguiente:

$$\alpha = \frac{\text{energía absorbida}}{\text{energía incidente}}$$

Este coeficiente se mide en sabines (1 sabine corresponde a la absorción de 1 m²).

3.3. Reverberación

Entendemos por *reverberación* la situación en la que las **reflexiones llegan al oyente cuando el sonido original todavía no se ha extinguido**. Cuando el retardo de las reflexiones es menor que 0,05 segundos, el sonido reflejado se integra con el sonido original y se contribuye a mejorar la comprensión del mensaje.

Actividad

Nuestro cerebro está capacitado para integrar el sonido reverberante. Ahora bien, si nos concentramos podemos notar la reverberación. Por ejemplo, aplaudid en una sala y concentraos en el sonido que se produce en la sala. Probadlo en diferentes salas.

El tiempo de reverberación (TR) de un recinto mide la persistencia del sonido en una sala después de cesar la fuente. Concretamente, el TR es el tiempo que pasa desde que se produce un determinado sonido hasta que este sonido disminuye a una millonésima parte del valor original que tenía (una caída de 60 dB). El TR ideal de una sala depende de los actos que se lleven a cabo en ella: conciertos, discursos, etc. Asimismo, se dice que cuanto más alto es el tiempo de reverberación, más “viva” es la sala. En salas donde lo más importante es el habla (conferencias, clases, etc.) es mejor un tiempo de reverberación inferior a 1 segundo, mientras que en otros recintos (conciertos) es preferible que sea superior a 1,5 segundos.

Cámara anecoica

Una cámara anecoica es una sala que se caracteriza porque absorbe al 100% las ondas sonoras que se producen en ella. Por lo tanto, es una sala sin ecos.



Figura15. Imagen de una cámara anecoica. Fuente: Wikipedia

Ejemplo

A continuación veremos los márgenes de valores recomendados de TR para diferentes tipos de salas:

Uso de la sala	TR (s)
Palabra hablada/teatro	0,4-1
Cine	1-1,2
Música de cámara	1,3-1,7
Música sinfónica	1,8-2
Iglesia	2-3

Así pues, ¿por qué debe tener un tiempo de reverberación bajo una sala dedicada a conferencias?

El contenido frecuencial de las vocales es más rico a bajas frecuencias, y las consonantes presentan un contenido mayor de altas frecuencias. Así, cuanto más alto es el tiempo de reverberación, más lenta es la caída energética de una vocal emitida. Este hecho provoca un encabalgamiento temporal de la vocal con la consonante emitida inmediatamente después. Es el caso representado en la figura 12 ($f_2 < f_1$), y siguiendo la conclusión del apartado “Enmascaramiento del sonido”, un tono de baja frecuencia enmascara fácilmente un tono de alta frecuencia.

Como hemos visto al estudiar el mecanismo de fonación humana, la inteligibilidad de la palabra está altamente ligada con las consonantes. Por lo tanto, un exceso de reverberación provoca que las vocales enmascaren las consonantes y, en consecuencia, la inteligibilidad de la palabra hablada decae.

Para calcular el tiempo de reverberación se utiliza la **fórmula de Sabine**:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A_{todo}} \quad (s)$$

Para calcular esta absorción total necesitamos saber el coeficiente de absorción de todas las superficies que componen el recinto. A partir de aquí, tenemos que:

$$A_{todo} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

El tiempo de reverberación según la fórmula de Sabine:

- No varía dentro de una misma sala.
- No depende de la posición de la fuente.
- No depende de la forma, ni la geometría de la sala ni tampoco la localización de los materiales absorbentes dentro de la sala.

Los problemas que presenta la fórmula de Sabine son los siguientes:

Nota

Podéis ver ejemplos sonoros de diferentes tiempos de reverberación en la página web de Armstrong.

Lectura de la fórmula

V es el volumen del recinto (en m^3).

A_{todo} es la absorción total del recinto (m^2 sabine)

0,161 es el número que relaciona la velocidad del sonido (tomando como medio de propagación el aire) en la sala (m/s).

Lectura de la fórmula

α_n es el coeficiente de absorción.

Cada valor de S se corresponde con una superficie (pared, tierra, techo).

A_{todo} se mide en m^2 sabine.

- En el caso de una sala totalmente reflectora, el TR es infinito.
- En el caso de una sala totalmente absorbente, el TR no es nulo.

Para resolver estos casos, se plantean ecuaciones como la de Eyring y la de Millington. La diferencia principal que aportan estas fórmulas es que el descenso de la energía acústica cuando se para la fuente se hace a saltos (es decir, de manera discontinua), mientras que por Sabine es lineal. Hay varios trabajos experimentales que comparan y discuten las diferentes maneras de calcular el tiempo de reverberación.

La **fórmula de Eyring** es la siguiente:

$$TR = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}_E)}$$

La principal ventaja de esta aproximación comparada con la de Sabine es que tiene en cuenta el decaimiento intermitente con la llegada de menos reflexiones (notad que incorpora el logaritmo neperiano). Por lo tanto, esta fórmula es una aproximación mejor al tiempo de reverberación cuando la sala es menos reverberante.

La fórmula de Millington es la siguiente:

$$TR = \frac{0,161V}{-\sum_i S_i \ln(1 - \bar{\alpha}_{E_i})}$$

La principal ventaja de esta fórmula respecto a la de Eyring es que tiene en cuenta si dentro de una sala hay materiales con diferentes coeficientes de absorción.

Hay que tener en cuenta que en la práctica se utilizan preferentemente Sabine o Eyring.

Lectura recomendada

De manera optativa podéis leer el artículo “Analysis of Sabine and Eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption”.

Se discute en él la aplicación de la fórmula de Sabine y de Eyring para medir el tiempo de reverberación en una sala de conciertos.

Lectura de la fórmula

$\bar{\alpha}_E$ es el coeficiente de absorción medio.
S es el total de la superficie.

Nota

Para valores de absorción bajos, la fórmula de Eyring y la de Sabine coinciden.

Lectura de la fórmula

$\bar{\alpha}_{E_i}$ es el coeficiente de absorción medio por área de superficie S_i .

3.4. Eco

Entendemos por *eco* la situación en la que la señal acústica original se ha extinguido pero todavía se devuelve sonido en forma de reflexiones. El eco quita inteligibilidad, lo que quiere decir que el mensaje se hace menos comprensible. Un eco puro es el que se genera a partir de una única reflexión del sonido fuente. Los ecos en la naturaleza se producen por la reflexión con paredes duras (poco absorbentes), como las montañas sin vegetación o con muy poca vegetación.

El retardo del eco (τ_{eco}) viene dado por la distancia extra (d_{extra}) que recorre la reflexión (respecto al sonido directo) dividida por la velocidad del sonido:

$$\tau_{\text{eco}} = \frac{d_{\text{extra}}}{c}$$

La pregunta en este punto puede ser la siguiente: ¿cuándo se considera reverberación una reflexión y cuándo se considera eco?

Como hemos dicho en el apartado anterior, se considera que cualquier reflexión que llega con un retardo inferior a 0,05 segundos se puede integrar al sonido original y, por lo tanto, no es un eco, sino que es reverberación. Este umbral no es exacto, y en la práctica o en la literatura se pueden considerar válidas otras cantidades.

Actividad

Ahora generaremos un eco con Audacity. Grabamos nuestra voz y después generamos un eco.

Grabación: seleccionamos el botón de grabación (el punto rojo) y decimos: "Estamos generando un eco". Paramos la grabación.

Ejemplo

Así, se puede generar eco en el Gran Cañón si gritamos "¡Hola!". El efecto es que al cabo de un momento volveremos a oír "Hola". Pero si gritamos "¡Hola!" en medio del mar no oíremos nada.

Generación de un eco con el programa Audacity

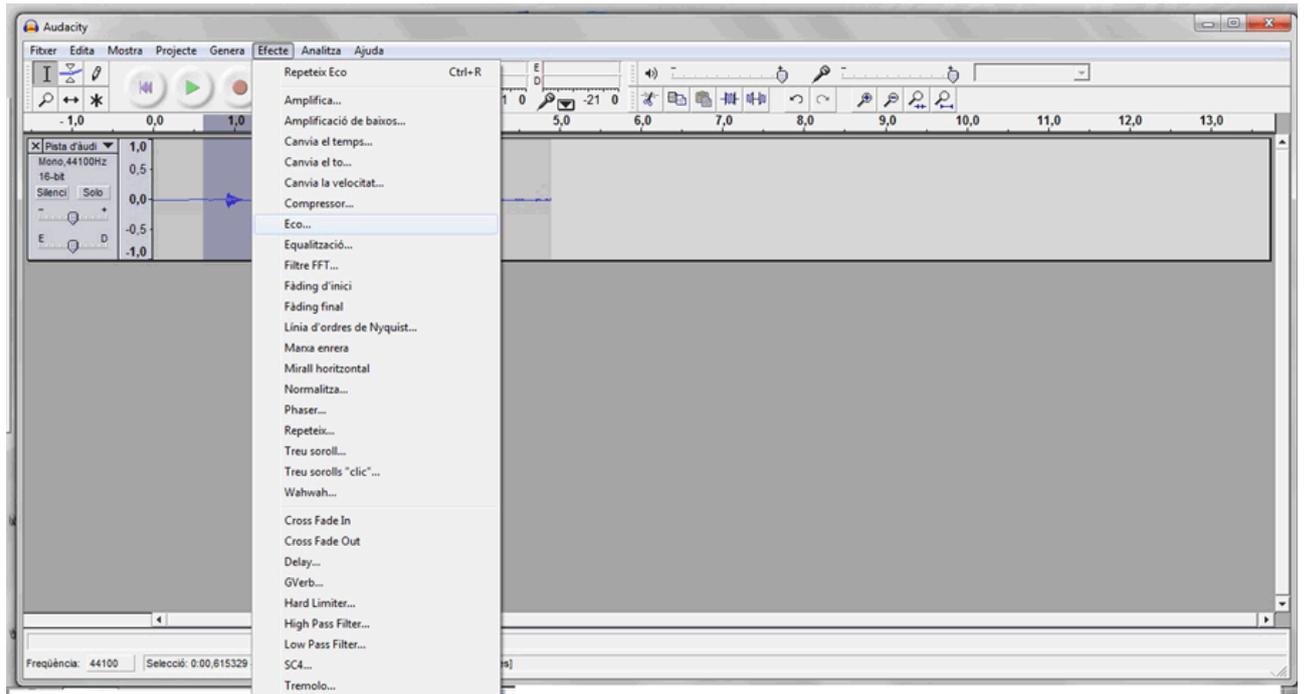


Figura 16. Generación de un eco con el programa Audacity

Generación de eco: seleccionamos la señal que hemos generado. Vamos al menú *Efecto* y clicamos en *Eco* (tal y como indica la figura 16). Podemos elegir el factor de decaimiento (la atenuación sobre la señal de eco) y el retardo del eco. En el momento de decidir el retardo podemos comprobar el umbral entre eco y reverberación.

Una vez hemos hecho nuestra elección, podemos probar el efecto clicando en *Probar* o aceptarlo mediante *De acuerdo*. Una vez generado el efecto, escuchamos nuestra señal y el efecto pulsando el botón *Reproducción* (botón verde).

Nota

Una cámara de ecos es una sala diseñada especialmente para generar ecos. Normalmente, estas cámaras se utilizan para grabar programas de televisión o de radio (por ejemplo, cuando en una serie de televisión se quiere generar una conversación con el efecto eco). Generalmente, estas salas se modelan como las clásicas iglesias o cuevas, es decir, con paredes muy reflectoras.

Se considera fuente sonora todos los elementos que son capaces de emitir sonidos. Así, las personas actuamos como fuentes sonoras cuando hablamos, cantamos o silbamos, entre otras acciones.

El sonido emitido por una fuente sonora se percibe de manera diferente en recintos abiertos o cerrados. En el primer caso solo se percibe el sonido directo, mientras que en el segundo caso, además, se debe tener en cuenta el sonido reflejado.

El sonido reflejado que llega al oyente separado en el tiempo del sonido original menos de 0,05 segundos ayuda a la inteligibilidad. Este sonido reflejado lo denominamos *reverberación*. En caso contrario (el sonido reflejado llega más tarde de 0,05 segundos al oyente), se percibe como un eco y perjudica la inteligibilidad.

