

ACÚSTICA

RESUMEN

(COLOQUIO)

M. IÑAKI OTEGUI

FEBRERO 2023

Introducción y evaluación del sonido

Acústica: Es una rama interdisciplinaria de la física que estudia el comportamiento de las ondas mecánicas a través de la materia por medio de modelos matemáticos y físicos, es decir estudia la grabación, producción, transmisión, percepción o reproducción del sonido (ondas de sonido audibles por el humano entre 20Hz y 20kHz), el ultrasonido (ondas de alta frecuencia, mayores a 20kHz . Los delfines y los murciélagos pueden escuchar estas frecuencias) y el infrasonido (ondas de baja frecuencia, menos de 20Hz . Los elefantes y los topos pueden escuchar estas frecuencias).

Ramas de la acústica:

- a. Acústica arquitectónica: Estudia el control del sonido y las vibraciones, en recintos habitables y en locales (teatros, estudios de grabación, aulas, auditorios, etc...)
- b. Acústica virtual: Incluye la generación y el uso de herramientas que permiten predecir el resultado acústico de intervenciones arquitectónicas de conservación, rehabilitación y mejora en recintos antes de su realización práctica. Incluye:
 - i. Espacio acústico virtual: técnica mediante la que los sonidos presentados a través de auriculares poseen “espacialidad”, creándose la sensación de que la fuente de sonido (virtual) está ubicada fuera de la cabeza del oyente.
 - ii. Realidad acústica virtual: permite crear en el oyente una imagen auditiva de un entorno real o imaginario mediante la creación de los mismos estímulos sonoros que el sujeto experimentaría en la situación real.
 - iii. Simulador de instrumentos musicales (on-line): Instrumentos musicales que suenan parecidos a uno de verdad, pero que se ejecutan con el ratón o el teclado de la computadora.
- c. Acústica ambiental: Estudio del ruido y las vibraciones generadas por las actividades humanas y sus efectos en las personas y la naturaleza.
- d. Acústica laboral: Estudio del ruido y las vibraciones a las que están sometidas las personas en ambientes de trabajo y sus efectos sobre la salud.
- e. Acústica subacuática: Está relacionada con la utilización del sonido para la detección de objetos, el estudio de la composición del suelo o la fauna acuática.
- f. Acústica musical: Estudio de la producción de sonido en instrumentos musicales.
- g. Psicoacústica: Estudia la percepción del sonido en los humanos.
- h. Bioacústica: Ciencia que combina la biología y la acústica. Refiere a la investigación de la producción del sonido, su dispersión a través de un medio y su recepción en animales (incluyendo los humanos).
- i. Electroacústica: Estudio del tratamiento electrónico del sonido, incluyendo: la captación (micrófonos), estudios de grabación, el procesamiento (grabación, efectos, filtrado, compresión), la amplificación y reproducción en altavoces.

Ingeniería acústica: Es la rama de la ingeniería que estudia las aplicaciones tecnológicas para el control de parámetros acústicos y del sonido en general.

Ingeniería Electrónica: El título de Ingeniero Electrónico capacita y habilita para:

- a. Estudio, proyectos, dirección, construcción, instalación, puesta en marcha, operación, ensayo, mediciones, mantenimiento, reparación e inspección de sistemas, equipos, control, medición, registro, reproducción, procesamiento de señales de cualquier contenido, aplicación y naturaleza, ya sea eléctrica, electromagnética, óptica, acústica o de otro tipo, en todas las frecuencias y potencias.
- b. Entender y certificar en estudios, tareas y asesoramientos, pudiendo realizar arbitrajes, pericias, tasaciones, trabajos de higiene, seguridad industrial y contaminación acústica.

Todas estas tareas profesionales se relacionan con la realización de mediciones electrónicas.

Sonido: Es una onda mecánica longitudinal de presión, producida por el movimiento vibratorio de un objeto, que se propaga en un medio elástico (sólido (indios escuchaban piso para saber si venían enemigos), líquido (agua) o gaseoso (aire)) capaz de vibrar. Las partículas de aire no viajan, solo se mueven alrededor de su posición de equilibrio. La forma en la que se propagan, su velocidad y atenuación dependerán de las características físicas del medio.

Características físicas: Los sonidos graves poseen longitudes de onda más grandes y los sonidos agudos longitudes de onda más pequeñas. Dicha longitud de onda tiene importancia en relación a los obstáculos. Si el obstáculo es mucho menor que la longitud de onda, el sonido no se verá afectado, pero si es mucho mayor, el sonido podrá desviarse y/o atenuarse (ej.: un sonido de 120Hz no se altera por la presencia de una persona frente al parlante, mientras que uno de 2500Hz sí lo hará).

Velocidad de propagación: Es la velocidad de propagación de las ondas mecánicas longitudinales, producidas por variaciones de presión en el medio. Es independiente de la frecuencia o la intensidad, depende de la elasticidad y rigidez características del medio de propagación. En cada medio, la velocidad de propagación del sonido c , queda determinada por el módulo de compresibilidad K y por la densidad ρ , según la relación (para fluidos):

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Se deduce que a mayor coeficiente de compresibilidad del medio $\frac{1}{K}$, menor será la velocidad del sonido. A mayor densidad ρ , a igualdad de todo lo demás, tanto menor será la velocidad del sonido. El sonido viaja más rápido en los sólidos, luego en los líquidos y por último, más lento en los gases. La velocidad del sonido en el aire a $T = 0^\circ\text{C} = 273,15\text{K}$ es de $c = 331,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, para una $T_{\text{amb}} = 22^\circ\text{C}$, $c = 345 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

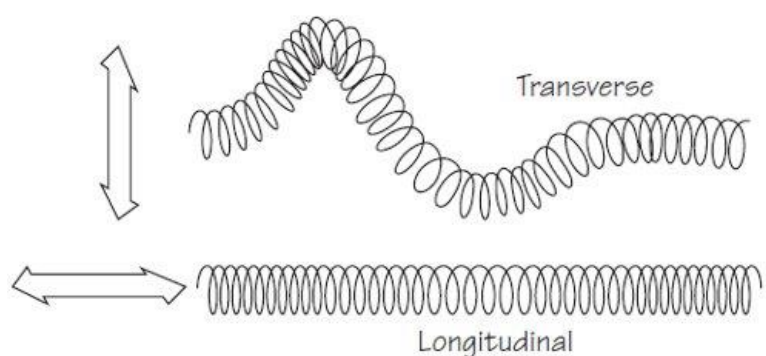
Ruido: Es un sonido no deseado (que molesta). La diferencia con el sonido es únicamente subjetiva.

Ondas mecánicas (o materiales): Necesitan de un medio material para propagarse. La energía se transmite gracias a las condiciones elásticas del medio. Hay transporte de energía, pero no de materia. Ej.: sonido, ondas en la superficie de un estanque, etc...

Ondas electromagnéticas: No necesitan un medio para propagarse (pueden hacerlo en el vacío), las ondas mecánicas, o materiales, necesitan un medio material para propagarse. Ej.: luz, ondas de radio, etc...

Ondas transversales: La amplitud de la onda es perpendicular al movimiento de esa onda. Ej.: Ondas circulares en la superficie de los líquidos, ondas que se producen en las cuerdas tensas de los instrumentos musicales, la famosa “ola” en los estadios de fútbol es similar a una onda transversal, etc...

Ondas longitudinales: La amplitud y el movimiento de la onda son paralelos. Ej.: las compresiones que se mueven a lo largo de un resorte de juguete, ondas sísmicas de tipo P (terremotos y explosiones), etc...



Decibel: Es una unidad relativa que sirve para expresar la relación entre dos magnitudes, acústicas o eléctricas, o entre la magnitud que se estudia M , y un valor de referencia de esa magnitud M_0 .

$$L_M = 10 \log \left(\frac{M}{M_0} \right)$$

Evaluación del sonido: Se puede clasificar en:

a. Magnitudes físicas:

i. Potencia sonora (o acústica) [$W = \frac{J}{s}$]: Constituye una medida de cuánta energía sonora puede producir una fuente por unidad de tiempo, y es independiente del recinto en que está ubicada la fuente. Es una magnitud escalar cuya intensidad con la que se percibe, depende de la posición del receptor. Puede calcularse a partir de los valores medidos de presión sonora o de niveles de intensidad sonora (medición indirecta). Se usa principalmente para la calificación de ruido de máquinas y equipos. El valor de referencia para la potencia acústica es: $W_{ref} = 1pW$. La potencia eléctrica es la proporción por unidad de tiempo con la cual la energía eléctrica es transferida por un circuito eléctrico, la informa el fabricante.

ii. Presión sonora [Pa]: La energía sonora fluye desde la fuente, produciendo una determinada presión sonora en el ambiente. Dicha presión dependerá de la potencia sonora de la fuente, de la distancia a la fuente, de la energía absorbida por los materiales en el recinto. La presión sonora también se puede definir como la variación incremental causada por la presencia del sonido. Se suele expresar en Pa

(Pascales). La presión atmosférica es estática y vale $10^5 Pa = 1013,25 hPa$. No es audible (y no daña nuestros oídos) porque su variación es muy lenta. El umbral mínimo es $20 \mu Pa$ y la del umbral de molestia $20 Pa$. Las presiones sonoras son pequeñísimas comparadas con el valor de la presión atmosférica. Puede medirse directamente. Se usa para la evaluación de la peligrosidad y la molestia del ruido. La presión de referencia es $P_{ref(aire)} = 20 \mu Pa$, o bien, $P_{ref(agua)} = 1 \mu Pa$.

iii. Intensidad sonora $[\frac{W}{m^2}]$: Es el cociente entre la potencia sonora que irradia una fuente y el área sobre la que se distribuye dicha potencia. Para una fuente puntual, en condiciones de campo libre, la energía sonora fluye a través de una superficie esférica: $I = \frac{W}{S}$. Se expresa como $\frac{W}{m^2} = \frac{I}{m^2}$. Es una magnitud vectorial con sentido, modulo y dirección. Para una fuente puntual, la intensidad sonora decrece con r^2 . Al duplicar la distancia, la intensidad se reduce a $\frac{1}{4}$ de su valor inicial. Triplicando dicha distancia, se reduce a $\frac{1}{9}$. Depende de la distancia fuente-receptor y del ambiente (al igual que la presión sonora). Además, puede medirse directamente con los instrumentos adecuados. Se usa principalmente para la ubicación y la caracterización de fuentes de ruido.

b. Mediciones objetivas:

i. Niveles Sonoros: Los niveles sonoros se expresan en decibeles $[dB]$. El valor de referencia para los niveles de intensidad sonora para ruido aéreo es de $10^{-12} \frac{W}{m^2}$, que equivale a la intensidad de un tono puro de $1 kHz$ en el umbral de audición de una persona de ontológicamente normal (joven y sana). Los valores más importantes de nivel de presión sonora son $0 dB \rightarrow 20 \mu Pa$ y $120 dB \rightarrow 20 Pa$. En condiciones de campo libre: nivel de intensidad sonora y el nivel de presión sonora son prácticamente iguales. Los niveles sonoros se suman de la siguiente manera:

Correlacionados: Son sonidos provenientes de varias fuentes que están relacionadas, o múltiples fuentes que generan un mismo sonido (ej.: señal mono en dos parlantes), o reflexiones cortas y múltiples fuentes que generan fuentes de correlación. Resulta de la suma algebraica de presiones. El resultado depende de la diferencia de fase entre las ondas, pudiendo reforzarse o cancelarse, total o parcialmente.

No correlacionados: Son sonidos provenientes de fuentes no relacionadas, o conjuntos de instrumentos ejecutando diferentes tonos, o la misma fuente retrasada lo suficiente como para no estar correlacionada. Resulta de la suma algebraica de potencias, el resultado siempre es más fuerte. No depende de sus fases relativas, el incremento de presión no es el doble, pues se están sumando potencias, no presiones. Cuando se suman dos sonidos no correlacionados iguales, el máximo incremento posible es del 41%.

Operaciones:

1. Si están correlacionadas las ondas: $L_f = L_i + 3dB$
2. Si no están correlacionadas las ondas: $L_T = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)$
3. Si son muy diferentes sus niveles: $L_T = L_1$ tal que $L_1 \gg L_2$

ii. Nivel Sonoro Continuo Equivalente: Se simboliza como L_{eq} para un tiempo T . Es el nivel de presión sonora constante que en el mismo intervalo de tiempo contiene la misma energía total que el sonido evaluado.

$$L_{eq,T} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \sum_1^n t_i 10^{\frac{L_i}{10}} \right]$$

iii. Análisis Espectral: Implica el análisis del espectro de un sonido. *Espectro de un ruido*: Es la representación de la distribución de la energía sonora en función de la frecuencia. Ej.: Un análisis del ruido por bandas de octavas es útil para seleccionar de manera óptima un protector auditivo, o para diseñar una solución con objeto de reducir el ruido. Vale aclarar que dos máquinas con un mismo nivel de presión sonora pueden tener una distribución energética muy diferente. Se definen los siguientes valores:

$$\text{Ancho de banda} = f_2 - f_1$$

$$\text{frec central} = f_0$$

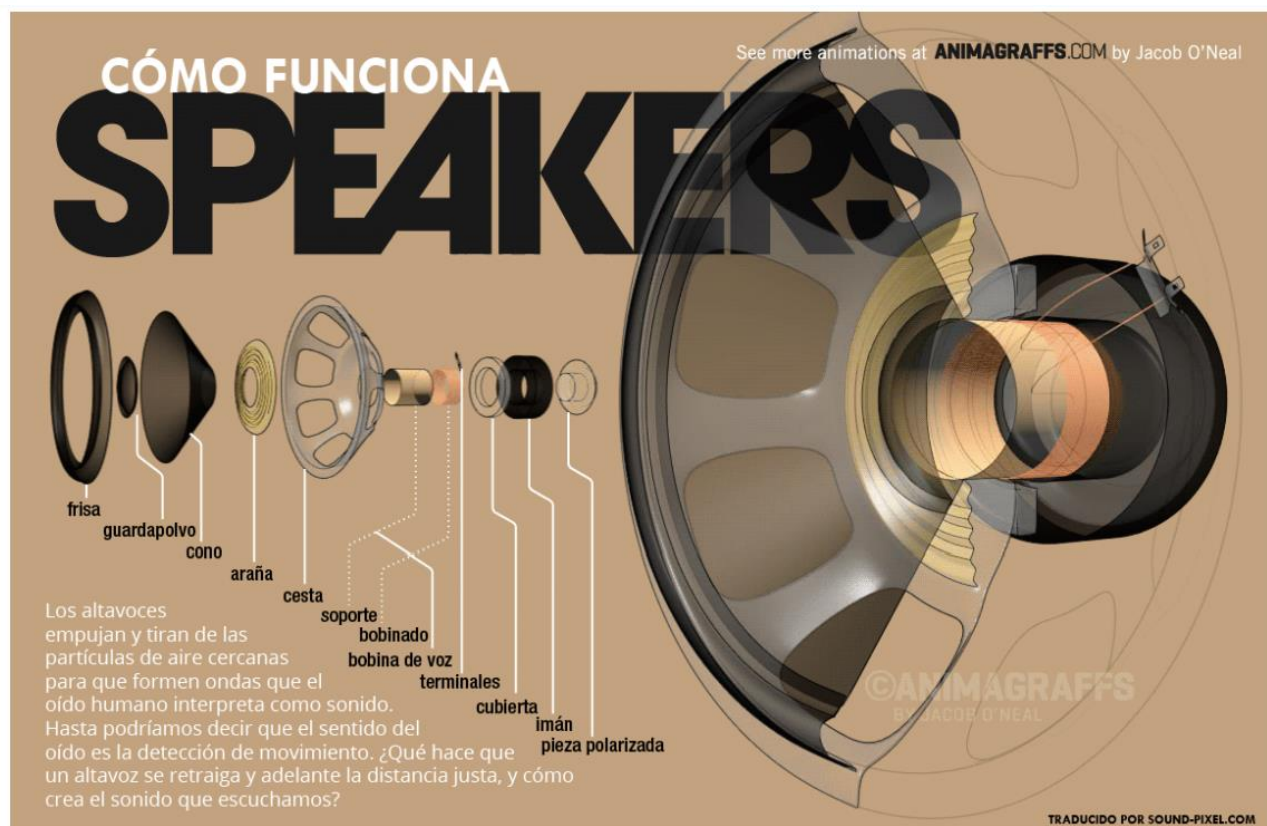
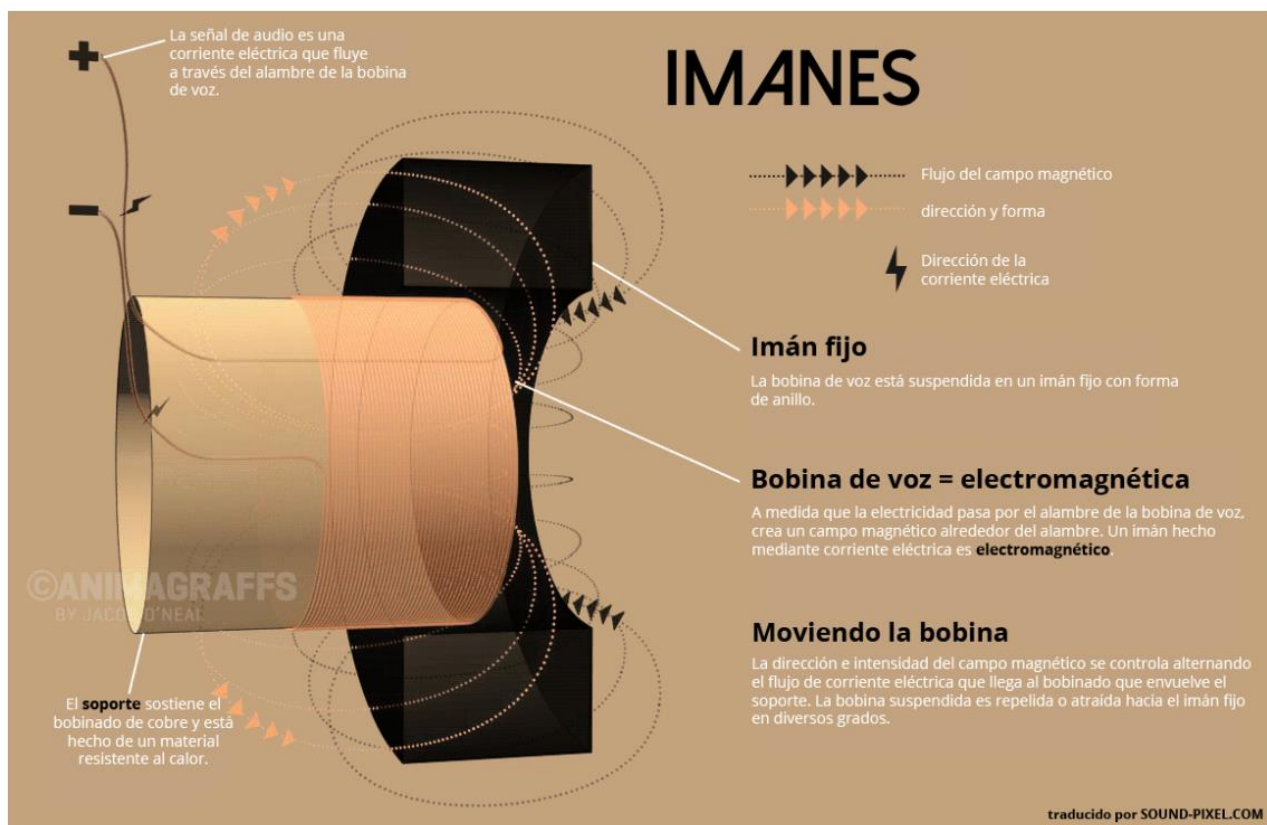
$$f_1 = \frac{f_0}{\sqrt[6]{2}}$$

$$f_2 = \sqrt[6]{2} f_0$$

c. Mediciones subjetivas:

- i. Red de ponderación en frecuencia
- ii. Evaluación del contenido energético
- iii. Evaluación de la variación temporal.

Generación de sonido de un parlante:



CONO & SUSPENSIÓN

El **cono** es un diafragma conectado a la bobina de voz perpendicularmente. En acústica (el estudio del sonido) un diafragma es un dispositivo que convierte los movimientos mecánicos en ondas de sonido o viceversa.

En este caso, el cono está diseñado para un movimiento óptimo gracias a una entrada desde la bobina de voz.

El **guardapolvo** cubre la apertura de la bobina de voz y el interior del altavoz.

La **araña** o centrador y la **frisa** son la suspensión del sistema de altavoz. Trabajan juntos para mantener el cono y la bobina alineados adecuadamente y para devolver el mecanismo a su posición neutra entre las vibraciones.

©ANIMAGRAFFS
BY JACOB O'NEAL

traducción de SOUND-PIXEL.COM

Amplitud = potencia de la onda = volumen



alta presión baja presión



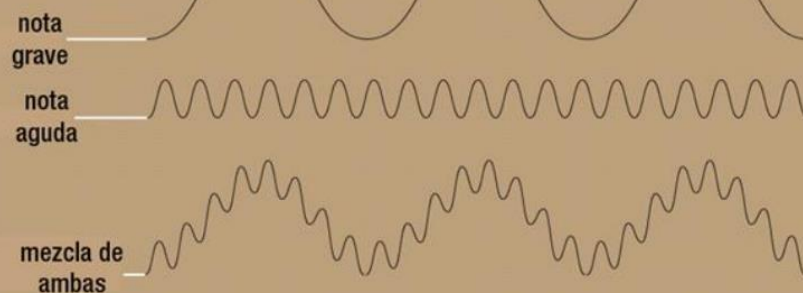
Las ondas de sonido hacen que las moléculas de aire se acerquen y alejen de la fuente en grupos de alta y baja presión: no se mueven arriba y abajo.

En cualquier caso, las ondas de sonido son más fáciles de imaginar como una línea ondeante con altos y bajos que representan las zonas de altas y bajas frecuencias.

Superposición de ondas

Múltiples ondas en el mismo sistema se superpondrán para formar una onda unificada. Se llama **principio de superposición**.

El cerebro percibe dos notas, una alta y otra baja. En realidad, es una onda compleja que contiene vibraciones tanto lentas como rápidas que alcanzan tu oído cuando se tocan a la vez.



TIMBRE

Por qué escuchamos los distintos instrumentos



Si superponemos estas dos ondas (haciéndolas sonar al mismo tiempo), tu oído será capaz de distinguir tanto el bajo como el piano por las características únicas de cada onda.

El timbre de cada instrumento es tan variado y complejo que el oído puede diferenciar muchos instrumentos individuales en una onda combinada.



La mayoría de instrumentos no reproducen una onda limpia cuando emiten una nota.

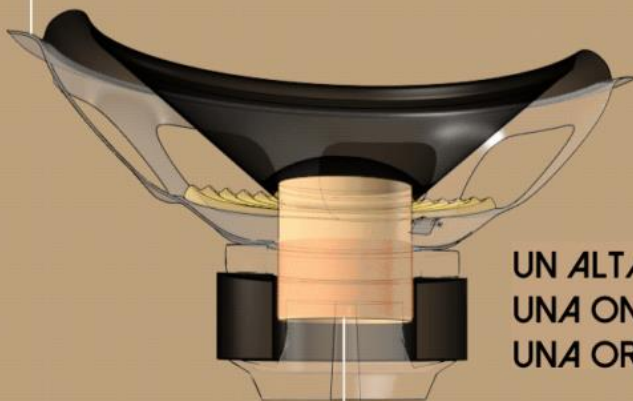
La frecuencia de un instrumento de cuerda más típico podría ser un sol. Pero sacudidas más pequeñas y movimientos viajan por la cuerda al mismo tiempo produciendo notas menos audibles que el oído también detecta. Una sola nota es en realidad una mezcla de frecuencias en la que hay una predominante.

La forma de esta onda compleja es parte del sonido único de cada instrumento, o **timbre**.



Capacidad del oído humano

El oído humano puede distinguir las vibraciones entre los 20 Hz y los 20.000 Hz aproximadamente. ¡Eso son un montón de frecuencias con las que trabajar!



Mientras muchos sistemas de audio separan el rango de las frecuencias en altavoces diseñados específicamente, en general un único altavoz puede reproducir esta intrincada onda imposible.

El altavoz lanza miles de rápidas vibraciones mientras viaja desde un golpe de bajo al siguiente, representando a toda una orquesta de instrumentos, tan solo moviéndose adelante y atrás.

**UN ALTAVOZ +
UNA ONDA INCREÍBLEMENTE COMPLEJA =
UNA ORQUESTA AL COMPLETO**

©ANIMAGRAFFS
BY JACOB O'NEAL

Traducción: SOUND-PIXEL.COM

Oído y Psicoacústica

Transducción Auditiva por Hermes Carreño (Video): El sentido del oído es un proceso complejo conocido como transducción auditiva. El oído convierte las ondas sonoras en el aire en impulsos eléctricos que son interpretados por el cerebro. A medida que el sonido entra al oído, este pasa a través del canal auditivo externo, donde choca contra la membrana timpánica, la cual vibra en respuesta al sonido.

Los sonidos de tono o frecuencias bajas producen vibraciones lentas, y los sonidos de bajo nivel o amplitud, producen vibraciones de menor intensidad. Los sonidos de alta frecuencia producen vibraciones rápidas.

La membrana timpánica tiene forma de cono y se articula con tres huesos llamados huesecillos del oído: el martillo, el yunque y el estribo.

Los movimientos de la membrana timpánica hacen vibrar los huesecillos, de modo que transmitan información sobre frecuencia y amplitud. Los tres huesos pivotean juntos sobre un eje. El eje del pivote está constituido por una serie de ligamentos que mantiene a los huesecillos en posición dentro de la cavidad. El ligamento interior del martillo y el ligamento posterior del yunque, tienen una importancia crucial para el eje del pivote. También se encuentran el nervio del cordón del tímpano y el tendón del músculo tensor del tímpano.

A través de los huesecillos, las vibraciones de la membrana timpánica son transferidas a la platina del estribo. El estribo se mueve como un pistón, enviando vibraciones dentro de la estructura llamada laberinto óseo, que está lleno de un fluido llamado perilinfa. Si este funcionara de manera rígida y como un sistema inflexible, el movimiento del estribo no sería capaz de desplazar la perilinfa y, por lo tanto, no podría transmitir las vibraciones a la estructura ósea.

Debido a la flexibilidad de la membrana llamada ventana redonda, los movimientos del estribo pueden desplazar la perilinfa, lo que permite que las vibraciones entren en el laberinto. El corredor que lleva a la ventana redonda se encuentra dentro de la parte espiral del laberinto óseo conocido como cóclea. Las vibraciones producidas por el estribo son transferidas hacia el sistema espiral y retornan para encontrarse con la ventana redonda.

La porción del tubo en espiral donde las vibraciones son enviadas al vértice de la cóclea se llama escala vestibular. La porción que desciende se llama escala timpánica. Una tercera estructura llamada conducto coclear está situada entre la escala vestibular y la escala timpánica. El conducto coclear está lleno de un fluido llamado endolinfa y cuando se ve en sección transversal quedan visibles las membranas que separan los dos sistemas, las cuales son la membrana de Reissner y la membrana Basilar. Dichas membranas son flexibles y se mueven en respuesta a las vibraciones que viajan hasta la escala vestibular. Seguidamente, los movimientos de las membranas envían vibraciones de vuelta hacia la escala timpánica. Una estructura especializada llamada órgano de Corti está situada sobre la membrana basilar. Mientras la membrana basilar vibra, el órgano de Corti es estimulado, enviando impulsos nerviosos al cerebro a través del nervio coclear.

Los impulsos nerviosos propiamente dichos son generados por células especializadas dentro del órgano de Corti, llamadas células ciliadas. Las células ciliadas están cubiertas muy de cerca por una estructura llamada membrana tectoria. A medida que la membrana basilar vibra, las finas células ciliadas se flexionan contra la membrana tectoria, con lo cual se activan.

Toda la membrana basilar no vibra al mismo tiempo. En lugar, áreas específicas a lo largo de la membrana basilar se mueven de manera independiente en respuesta a diferentes frecuencias de sonido. Bajas frecuencias hacen vibrar a la membrana Basilar cerca del vértice de la Cóclea, mientras que las frecuencias altas producen vibraciones cerca de la base.

Este arreglo se conoce como organización tonotópica. Juntas, esta secuencia de eventos es responsable de la percepción acústica del mundo que nos rodea.

Oído medio: Martillo, yunque estribo.

Límite oído medio-externo: tímpano

Oído externo: canal auditorio

Límite oído medio-interno: ventana oval.

Oído interno: canal semicircular, cóclea, nervio auditorio, ventana redonda.

Distribución de frecuencias en la membrana basilar: Fue descubierto por Georg Von Bekesy y le valió el premio Nobel de Medicina. Se relevaron los patrones de ondas estacionarias para distintas frecuencias mediante fotografía estroboscópica usando partículas de platino como medio reflectante.

Las mayores perturbaciones del órgano de Corti cuando incide una señal de frecuencia alta se produce en las cercanías de la ventana oval. Las frecuencias más altas se encuentran más cerca de la base y las más bajas cerca del apéndice. Además, las frecuencias más altas se ubican en la zona de mayor dureza de la membrana basilar, por otro lado, las más graves en la zona menos rígida.

Armónicos y octavas: A los humanos les agrandan las relaciones armónicas, subjetivamente hablando. La octava es un concepto logarítmico que está muy arraigado en la escala musical y que guarda relación con las características del oído. Es un intervalo natural que el oído percibe como una determinada relación de frecuencias. En acústica, esto se aprovecha para realizar mediciones.

Escala bien temperada: Bach propuso un intervalo entre las 12 notas del clavicordio con una relación matemática de $\sqrt[12]{2}$.

Timbre: Está determinado por el contenido armónico del sonido y su dinámica. Se estima que es necesario por lo menos 60ms para reconocer el timbre. Tonos de duración menor a 4ms se perciben como click.

Mecanismo de excitación de las células ciliares: El movimiento de las cilias controla un intercambio iónico que produce diferencias de potencial a modo de impulsos neurales. Dichas células ciliadas externas ayudan a mejorar la selectividad en frecuencia.

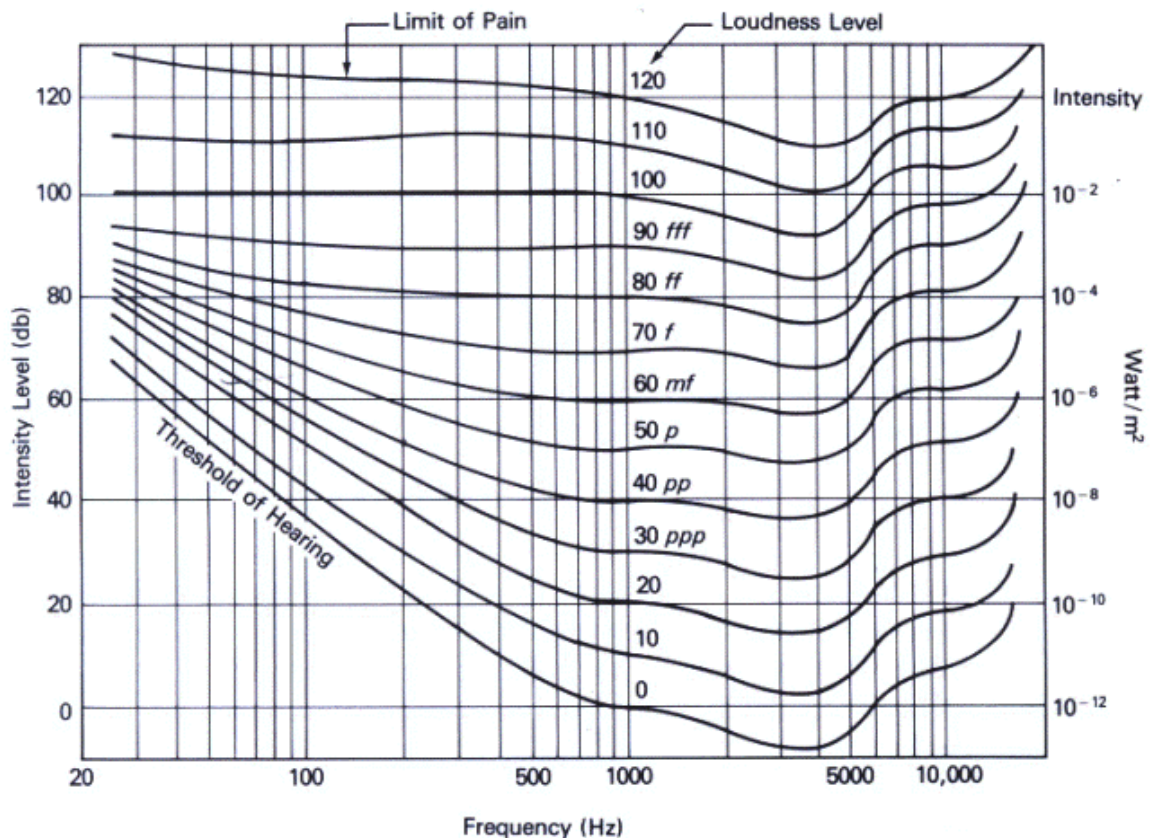
Generación de impulsos neurales: La relación entre la deflexión de las cilias y los impulsos eléctricos generados muestran una sensibilidad del orden del diámetro de un átomo de hidrógeno. Para este incremento de selectividad requiere de un suministro de energía adicional. La destrucción de células ciliadas externas (OHC) resulta en un incremento del umbral de audición y el deterioro de la selectividad en frecuencia. La mayor sensibilidad se encuentra en la banda de 4kHz.

Electromotilidad de las células ciliares externas: Tienen la capacidad de contraerse como respuesta a un impulso eléctrico como lo hace un músculo. Mediante esta particularidad estando solidarias a la membrana tectoria aplican realimentación positiva mecánica siguiente a la excitación vibracional.

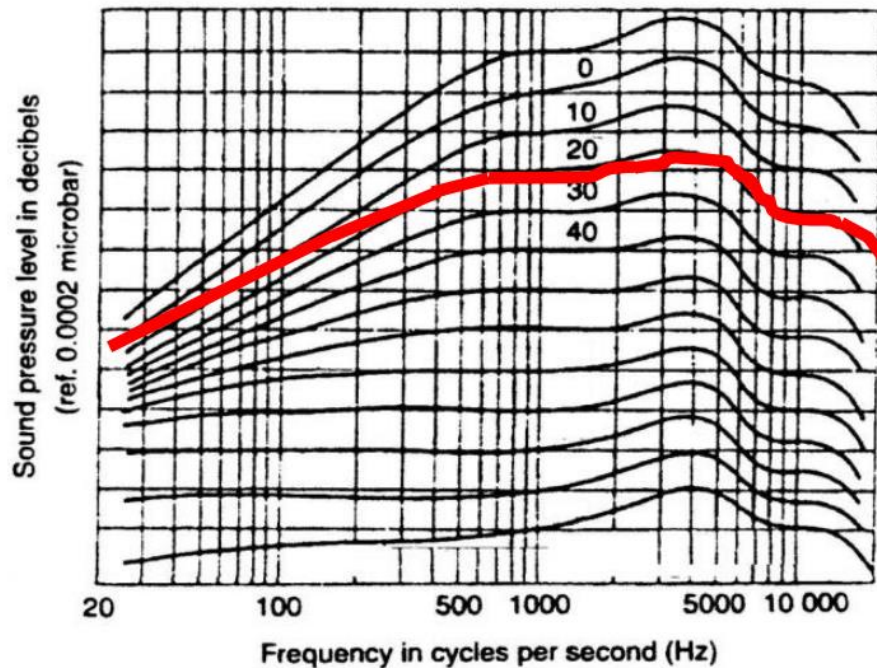
Efectos del ruido sobre la salud:

- a. Fisiológicos y psicológicos: Interferencia en la comunicación, perturbación del sueño, interferencia con el aprendizaje, acúfenos, malestar, estrés, nerviosismo, disminución rendimiento laboral, pérdida de capacidad auditiva, efectos cardiovasculares, cambios en el comportamiento social.
- b. Otras consecuencias: incremento de accidentes, costo sanitario y de seguros, pérdida de valor de propiedades.

Curvas isofónicas o de igual sonoridad (loudness): Fueron presentadas por Fletcher y Munson en 1933. Son el resultado de la comprobación experimental de la relación entre cómo de alto se percibe un sonido por el oído humano a lo largo de la banda audible. Solo son válidas para un campo sonoro directo, no para un campo reverberante. En ellas se ve cómo el oído humano es más sensible a las frecuencias medias y medias-altas que a las graves y agudas. Además, también se puede ver cómo a medida que aumenta la intensidad sonora las curvas se hacen más planas, debido a la manera que se tensa el tímpano para protegerse de los altos volúmenes. Es más sensible en medias y medias-altas frecuencias.



Curvas de transferencias del oído: Dan origen a las curvas de ponderación para mediciones aproximando su respuesta. Emulan el comportamiento del oído (puede observarse que es idéntico a las curvas de Fletcher y Munson, pero a la inversa).



Mediciones objetivas/subjetivas: Cuando haya que valorar un parámetro objetivamente (fuentes, materiales, aislamiento, absorción, ...) no se utilizará ninguna red de ponderación, se hará una medición lineal (objetiva). Siempre que se tenga que medir cómo es percibido un sonido o qué efecto puede causar (molestia), habrá que utilizar una red de ponderación: A o C (medición subjetiva).

Son: Se convino que un incremento de la presión sonora de 10dB produce sobre el oyente la sensación subjetiva de la duplicación de la sonoridad. Un son se define a 40dB SPL a 1kHz .

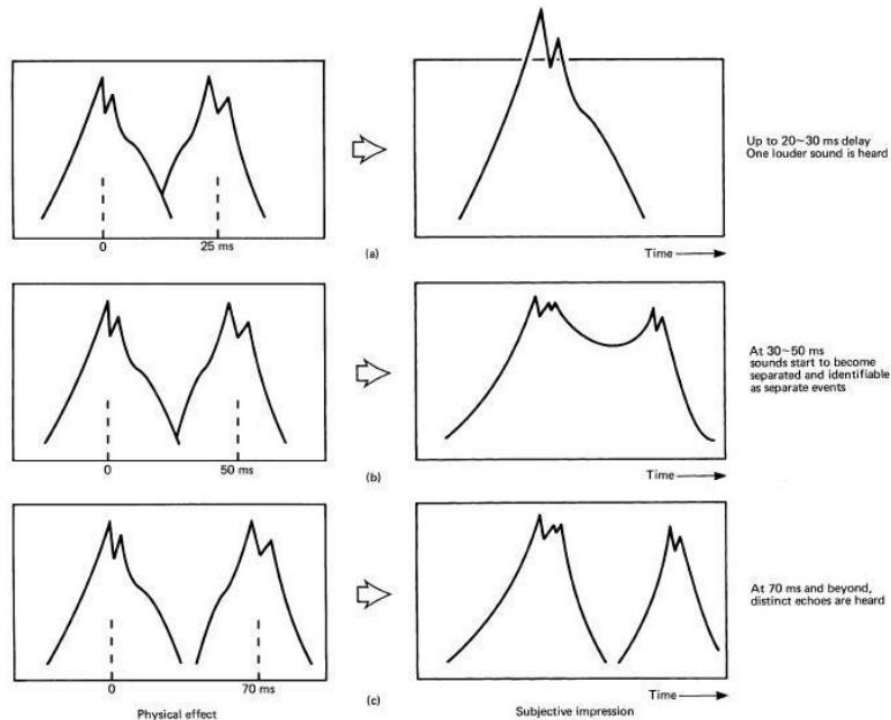
Localización del sonido: Hay 3 mecanismos que intervienen en la localización del sonido:

- Diferencia de tiempos interaural (ITD):** Es la diferencia de tiempo de llegada de un sonido entre dos orejas y oídos. Si el sonido ya tuvo comienzo, es difícil saber de dónde proviene, o donde se generó. Si bien se utilizan ambos oídos para ubicar espacialmente al sonido, el cerebro puede adaptarse a utilizar solamente uno.
- Diferencia de intensidad interaural (IID):** Refleja la diferencia en la intensidad de la onda llega a cada oído.
- Forma de la oreja:** Las reflexiones en el pabellón producen variaciones de la respuesta en frecuencia en función de la modificación de la altura de la fuente, lo que se conoce como el efecto "Pinna". La diferencia de tiempos entre el sonido directo varía entre $10\mu\text{s}$ y $300\mu\text{s}$. El primer nulo está en $\frac{1}{2}t$. Esto genera un tipo de filtro peine, donde se anula una determinada frecuencia después del retardo. Ej.: Maniquí de la cabeza que se utiliza para simular la escucha.

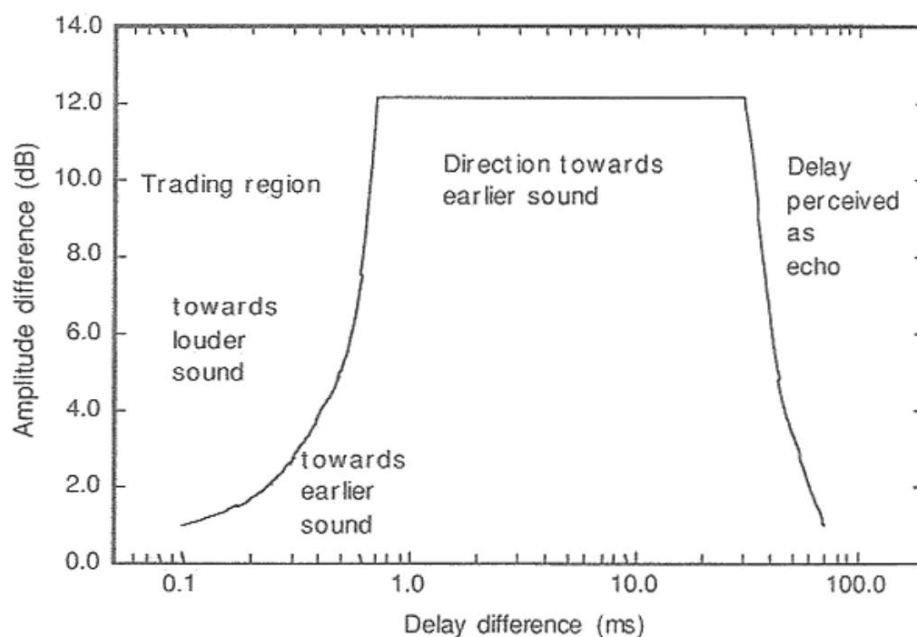
Efecto Haas (fusión temporal): Afecta a la percepción humana del sonido, y describe cómo, a nivel de percepción, si varios sonidos independientes llegan a nuestro cerebro en un intervalo inferior a 50ms , éste los fusiona y los interpreta como uno sólo. Antes de 25ms se percibe como un solo sonido, entre 25ms y 50ms comienza a separarse, y a partir de 50ms ya comienzan a percibirse como sonidos separados (principal y eco), discriminando la posición de ambas fuentes. Surgió del

estudio de Hass (1951) sobre las condiciones para percibir una reflexión y cuando se fusiona con el sonido directo.

Para sonidos con retardos entre 2ms y 5ms , los oyentes tienden a identificar la dirección del sonido fusionado en función del primer sonido que llega, haciendo caso omiso a sonidos secundarios retrasados. En muchos casos aún cuando la fuente retardada supere en nivel a la primera.



Efecto de precedencia: Descubierto por Wallach. Describe el fenómeno por el cual los oyentes identifican la dirección de la fuente en función de la intensidad y el retraso entre ellos. La fuente virtual se ubicará entre medio de las dos fuentes en función del retraso y el nivel de cada una. Con este principio se puede trabajar la estereofonía.



Efecto Cocktail Party: Es la capacidad que tiene el sistema auditivo de distinguir a un orador de otro que habla al mismo tiempo. La capacidad de distinción es mayor cuando los oradores se encuentran en diferentes lugares. El oído permite “sintonizar” a alguno de los dos oradores. Es una consecuencia de la habilidad que tiene el sistema auditivo de sumar las señales de interés de ambos oídos y cancelar la interferencia.

Bandas críticas: Se pueden definir de dos maneras:

- a. Es la banda de frecuencias en la cual la sonoridad de una banda con nivel de presión sonora distribuida uniformemente y centrada en una frecuencia, es percibida como independiente de su ancho de banda. El hecho de que los filtros de tercio de octava “sigan” el comportamiento del ancho de banda críticos explica su popularidad. También se manifiestan al escuchar simultáneamente dos tonos puros.
- b. Es el ancho de banda al cual las respuestas subjetivas cambian abruptamente.

JND: Al escuchar sonidos separados temporalmente la mínima diferencia perceptible (JND) en frecuencia es muy diferente. El concepto de JND puede aplicarse tanto a alturas como a sonoridad. A medida que las notas musicales se encuentran en un registro más alto, la habilidad para distinguirlas se reduce.

Enmascaramiento: Es el incremento del umbral de audición de un tono puro a causa de la presencia de un tono o ruido enmascarante (de mayor amplitud). Para escuchar el tono que deseo escuchar, debe aumentar su amplitud con respecto al enmascarante.

Dolby hizo uso del enmascaramiento para disminuir el ruido percibido en grabaciones sobre cinta. Los algoritmos del .mp3 basan parte de su funcionamiento en el enmascaramiento.

Sonoridad de los impulsos: El oído es menos sensible a los sonidos de corta duración. Decrece el nivel de presión sonora para mantener la misma sonoridad, a medida que aumentamos la duración del pulso.

Técnicas de medición de ruidos

Ingeniería de control de ruidos:

Etapas del proyecto:

1. Definición del problema (caracterización de la fuente).
2. Determinación de la reducción necesaria (comparación con la normativa a cumplir). Es necesario caracterizar el ruido (medirlo).
3. Diseño de la solución: En las fuentes, en la propagación, en el receptor.

Mediciones de ruido

En Acústica, es necesario medir el grado de exposición al ruido al que están sometidas las personas para evaluar el impacto en su salud (ruido laboral o urbano), o medir el ruido emitido por maquinarias y equipos, para caracterizarlos. En lo posible, las mediciones se deben efectuar con la técnica específica y los procedimientos normalizados.

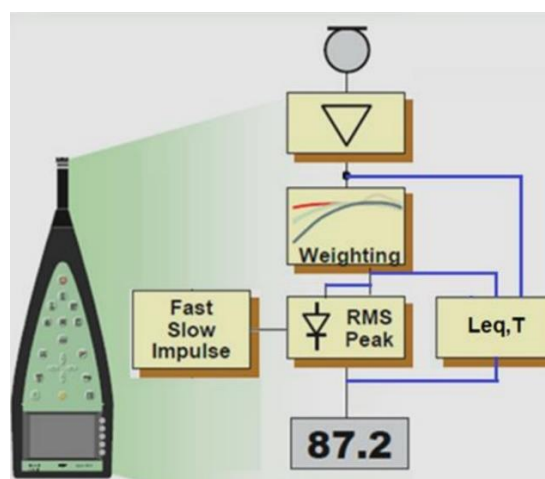
Es importante tener en cuenta los equipos de medición, recomendaciones generales, posicionamiento del equipo, procedimiento operativo, correcciones o ajustes.

Equipos de medición

a. Medidores de Nivel Sonoro (MNS): Los medidores deben responder a las normas: IRAM 4074-1 (especificaciones generales), IRAM 4074-3 (integradores y promediadores), IRAM 4081 (filtros de banda de octava, de media octava y de tercio de octava destinados al análisis de sonidos y vibraciones). Internacionalmente deben responder a la norma IEC 61672.

Existen MNS simples, que sólo registran el nivel global, en dB_A ; o complejos, capaces de medir niveles lineales o compensados en frecuencia (A, C); con diferentes respuestas temporales (S, F, I). Los MNS integradores, no sólo miden niveles de presión sonora instantáneos, si no que son capaces de integrar y promediar, a lo largo de un cierto tiempo, niveles sonoros “equivalentes”.

Sonómetro (Decibelímetro): Es un instrumento de medida que sirve para medir niveles de presión sonora (de los que depende). En concreto, el sonómetro mide el nivel de ruido que existe en determinado lugar y en un momento dado. La unidad con la que trabaja el sonómetro es el decibelio. Si no se usan curvas (sonómetro integrador), se entiende que son dB_{SPL} .



En primer lugar, viene el micrófono de medición, luego (triángulo invertido) el preamplificador que adapta impedancias, luego la red o curvas de ponderación (filtros), luego el valor del nivel sonoro continuo equivalente $L_{eq,T}$, o RMS/Peak para valores instantáneos de respuesta (rápida/lenta), Fast Slow Impulse hasta que se muestra la medición.

Micrófono de medición: Elemento transductor, encargado de transformar las variaciones de energía acústica (variaciones de presión por el sonido), en señal eléctrica. Un micrófono de medición idealmente debería presentar una respuesta en frecuencia plana en todo el rango de frecuencias audibles (20Hz a 20kHz). Es decir, la misma sensibilidad (relación de transformación de presión acústica en tensión eléctrica). En realidad, suele presentar respuesta plana en un rango menor. Al introducir un micrófono dentro de un campo acústico, se produce una alteración de las características del campo debido a la difracción producida sobre el micrófono para frecuencias cuya longitud de onda es comparable al tamaño del mismo. Este efecto es evidente en frecuencias superiores a 1000Hz. Micrófonos de medición Se caracteriza normalmente por uno de los tres tipos posibles de respuesta en frecuencia: campo libre, presión e incidencia aleatoria.

- i. Micrófono para incidencia normal: presenta una respuesta en frecuencia uniforme cuando apunta hacia la fuente sonora en campo libre, compensando la perturbación que se produce en el campo sonoro.
- ii. Micrófono para incidencia aleatoria: presenta una respuesta en frecuencia uniforme en situaciones donde el sonido llega simultáneamente de todos los ángulos de incidencia posibles (campos reverberantes).

Los micrófonos de medición suelen ser de tipo condensador, que combinan una excelente respuesta en frecuencia con una gran estabilidad y fiabilidad. Presentan una impedancia de salida demasiado elevada, por lo que es necesario un preamplificador para adaptar la impedancia del micrófono a la habitual de entrada de un equipo de audio (en torno a los 100Ω - 150Ω). En general, requieren alimentación, aunque en muchos casos es suministrada por el mismo equipo de medición. Algunos micrófonos de condensador son prepolarizados, por lo que no necesitan tensión de alimentación.

Detector de sobrecarga: Una vez convertida la señal acústica en señal eléctrica, se ocupa de generar el correspondiente mensaje de error en caso de que el margen dinámico de la señal captada exceda en margen de funcionamiento de alguna de las etapas posteriores, con lo que la medición resultante no sería correcta. En caso de no existir error, la medición seguiría su curso.

Circuitos de ponderación en frecuencia o redes de compensación (A, C): La señal pasa a través de un filtro cuya respuesta en frecuencia varía de forma análoga a la sensibilidad del oído humano, simulando los contornos o curvas de igual sonoridad. De esta forma, se busca que el nivel de presión sonora medido refleje en cierta manera el nivel subjetivo percibido. Para aproximar el funcionamiento de los instrumentos de medición a la respuesta de nuestra audición, surgieron las curvas de ponderación en frecuencia, implementadas como filtros. Los diferentes filtros son:

- i. Filtro A: Pretende emular la respuesta del oído para niveles sonoros bajos, pero es el utilizado para niveles sonoros bajos, pero es el utilizado para hacer las mediciones subjetivas en general. Penaliza mucho las frecuencias bajas. Predominan las medias y medias-altas.

- ii. Filtro C: Intenta semejar la respuesta del oído para niveles sonoros altos. Se lo utiliza para mediciones subjetivas en las que se necesita ponderar niveles pico, o para evaluar sonidos con predominancia de bajas frecuencias.
- iii. Filtro D: aplicación especial, utilizado para ruido aeronáutico. Penaliza mucho las frecuencias altas.
- iv. Respuesta Lineal en Frecuencia (o LIN, o ponderación Z): algunos equipos de medición permiten hacer mediciones objetivas, con una respuesta lineal (LIN, o ponderación Z), procesando la señal sin modificación en frecuencia.

Las características de los filtros están definidas en la NORMA IEC 61672-1:2002.

Mediciones objetivas: A la hora de valorar un parámetro objetivamente (caracterizar fuentes o materiales), no se utilizará ninguna red de ponderación en frecuencia, se hará una medición lineal.

Mediciones subjetivas: Siempre que se tenga que medir cómo es percibido un sonido o que efecto puede causar (molestia, daño, etc...), se deberá utilizar una red de ponderación en frecuencia (A, C, o D) puesto que es un estudio.

Detector RMS: Respuestas temporales normalizadas. Son integraciones de tipo RC (integraciones exponenciales), con respuesta: Lenta (Slow, S) con constante de tiempo 1s, Rápida (Fast, F) con constante de tiempo 125ms (sigue mejor las fluctuaciones temporales del sonido a medir), Impulsiva (Impulse, I) que es una integración asimétrica de tipo RC con una constante de tiempo 35ms de subida y 1.5s de bajada (puede seguir variaciones de ruido de tipo impulsivo, elevaciones abruptas y de corta duración). Evaluar variaciones temporales rápidas con una constante de ponderación temporal lenta supondría evaluar un nivel de presión sonora inferior al que realmente se está percibiendo. Debe respetarse la norma indicada.

Detector Pico: Respuesta temporal normalizada. Es el valor pico. La constante de tiempo es del orden de los 50μs. Sirve para evaluar el riesgo de daños en el oído, ante un impulso de muy corta duración, pero muy intenso.

A la hora de medir, todos los valores pueden tomarse como correctos para las diferentes curvas de ponderación, dependiendo el uso o función que se le quiera dar. La medición global es suficiente en muchos casos, aunque no completa.

Nivel Sonoro Continuo Equivalente: Es veinte veces el logaritmo decimal del cociente entre el valor cuadrático medio de la presión sonora con una ponderación de frecuencia normalizada (A o C), durante un intervalo de tiempo establecido T y la presión sonora de referencia P_0 . Se puede definir como el nivel de presión sonora constante que, durante un período determinado de tiempo, tiene la misma energía total que el ruido fluctuante real.

Diferencia en la capacidad de promediación entre los medidores de nivel sonoro integradores y los convencionales: Ambos tipos de medidores de nivel sonoro promedian en el tiempo el nivel de presión sonora ponderado en frecuencia, pero el proceso de promediación se diferencia debido a:

- i. El sonómetro convencional tiene un número limitado de características de promediación temporal, mientras que en la promediación en sonómetros integrados, es mucho mayor pudiendo extenderse a varios minutos u horas.

ii. El sonómetro integrador otorga igual énfasis a todos los sonidos que ocurren durante el período de promediación seleccionado (integración lineal), mientras que el sonómetro convencional le brinda mayor énfasis a los sonidos que ocurren más recientemente. La ponderación temporal de los sonómetros convencionales decae exponencialmente de forma tal que, utilizando la característica S, brinda un peso más importante a los sonidos ocurridos en el segundo previo que a los ocurridos 10s antes.

b. Analizadores de espectro: Para aplicaciones donde se requiera un análisis en frecuencia de la señal acústica se deben utilizar equipos que cuenten con filtros normalizados de 1/1 ó 1/3 de octava. Para las mediciones más habituales (aislamiento acústico, potencia acústica, etc...) es suficiente con una resolución espectral de 1/3 de octava. Para otras aplicaciones (ecualización de salas, etc...), donde se requiere una resolución mayor existen sonómetros y analizadores de espectro en tiempo real con filtros de ancho de banda inferior al tercio de octava (1/12, 1/16, etc...) especificadas en la norma IRAM 4081:1977. Permite visualizar la amplitud en un rango frecuencial.

c. Dosímetros: Son instrumentos integradores que le permiten a los operarios conocer la dosis de ruido a la que estuvieron expuestos en su trabajo, es decir su NPSE correspondiente a su jornada de T horas. Indican un porcentaje de la dosis, correspondiendo el nivel máximo 100% a 85dB_A. Se puede manejar con aplicaciones para teléfonos inteligentes.

d. Fuentes de referencia: La calibración frecuente de los medidores de nivel sonoro se realiza mediante un accesorio denominado “fuente de referencia acústica” (calibrador de campo).

e. Medidores de vibraciones: Son equipos de medición de vibraciones que se utilizan para valorar vibraciones en máquinas e instalaciones. Un calibrador electrónico para vibrómetros da una señal normalizada de $10 \frac{m}{s^2}$. También, una señal de calibración de $10 \frac{m}{s^2}$ a 159,2Hz tiene una velocidad de $10 \frac{mm}{s}$ y un desplazamiento de $10 \mu m$. Esta señal es equivalente a una velocidad angular de $1000 \frac{rad}{s}$.

f. Accesorios: Trípodes, protector para viento, cables prolongadores.

Recomendaciones generales:

a. Calibrar antes y después de cada medición: Se realiza una “calibración de campo”. Se utiliza una fuente de referencia acústica que se aplica directamente sobre el micrófono. La fuente de referencia proporciona un nivel de presión sonora conocido (nivel de referencia). En general se emite un tono de 1kHz, produciendo una presión de 1Pa, en dichas condiciones el sonómetro debe indicar 94dB. La fuente de referencia y el equipo deben enviarse periódicamente a un laboratorio de reconocida trayectoria para la realización de calibraciones acústicas.

b. Valoración del nivel de ruido de fondo (sonido residual): Se mide con el mismo parámetro y en las mismas condiciones con las que se midió el ruido bajo evaluación. El nivel de ruido de fondo es el ruido persistente cuando se suprime la fuente de ruido bajo estudio.

c. Previsión de los errores de medición: Efecto apantallamiento (los hombros apantallan el sonido, atenuando los valores), Distorsión direccional (ubicación correcta de la dirección de los micrófonos), Efecto del viento (uso de protector para el viento), Condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc...).

Posicionamiento del equipo: Para mediciones generales, se coloca el micrófono entre 1,2m y 1,5m del suelo. Para monitoreo y mapas de ruido a 4m de altura y entre 1m y 1,5m de la pared en lo posible.

Procedimiento operativo:

Respuesta del detector (ponderación temporal): En lo posible, las mediciones se deberán efectuar de acuerdo con los procedimientos normalizados. En general, se recomienda la respuesta FAST, excepto para detección de componentes impulsivas. Además de la ponderación temporal escogida, es determinante el tiempo total de medición considerado. En función del tiempo de medición de un evento acústico, el nivel acústico equivalente puede variar de forma muy notable.

Red de ponderación en frecuencias: Pueden ser de tipo A, C o Lineal (las más comunes).

Registro según el tipo de ruido: Puede ser Discontinuo o Continuo (que a su vez puede ser Uniforme o Variable (que a su vez puede ser Determinístico o Aleatorio)). También puede haber ruidos con variaciones aleatorias e impulsivos (o de impactos), caracterizado este último debido a que su nivel de presión sonora instantáneo se presenta por impulsos y se caracteriza por un incremento brusco del ruido y una duración breve con relación al tiempo que transcurre entre impulsos pudiéndose presentar en forma aleatoria o repetitiva.

- i. Parámetros acústicos: Nivel Sonoro Continuo Equivalente ($L_{Aeq,T}$), Nivel Sonoro Mínimo Ponderado en el tiempo T (L_{Amin}), Nivel Sonoro Máximo Ponderado en el tiempo T (L_{Amax}), Nivel Sonoro Pico ($L_{A_{pico}}$). También se toma el clima de ruido (descriptor de la variabilidad temporal de los niveles sonoros (fluctuaciones) donde a mayor clima de ruido mayor molestia.
- ii. Número de mediciones: A veces se elige tomar las mediciones a partir de un piso de ruido dado para tener un valor más real de lo que es realmente molesto.
- iii. Duración de las mediciones: El tiempo de estabilización es el tiempo necesario para que el nivel equivalente medido difiera del nivel equivalente horario en menos de un valor épsilon.

Correcciones o ajustes: Por tonos puros, por componentes impulsivas, por componentes de bajas frecuencias.

Normativa de aplicación: Se utilizan normas nacionales IRAM.

En una primera parte, se indica como proceder para medir y calificar en ambientes interiores y exteriores no linderos con la vía pública.

Se da como ejemplo la *norma IRAM 4062-1:2021* que expresa el método de medición de los niveles de ruido producidos por fuentes sonoras, que trascienden al vecindario y que pueden producir molestias. No aplica para evaluar molestias producidas por el ruido de tráfico. Determina un nivel de evaluación a partir de la medición del NSCE ponderado A en frecuencias aplicándole factores de corrección. Tiene en cuenta las características del ruido a evaluar, el ruido de fondo o residual, las condiciones más desfavorables para el receptor. Da un criterio de evaluación para determinar si el ruido es, o no, molesto.

En general, un ruido puede generar molestias cuando su nivel excede en un cierto margen al ruido residual preexistente, o cuando su nivel alcanza un determinado valor límite. El criterio de la IRAM 4062-1 se basa en la comparación del Nivel de Evaluación L_E , con el nivel de ruido residual L_f (ruido que perdura en un lugar determinado cuando se suprime el ruido específico en evaluación), en el lugar y en el horario de evaluación. Para evitar considerar un nivel de ruido residual no característico, se debe efectuar la comparación de éste con el Nivel Residual Calculado L_C , que toma en consideración distintos aspectos del ruido.

Nivel de evaluación: Es el Nivel Sonoro Continuo Equivalente medido durante 15m en alguno de los horarios de referencia, al que se le aplica un término de penalización K siendo $T = 15m$.

Término de penalización K : Contempla la posibilidad de hacer correcciones de acuerdo con ciertas características del ruido presuntamente molesto: por carácter tonal, por carácter impulsivo, por contenido de bajas frecuencias.

Durante las mediciones de niveles sonoros no se deben tener en cuenta los ruidos que aparecen ocasionalmente y que no pertenecen ni al ruido presuntamente molesto ni al ruido residual. Cuando no se pueda suprimir el ruido bajo estudio y, por lo tanto, no se pueda obtener el ruido de fondo, se deberá dejar constancia de las razones que lo impidieron, declarando que la calificación del ruido en estudio se realizó considerando el ruido de fondo calculado.

Comparación del Nivel de Evaluación L_E con el ruido residual: si se tienen ambos valores de ruido residual (L_f y L_C), se utiliza el menor de los dos. Criterio de evaluación:

$$\Delta L \geq 8dB \rightarrow \text{es molesto}$$

$$\Delta L < 8dB \rightarrow \text{no es molesto}$$

Si el nivel de evaluación incrementa en 8dB, o más, al ruido de fondo del receptor, el ruido evaluado es calificado como molesto.

Para el ruido presuntamente molesto:

- i. Para obtener el nivel de evaluación L_E , y por posible contenido de bajas frecuencias: $L_{Aeq,15m}$ y $L_{Ceq,15m}$.
- ii. Si corresponde, por carácter impulsivo: $L_{AI_{m\acute{a}x}}$ y $L_{AS_{m\acute{a}x}}$.
- iii. Si corresponde, por carácter tonal: Análisis espectral.

Para el ruido residual:

- i. En ausencia del ruido presuntamente molesto, dentro del horario de referencia en estudio y en los mismos puntos: $L_{Aeq,15m}$.

En una segunda parte, se indica un método de medición y calificación en la vía pública y en exteriores linderos con la vía pública (IRAM 4062-2). El método consiste en comparar el Nivel de Evaluación L_E con el valor límite establecido en esta parte de la norma, para la zona y el horario que correspondan. El nivel de evaluación obtenido L_E no puede superar los valores límites establecidos.

Para el ruido presuntamente molesto: (igual que en interiores)

Para el ruido de fondo (o ruido residual):

$$i. L_{A_f} = L_{A_{eq},15m}$$

Las mediciones de L_M y L_{A_f} deben hacerse en el mismo punto. Cuando no se pueda suprimir el ruido bajo estudio, para medir L_{A_f} se debe buscar otro punto lo más cercano posible, con características similares, en el cual realizar la medición del ruido residual, y se deberá justificar.

Término de penalización K: Contempla la posibilidad de hacer correcciones de acuerdo con ciertas características del ruido presuntamente molesto: por carácter tonal, por carácter impulsivo, por contenido de bajas frecuencias. El procedimiento de cada uno es igual al establecido en el IRAM 4062-1.

Nivel de evaluación: Se lo utiliza para verificar el cumplimiento con los valores límites establecidos en esta parte de la norma. Es el NSCE ponderado A en frecuencias determinado a partir del nivel sonoro medido durante 15m y corregido por ruido de fondo, al que se le suma el correspondiente término de penalización K.

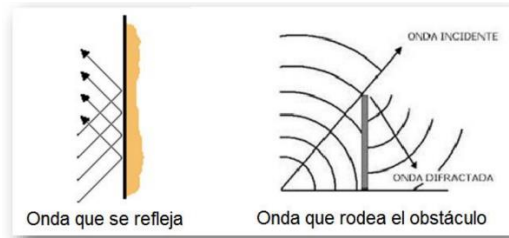
Procedimiento de calificación: Antes de realizar la calificación del ruido, el nivel de evaluación obtenido L_E se debe redondear al entero más próximo. Para valores mayores o iguales a 0,5 se redondea al entero superior. El criterio es:

- i. Si $L_E > \text{nivel sonoro límite} \rightarrow$ el ruido se califica como molesto.
- ii. Si $L_E \leq \text{nivel sonoro límite} \rightarrow$ el ruido se califica como no molesto.

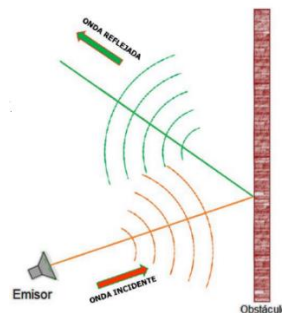
Propiedades acústicas de materiales

Ondas sonoras:

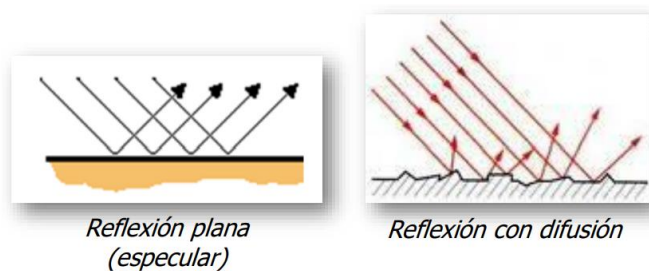
Cuando una onda encuentra un obstáculo en su propagación, el tamaño del obstáculo y la longitud de onda determinan si la onda se refleja en la dirección de la que provenía o rodea el obstáculo. Si el obstáculo es mucho menor que la longitud de onda, no se verá afectado. Si es mucho mayor o similar sí.



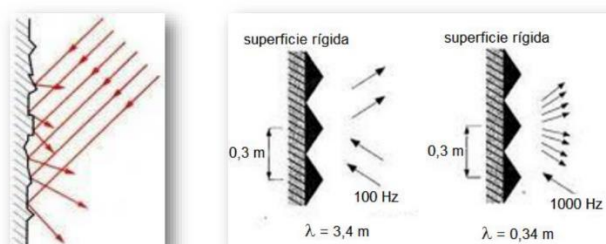
Reflexión: Cuando una onda encuentra en su propagación un obstáculo que no puede traspasar ni rodear, regresa o se refleja hacia el medio del cual proviene.

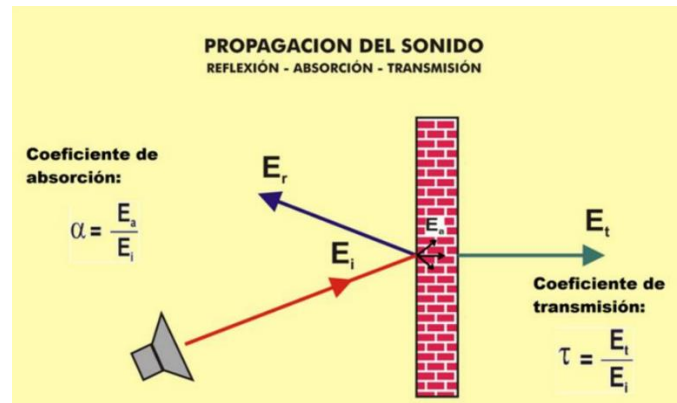


Reflexión con difusión: La onda no se refleja en una única dirección si no que se descompone en múltiples ondas (se difunde), si la superficie sobre la que se produce la reflexión presenta alguna rugosidad (con relación a la longitud de onda).



Reflexión y difusión: El grado de difusión que produce el relieve de la superficie no es el mismo para diferentes frecuencias que componen el sonido.





Control de las reflexiones sonoras: Se pueden utilizar materiales con alguna de las siguientes propiedades acústicas:

- a. Absorción sonora: Es el mecanismo por el cual un material hace que parte de la energía sonora incidente, se transforme en otro tipo de energía. En energía calorífica, energía de deformación, energía mecánica. Sirve para mejorar la acústica interna del cuarto.
- b. Aislamiento acústico: no dejando entrar ni salir al sonido al cuarto.

Difusores: El campo reverberante en un recinto puede modificarse mediante el uso de difusores acústicos. Son elementos complementarios a los tratamientos fonoabsorbentes que permiten lograr una mayor uniformidad del campo sonoro, pues redistribuyen espacial y temporalmente la energía que reflejan. A diferencia de los materiales fonoabsorbentes, los difusores no quitan energía a las ondas sonoras incidentes, si no que homogeneizan espacialmente la distribución de energía. Un campo sonoro muy difuso crea un sonido envolvente, haciendo que el campo reverberante llegue al espectador por igual de todas direcciones. Pueden ser superficies irregulares todos los elementos interiores de un recinto ya que se comportan como difusores para un determinado rango de frecuencias, que viene determinado por las dimensiones de las irregularidades. También pueden ser superficies convexas, formadas por una superficie lisa convexa que refleja las ondas sonoras de forma divergente, evitando que el sonido se refleje sobre una zona reducida. Algunos difusores producen difusión temporal.

Tiempo de reverberación: Es el tiempo, en segundos, que transcurre desde que la emisión de ruido se interrumpe, hasta que el nivel de presión sonora establecido en la sala se haya disminuido a su millonésima parte (60dB) [TR60]. Se calcula como:

$$T_R = \frac{0.163V}{A}$$

Es directamente proporcional al volumen del recinto, depende de la frecuencia a través del área equivalente de absorción sonora y se calcula como mínimo para 6 bandas de octavas (125Hz a 4000Hz).

Propiedades acústicas de materiales: Es la relación entre la energía incidente y la energía absorbida en cada reflexión de la onda sonora:

$$\alpha = \frac{\text{energía absorbida}}{\text{energía incidente}} \in [0,1]$$

Expresa la energía absorbida por unidad de área del material. Su valor varía con la frecuencia.

Materiales fonoabsorbentes: Son aquellos con propiedades de absorción sonora. Se clasifican en:

a. Materiales porosos: Son absorbentes disipativos que transforman la energía sonora en energía calorífica (absorbentes disipativos). Poseen intersticios o poros comunicados entre sí. Su grado de absorción depende de la porosidad, el espesor, la cámara de aire detrás y el revestimiento con que se los cubra (poroso/impermeable). El revestimiento que los cubra también debe ser poroso.

i. Fibrosos: Ej.: Lana de vidrio o lana de roca o lana de maderas

ii. Esponjosos: Ej.: esponja de lavar la vajilla o espuma de poliuretano (se usa para acustizar estudios).

b. Tipo panel: El mecanismo de absorción transforma la energía sonora en energía de deformación (absorción de membrana).

i. Membranas:

ii. Placas: Ej.: madera terciada.

c. Tipo resonador: Transforman la energía sonora en energía mecánica (absorción de Helmholtz). Un esquema básico de un resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) está construido con paneles perforados o ranurados y montado en una pared. Ej.: Cielorrasos de PVC microperforados.

Cielorrasos de PVC microperforados: Es un sistema de cielorraso tensado (lámina flexible), que se compone básicamente de 3 elementos:

i. Perfil de aluminio que se fija a las paredes perimetrales del local.

ii. Film de PVC tensado que conforma toda la superficie del cielorraso.

iii. Arpón que está soldado en todo el perímetro de la tela y se engancha en el perfil del borde.

d. Volumétricos o funcionales: Objetos, muebles, personas. Ej.: butacas con y sin público, paneles colgantes (baffles). Esta categoría está relacionada con el TP que hubo que hacer en clase.

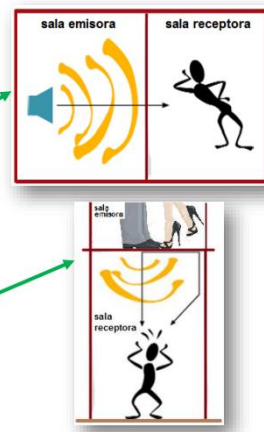
Materiales aislantes:

Vías de propagación del sonido: Es importante reconocer la vía de propagación para poder realizar un aislamiento acústico eficiente. Puede ser:

▪ AISLAMIENTO ACÚSTICO:

• A ruido aéreo

• A ruido de impactos



a. A ruido aéreo: No se trabaja con el coeficiente de transmisión tau (τ), si no con el índice de reducción, que depende del tau. El aislamiento de paredes, techos suspendidos, forjados, puertas y ventanas respecto al ruido aéreo puede ser descrito como un índice de reducción R , o lo que es igual a TL (Transmission Loss). Este índice describe el número de decibelios que el sonido se debilita al pasar a través de un componente. El coeficiente de transmisión tau (τ) es adimensional (no tiene unidades), el índice de reducción sonora de una partición está en dB y vale $R = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right)$. A continuación, se detallan distintos tipos de aislamientos para ruido aéreo:

Aislamiento de particiones simples: Ej.: Tabique de placas de yeso y lana de vidrio, en el cual se pone un fibroso para que no vibre por el aire. Posee debilidad en bajas frecuencias, pero buen comportamiento en altas frecuencias.

La ley de la masa y la frecuencia se utiliza, en general, en muros, no para cualquier tipo de pared de ladrillos. Teóricamente, para una dada masa superficial, el aislamiento acústico aumenta $6dB$ cada vez que duplicamos la frecuencia (subimos una octava), para una frecuencia determinada, el aislamiento acústico aumenta $6dB$ cada vez que duplicamos la masa superficial. En realidad, esos aumentos son del orden de $4dB$.

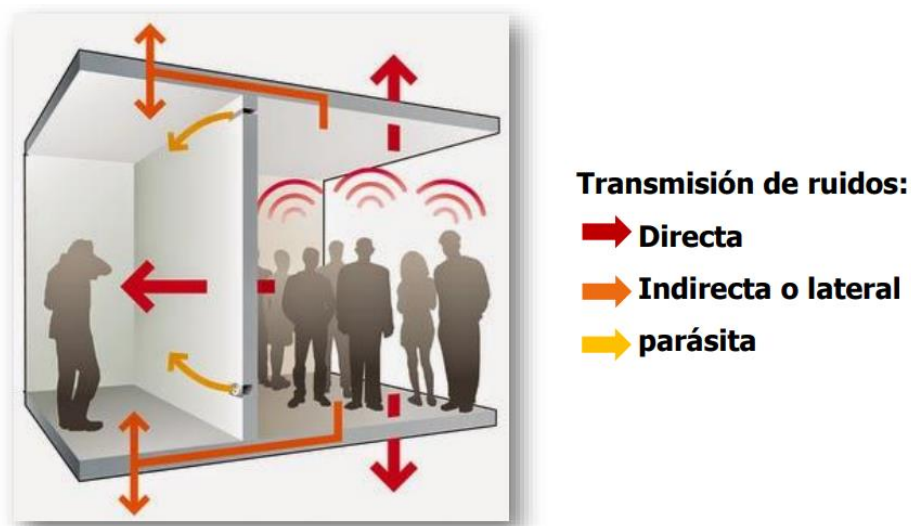
Aislamiento de particiones dobles: Para muros dobles con material absorbente en la cámara de aire, se calcula la frecuencia de resonancia. Una vez calculada, se elige la octava más próxima por encima de este valor y se calcula el índice R para dicha frecuencia. A partir de esa frecuencia y de ese valor de R , se obtiene la recta de aislamiento acústico de la partición con una pendiente de $+8dB/oct$. Ej.: En una pared doble, la reflexión y transmisión no poseen un vínculo estructural entre ambas, no debe utilizarse un aislante térmico (Telgopor) ya que no aísla sonoramente. Se busca que ambas paredes tengan distintas frecuencias críticas. El aire vincula ambas paredes.

Ventana doble: La parte más débil son las aberturas porque no tienen hermeticidad (que cierra perfectamente de modo que no deja pasar el aire ni el líquido). Se llaman sistemas constructivos, suelen ser de PVC y adentro poseen perfil de acero. Soportan rasgos de espesores de vidrio. El aislamiento tiene que ver con la masa y la hermeticidad. Si es más pesado, vibra menos y, por lo tanto, aísla más. Si es más hermético (cierra mejor), aísla mejor. A veces, se hacen con gases o vidrios separados al vacío. Pueden mejorar el aislamiento con sellado (no se suele usar macilla). Cuanto más gruesos son los vidrios aíslan mejor, pero son más caros. Las rendijas perimetrales debilitan el aislamiento.

Aislamiento acústico de puerta: Se deben evitar las perforaciones o rendijas, la puerta debe poseer una barrera acústica aplicada en ambas caras, la barrera acústica debe cubrir parcialmente los puentes acústicos y tener un sellado perimetral. De esta manera, el índice de reducción sonora aumentará considerablemente.

b. A ruido de impactos: Está relacionado con la reducción del ruido de fondo procedente de los pasos de las personas en la estructura del suelo. El nivel de impacto de sonido en la habitación de abajo determina la clase de aislamiento. Se puede utilizar un techo suspendido para mejorar la absorción acústica del ruido de impacto y, de este modo, reducir el nivel de presión sonora en la habitación inferior. Las mejoras siempre van unidas con tipos de suelos muy específicos. Para realizar una aislación se generan impactos con una máquina y se miden los impactos y, luego, su capacidad de reducción sonora, se puede utilizar “Particiones compuestas” para calcular la reducción total de una habitación, por ejemplo.

Vías de transmisión entre recintos (aislamiento acústico “In Situ”): Pueden ser directas, indirectas o laterales, parásitas. “In Situ” significa “en su lugar original”.



Ensayos normalizados: Ensayos establecidos en normas.

Medición de propiedades acústicas de materiales y objetos: Se realizan en laboratorios. Se busca medir lo que se está generando sin ruidos externos y con bajo piso de ruido.

Medición del coeficiente de absorción sonora: Se puede obtener de dos maneras:

a. Cámara reverberante: Es el método más completo. Las cámaras reverberantes no poseen paredes paralelas para no generar la formación de ondas estacionarias entre las superficies enfrentadas. Se crea una “Box in Box” (caja dentro de caja), que es otra cámara dentro del cuarto. Dicha cámara se monta en forma anti vibratoria, posee su puerta de acceso y paredes estructuralmente independientes. El espacio de aire entre ambas cámaras se rellena con Lana de Vidrio (normalmente). El objetivo es que la cámara sea muy reverberante para que al agregar un material absorbente baje la reverberación y se pueda medir su coeficiente de absorción sonora. Se toma el tiempo en que tarda en caer 60dB desde el momento en el que se apagó la fuente generadora de ruido (TR60) tiempo de reverberación y se mide con un registrador de nivel. Del techo se cuelgan difusores de baja frecuencia. Las curvas de absorción dependen del material

del que están hechos (la tela, por ejemplo, más el relleno del tapizado en butacas). Además, lo que afectan a las frecuencias más graves no son los materiales porosos, por lo que no importa si están ocupadas o vacías, depende de la estructura de las butacas, la separación, el volumen que ocupan.

Absorbentes volumétricos: obtengo área equivalente de absorción sonora, se mide en m^2 . Se utiliza cuando la superficie es ambigua. Ej.: butaca con tela y diferentes materiales.

Absorbentes para un elemento: obtengo el coeficiente de absorción sonora. Ej.: muestra del tapizado de las butacas.

El coeficiente de absorción sonora, es adimensional (no tiene unidades), se puede obtener a partir del área equivalente de absorción sonora A y el área cubierta por dicho material S :

$$\alpha = \frac{A}{S}$$

b. Tubo de Kundt (o tubo de onda estacionaria): Es un método útil para algunas ocasiones. Por ejemplo, para medir una muestra del tapizado de las sillas. Se tapa el tubo con una tapa. Se forman ondas estacionarias dentro del tubo, donde se forman a su vez puntos de mínima y máxima presión. Se trabaja con tonos puros que están en tercios de octava. El aire dentro del tubo se comporta como una masa que hace vibrar el micrófono. Al poner un material fonoabsorbente, la onda reflejada pierde energía y amplitud y es menor que la incidente. El coeficiente de absorción se lee en forma directa en el medidor.

Cámara anecoica: Es una cámara de hormigón dentro de una de ladrillos. Está montada sobre resortes. Es lo contrario a la reverberante (no hay ecos o reflexiones de sonido). Se busca trabajar en condiciones de campo libre. Se suele utilizar para la calibración precisa de fuentes y dispositivos sonoros. El principal uso de este tipo de cámaras es el de medir la potencia y directividad de muchos instrumentos o dispositivos como antenas, motores, altavoces o maquinaria.

Tipos de mediciones:

a. Medición en condiciones de laboratorio: se caracterizan particiones (paneles, tabiques, ventanas, puertas).

b. Mediciones “In Situ” (en el lugar original): Se obtiene el aislamiento global entre recintos. No se pueden medir un tabique en sí mismo, ya que hay transmisiones por flaqueos. No se puede discriminar, se mide un “todo”.

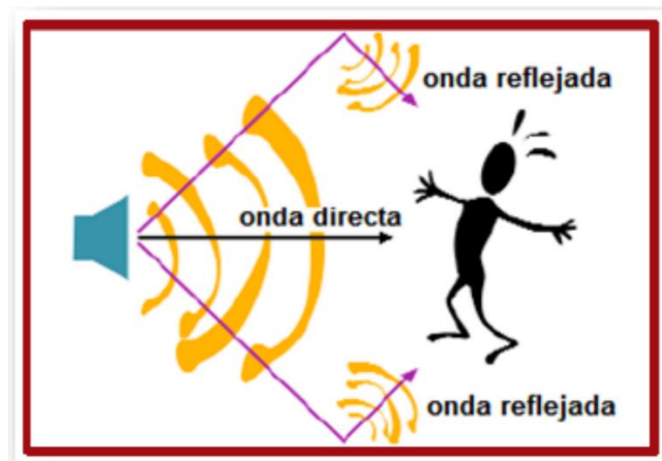
Cámaras de transmisión: Se utilizan para medir aislamiento. Poseen una cámara externa, varias cámaras internas y un montaje anti vibratorio. Son 4 habitaciones colocadas de a pares, no se tocan ni tocan la cámara externa. Están montadas sobre ladrillos. Cualquiera de los dos pares se utiliza para medir aislamiento a ruido aéreo o ruido de impacto. Se mide banda por banda “cuanto pasa” y el TR_{60} . Se genera ruido desde la cámara de emisión y se mide en la cámara de recepción. Las cámaras de transmisión vertical sirven para aislar a ruido de impactos de particiones horizontales (de pisos o revestimientos de pisos).

El sonido en los recintos

Campo sonoro en un recinto:

Cuando se genera sonido en un recinto cerrado se genera una onda que se propaga en varias direcciones. Un oyente en el recinto recibe dos tipos de sonidos:

- a. Un sonido directo: llega directamente desde la fuente sin ninguna interferencia, es el único que llegaría al oyente si él y la fuente estuviesen al aire libre, la energía asociada al sonido directo depende de la distancia a la fuente sonora (el nivel sonoro disminuye $6dB$ cada vez que se duplica la distancia fuente-receptor, en condiciones de campo libre sin superficies reflejantes del sonido).
- b. Un sonido indirecto o reflejado: es el generado por las reflexiones de la onda sonora sobre las superficies u objetos del recinto, la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el sonido y de la absorción sonora en las superficies y objetos que encuentre en su camino. A mayor distancia recorrida se tendrá menor energía directa, a mayor absorción sonora se tendrá menor energía reflejada. Se pueden diferenciar dos tipos:
 - i. Reflexiones tempranas (“early reflections”): llegan inmediatamente después del sonido directo (aproximadamente hasta $100ms$ después). Están más separadas entre sí que las reflexiones tardías pues llegan después de 1, 2 o a lo sumo 3 reflexiones.
 - ii. Reflexiones tardías (“cola reverberante”): llegan después de 4 o más reflexiones.



Distancia Crítica: Se define así a la distancia que existe desde la fuente hasta el punto en que se igualan el campo directo y el reverberante. A partir de la distancia crítica, el campo directo deja de enmascarar a reverberante y el reverberante empieza a enmascarar al directo. A medida que aumenta la absorción sonora de la sala (disminuye TR_{60}), aumenta la distancia crítica.

Campo sonoro en un recinto: El nivel de presión sonora en cualquier punto interior de un recinto será el resultado de las contribuciones de los campos directo y reverberante.

- i. Campo directo: La directividad de la fuente, Q , indica el nivel de presión sonora que genera en función del ángulo de radiación. Depende de la frecuencia y para describirla se utiliza el factor de directividad Q (cociente entre la intensidad acústica que en esa dirección emite la fuente y la intensidad que emitiría una fuente puntual omnidireccional que radiara igual potencia total) y el índice de directividad ID (10 veces el logaritmo decimal del factor de directividad Q). En campo libre, $Q = 1$. La directividad de la voz humana está determinada

por el sistema de fonación y por la forma de la cabeza, siendo la dirección frontal la de mayor directividad. Si bien la directividad aumenta con la frecuencia, a los efectos prácticos se considera que el factor de directividad de la voz humana en la dirección frontal es: $Q = 2$.

ii. Campo reflejado (reverberante): La constante acústica del local (R) mide la capacidad del recinto para la absorción del sonido. Depende de la frecuencia y se puede calcular teniendo en cuenta el área equivalente de absorción sonora total y el coeficiente de absorción sonora promedio del recinto (es un parámetro ficticio). Si existe una gran absorción sonora, R es grande y el nivel de presión sonora disminuye con la distancia (condición anecoica). Si la absorción sonora es mínima, R es pequeña, el nivel sonoro en cualquier punto del recinto será aproximadamente constante, independiente de la distancia (condición reverberante). Las reflexiones dependen de las características de las superficies interiores del recinto:

Reflexión y difusión: Si la superficie donde se produce la reflexión presenta alguna rugosidad, la onda no se refleja en una única dirección si no que se descompone en múltiples ondas.

Focalización del sonido: Reflexión en superficies lisas y curvas.

¿Qué ocurre cuando las reflexiones se producen en superficies paralelas?: Se pueden producir “eco de aleteo” o “eco flotante” (flutter echo).

Eco de “aleteo” (flutter echo): Repetición múltiple, en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora, situada entre dos superficies paralelas, lisas y muy reflectantes. Este efecto realza determinadas frecuencias, provocando un sonido más metálico. Se pueden generar ondas estacionarias, que son ondas que no se propagan, no avanzan por el espacio y no transportan energía.

Onda estacionaria: Se forma por la interferencia de dos ondas de la misma longitud de onda (o frecuencia) que avanzan en sentido opuesto a través de un medio. Las ondas estacionarias permanecen confinadas en un espacio (sala, cuerda, tubo con aire, membrana, etc...). La amplitud de la oscilación por cada punto depende de su posición, la frecuencia es la misma para todos y coincide con la de las ondas que interfieren. Tiene puntos que no vibran (nodos), que permanecen inmóviles, estacionarios, mientras que otros lo hacen con una máxima amplitud de vibración (vientres o antinodos). En cada punto, la vibración resultante tiene amplitud variable en el tiempo, pero no en el espacio, es decir configura una onda fija en el mismo. No es una onda de propagación. Los puntos no se desplazan, pero vibran con una amplitud máxima y una frecuencia angular.

Onda viajera: Representa una perturbación que se mueve de un lugar a otro a una velocidad que depende de las propiedades elásticas y de inercia del medio.

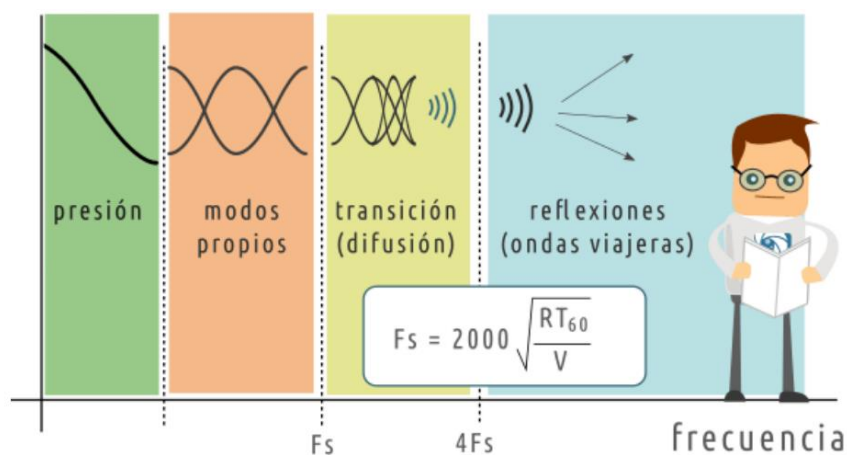
Superposición de dos ondas que viajan en direcciones opuestas: La onda estacionaria generada no se mueve ni a la izquierda ni a la derecha, si no que simplemente oscila hacia arriba y hacia abajo en función del tiempo. La amplitud de esta onda es el doble de la de las ondas individuales cuando las ondas están en fase y es cero cuando las ondas están en contrafase.

Onda estacionaria debido a reflexión sobre superficie dura: La onda se refleja sobre una superficie dura y rígida, volviendo sobre sí misma y formando una onda estacionaria. La onda reflejada está invertida en comparación con la onda incidente y ahora viaja en la dirección opuesta. A medida que la onda reflejada se superpone con la incidente, se forma rápidamente una onda estacionaria. No hay transferencia neta de energía. El extremo fijo de la cuerda es un nodo.

Modos de resonancia (o modos “propios de la sala”): Cuando el sonido se refleja entre dos superficies paralelas se producen interferencias constructivas y destructivas, dando lugar a la formación de ondas estacionarias. Es una característica propia de cada sala y el efecto que produce se denomina “coloración”. Es más común en recintos pequeños, como los de estudios de grabación, por ejemplo. Cada modo propio está asociado a una frecuencia (frecuencia propia). Si la distancia entre dos superficies paralelas de una sala es igual a media longitud de onda, se generará una onda que permanecerá estacionaria reflejándose entre las dos superficies paralelas, perdiendo paulatinamente energía acústica. Estos refuerzos ocurrirán fundamentalmente para tres frecuencias básicas correlacionadas con las dimensiones del recinto (largo, ancho y altura) y para sus múltiplos. Según la cantidad de superficies que intervengan, los modos podrán ser:

- i. Axiales: se establecen por reflexión entre dos superficies. Son los más importantes y fáciles de predecir, dado que ocurrirán para todas las frecuencias cuya longitud de onda sea igual a la mitad de las tres dimensiones principales (y para sus múltiplos).
- ii. Tangenciales: se establecen por reflexión entre cuatro superficies.
- iii. Oblicuos: se establecen por reflexión entre las 6 superficies del recinto.

División del espectro en regiones acústicas:



Zona de presión (color verde): Estas frecuencias son las que corresponden a longitudes de onda tan grandes que no caben dentro de la habitación (presión). Si hay sonido a esas frecuencias, simplemente la onda “no cabe” en la sala y no se puede resonar, pero la presión se transmite y es perceptible como sonido. Es muy difícil predecir el comportamiento de dichas ondas.

Frecuencia de corte (línea punteada): Se da cuando la mitad de la longitud de onda coincide con la dimensión más larga de la sala.

Modos propios (naranja): Es la zona de frecuencias bajas (grandes longitudes de onda). El comportamiento del campo es de naturaleza ondulatoria. Se pueden percibir los efectos de las ondas estacionarias originadas por dichas frecuencias. El rango de frecuencias de esta zona está relacionado con la menor frecuencia modal audible de interés y con la frecuencia de Schroeder. La excitación de un modo propio será mayor en cuanto menor sea la diferencia entre la frecuencia de la fuente sonora y la frecuencia del modo propio de la sala y en cuanto más próxima esté la fuente sonora de una posición de máxima presión de la distribución en el espacio. Por este motivo, una

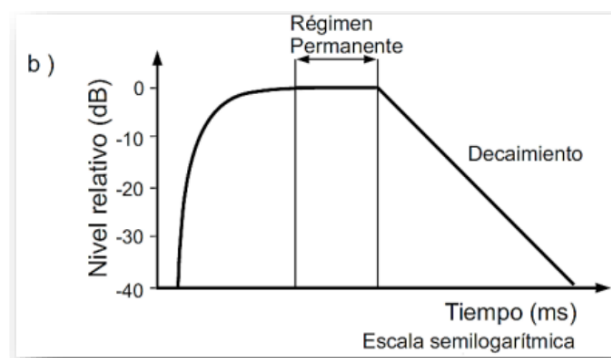
fuerza sonora ubicada en un rincón de un recinto paralelepípedo (emitiendo una señal cuya frecuencia coincida con la de alguno de sus modos), podrá excitar plenamente dicho modo propio. La existencia de modos propios es inevitable.

Zona de transición (zona de difusión/amarillo): Por encima de la frecuencia de Schroeder hay una zona de transición en la que conviven la influencia de las ondas estacionarias y la de las ondas viajeras puras. Dentro de esta zona existe un comportamiento mixto, es decir, un poco como ondas y un poco como rayos (por lo que se pueden aplicar principios de óptica). El rango de frecuencias de esta zona está comprendido entre la frecuencia de Schroeder y una frecuencia superior que es del orden de 4 veces dicha frecuencia. A partir de dicha frecuencia de Schroeder, las ondas estacionarias se hallan tan poco espaciadas entre sí, que no afectan el sonido. Si ésta es baja, la respuesta en frecuencia de la sala será plana en un amplio rango.

Zona de reflexiones (azul): A partir de aproximadamente $4F_s$ y hasta el límite superior de percepción ($20kHz$), el campo se comporta según las leyes de la óptica. Dejan de tener influencia las resonancias, y predominan las ondas viajeras “puras” con su comportamiento más sencillo: reflexión, absorción, difracción, ... En esta zona es donde existen mayores reflexiones, por lo que se debe controlar más la absorción y la difusión.

Reverberación: Es un fenómeno acústico de reflexión producido cuando un frente de onda o un campo directo alcanza una pared, el suelo o el techo del espacio en el que se encuentra. También se puede definir como el decaimiento del nivel sonoro.

Tiempo de reverberación (TR o T_{60}): Es el tiempo, en segundos, en el que transcurre desde que la emisión de sonido se interrumpe, hasta que la energía sonora establecida en la sala ha disminuido hasta su millonésima parte.



$TR_{óptimos}$: Son los tiempos de reverberación recomendados para cada recinto en función del uso al que están destinados. Los recintos dedicados a la palabra requieren tiempos menores que los destinados a la música. En general, los tiempos grandes provocan pérdida de inteligibilidad de la palabra. Por otro lado, con tiempos muy cortos, la voz carecerá de cuerpo y sonoridad. El mejor tiempo para un recinto donde se ejecuta música, depende del espacio y del tipo de música. La música ejecutada con instrumentos tales como un órgano, se percibe mejor en recintos con tiempos de reverberación largos. La música rápida, requiere un tiempo distinto a la de la música de cámara. Estos criterios están expresados, generalmente, a través de tablas o gráficos de curvas con valores recomendados en función del volumen y destino del recinto. Estos gráficos pueden diferir de autor en autor ya que son valores que se determinan empíricamente y dependen de la cultura y época en que se haya realizado el estudio. De todos modos, las diferentes recomendaciones no difieren demasiado entre sí.

Cálculo del tiempo de reverberación (modelos de predicción): Además de los criterios para determinar los valores de $TR_{\text{óptimos}}$, existen modelos matemáticos para calcular los tiempos de reverberación de proyecto esperables en una sala. Están basados en el cálculo de la absorción sonora equivalente de la sala (A en m^2).

También existen modelos de cálculo empíricos, los más conocidos son:

Ecuación de Sabine: Para unidades métricas de absorción y a temperatura normal (22°C). Resulta válido para bajos valores de absorción ($\alpha < 0,20$).

$$T_R = \frac{0,163 V}{A_{eq}}$$

Si los recintos son grandes ($V > 5000m^3$), y la humedad relativa del ambiente es baja (10 a 30%), debe considerarse la absorción del aire para las altas frecuencias ($f > 2kHz$). La absorción del aire depende de la temperatura y de la humedad relativa del aire. Esto modifica la ecuación de arriba.

Ecuación de Norris-Eyring: Es más exacta que la de Sabine para recintos con mayor absorción sonora.

Ecuación de Evans-Basley: Detalla la dependencia de la absorción sonora del aire con la frecuencia y con la humedad. A mayor frecuencia, mayor absorción del aire y a mayor humedad, menor absorción del aire.

Ecuación de Millington-Sette: Es más exacta cuando los coeficientes de absorción sonora son muy diferentes.

Cálculo de TR en un proyecto acústico: Independientemente de todo lo visto hasta ahora, cuando se realizan cálculos en un proyecto acústico, debe tenerse en cuenta cuál es el origen de los datos. Es importante recordar que los métodos normalizados para medición de propiedad de absorción sonora más conocidos son dos: En cámara reverberante o en tubo de onda estacionario (tubo de Kundt). Por lo general, para objetos, personas, etc... se obtiene el área equivalente de absorción (en m^2) ya que son absorbentes volumétricos, esto se hace en la cámara reverberante. Para materiales de recubrimiento (telas, etc...) se obtiene el coeficiente de absorción sonora (adimensional).

Criterios para el diseño acústico de salas: No existe una fórmula definitiva para diseñar un recinto acústico, pero la mayoría de los criterios apuntan a salas rectangulares por la facilidad de análisis y economía de construcción. El análisis de las bondades acústicas de un recinto, sea éste una oficina, un estudio o una sala de conferencias, comienza necesariamente por sus condiciones de aislamiento al ruido intrusivo (es decir, procedente del exterior), o al generado en su interior y que puede trascender al exterior. En general, para calcular el aislamiento acústico se debe tener en cuenta:

- Si la fuente sonora está dentro del recinto: los máximos niveles sonoros que se generarán dentro del recinto, los máximos niveles sonoros permitidos en el exterior del mismo (si hay límites que cumplir), o los niveles sonoros existentes cuando el recinto no se halle operativo.
- Si la fuente sonora estará fuera del recinto: Los máximos niveles sonoros permitidos dentro del recinto (si se trata de un recinto protegido del ruido). Los máximos niveles sonoros que se generarán en el exterior del recinto.

En cada caso, se trabajará con los espectros de ruidos, midiendo o calculando LZ_{eq} en bandas de octavas ya que no todas se atenúan igualmente. El aislamiento acústico necesario resulta de la

diferencia entre el máximo nivel de ruido generado (o permitido) en el interior de la sala y el existente (o permitido) en el exterior de la misma y está determinado por la envolvente acústica (todo lo que conforma el recinto desde el piso, techo, aberturas, etc..., lo que tendrá mayor peso será el elemento más débil como por ejemplo las aberturas que al no ser herméticas pierden aislamiento acústico, son más livianas y pierden transmisión). Se destaca la importancia de limitar el ruido de fondo propio de los recintos protegidos del ruido. Existen criterios de evaluación del ruido de fondo normalizados.

Norma IRAM 4070: Ruido. Procedimiento para su evaluación utilizando los perfiles NC y RC. Las curvas de criterio NC se utilizan para establecer los niveles sonoros máximos recomendables como espectros de ruido de fondo de un recinto en función de su uso (aulas, oficinas, salas de conferencia, teatros, etc...). Para evaluar si se cumple con un “perfil NC-xx” se debe medir el espectro de ruido de fondo y compararlo con la curva NC-xx seleccionada. Esto se hace en bandas de octavas entre 63Hz y 8kHz. Se dice que un recinto cumple con una determinada especificación NC cuando todas las bandas del espectro de su ruido de fondo están por debajo del perfil NC correspondiente.

Campo sonoro interior: Para evitar “coloraciones” por parte de la sala a la hora de diseñarla, se debe apuntar a obtener una respuesta en frecuencia plana en todo el rango de audio. En frecuencias bajas la absorción sonora de los materiales porosos es deficiente, de manera que no pueden controlar los modos propios. Pueden utilizarse otros fonoabsorbentes o, mejor aún, utilizarse criterios de minimización de los efectos de las resonancias. Las frecuencias altas no son un problema pues los modos conforman un cuasi continuo, y el comportamiento de los fonoabsorbentes porosos es adecuado como para lograr un tiempo de reverberación recomendado. En salas más grandes, es más probable que se formen ondas estacionarias en frecuencias bajas, donde los modos son más espaciados entre sí. Deben atenderse principalmente las frecuencias bajas, pues estos son los modos más espaciados entre sí y se pueden percibir claramente. Se debe estudiar desde el primer modo (determinado por la mayor de las dimensiones de la sala) hasta la frecuencia de Schroeder. Por debajo de la frecuencia de Schroeder, la respuesta en frecuencia del recinto está dominada por modos separados, mientras que por encima de F_S los modos se separan tan poco entre sí que se superponen (“se funden”). Para volúmenes mayores o iguales a $300m^2$, F_S será menor o igual que 100Hz. De manera que, para recintos medianos y grandes, F_S será baja y las frecuencias de interés caerán en la “zona cuasi-plana” de respuesta en frecuencia del recinto. Mientras que para salas pequeñas, la F_S es relativamente alta, y por lo tanto parte de las frecuencias de interés estarán por debajo de la F_S , donde serán importantes los modos individuales. La alinealidad de la respuesta en frecuencia de la sala puede provocar las coloraciones del sonido.

Para dimensionar la sala, tratando de minimizar el efecto de los modos propios, se puede:

- i. Diseñar recintos de superficies no paralelas entre sí.
- ii. Recurrir al uso de difusores
- iii. Elegir una relación entre sus dimensiones tales que se cumpla con algún criterio de mejora del comportamiento modal, por ejemplo:
 1. El criterio de Bolt: Se arma un gráfico de relaciones entre largo y ancho (para una altura unitaria) donde los diseños adecuados caen dentro del área de la curva. El área sombreada se determina tomando como referencia las dimensiones de salas exitosas.

2. El criterio de Gilford: Se basa en el análisis del comportamiento de los modos axiales, despreciando los tangenciales y oblicuos por su poco peso. Según el, la separación de estos modos no debería ser superior a los 20Hz , argumentando que si ésta fuera mayor, el modo se “escucharía”. El objetivo es lograr una uniformidad de distribución de los modos axiales, evitando cambios bruscos en la percepción. Este criterio posee varias objeciones: No considera el volumen del recinto. Ignora la presencia y la importancia del resto de los modos. No contempla la existencia de modos coincidentes o cercanos en frecuencia (modos dobles, triples, etc...). El concepto de 20Hz de diferencia entre modos, es un valor importante en frecuencias bajas, aunque deja de ser significativo entre 260Hz y 280Hz .

3. El criterio de “densidad de modos” o de Bonello: Contempla todos los modos presentes, fijando el análisis sobre la base de porcentajes de la frecuencia modal y no a distancias fijas. Este criterio es el que se utilizó en la cátedra para el TP2. Para aplicar el criterio:

1. Se utiliza la fórmula de Rayleigh para calcular todas las frecuencias de modos propios del recinto comprendidas entre la menor frecuencia audible de interés y la frecuencia de Schroeder.
2. Se divide el espectro en tercios de octava (dado que satisface a la discriminación de frecuencias del oído).
3. Se calcula y grafica la “densidad de modos” (cantidad de modos por cada tercio de octava).

Además, la curva de densidad de modos debe ser monótonamente creciente, o a lo sumo tener la misma cantidad de modos en dos tercios de octava sucesivos y no deben existir modos dobles (si los hubiera se los tolera en tercios de octava con densidad de modos mayor que cinco).