Acústica Física

# 

# **Conceptos generales**

## 

## *Sonido – Onda*

El ámbito de las señales periódicas es altamente complejo y variado. Entre todas las ondas, el sonido tiene una peculiar característica que lo distingue. Ésta consiste en que nuestro oído responde de un modo muy sensible a este tipo de ondas.

La onda sonora es una onda mecánica que involucra el movimiento de partículas bajo la acción de fuerzas. Es una onda de presión en gases dado que la perturbación se expresa como un incremento y local de la presión que se propaga y recibe como una señal en el oído. A través de un proceso mecánico en el oído externo y medio, se traduce en una señal nerviosa en el oído interno, que es transmitida al cerebro e interpretada como “sonido”. En gases es una onda longitudinal dado que se trata de una compresión local en un medio isótropo y, por lo tanto, la dirección de propagación y el desplazamiento responsable de la perturbación en la presión tienen la misma dirección. En consecuencia la onda sonora no se polariza. Es además una onda no dispersiva, lo que quiere decir que todas las frecuencias componentes de una única señal viajan con la misma velocidad, por lo tanto coinciden la velocidad de grupo con la velocidad de fase y se conserva la forma de la onda si no hay obstáculos en su camino. Y además es adiabática, dado que los procesos de compresión y expansión son tan rápidos que los incrementos y disminuciones locales de temperatura en un gas real como el aire no tienen tiempo suficiente de propagar calor por difusión molecular. Como veremos, esto hace que la onda sonora sea un poco más veloz que lo que sería si la señal fuese isotérmica.

En otros medios, la onda sonora puede involucrar más que una perturbación en la presión, puede ser transversal, dispersiva y no necesariamente adiabática. Dado que nos interesa el sonido en el medio más habitual en el que estamos sumergidos, que es el aire en el fondo de la atmósfera, nos limitaremos al sonido en aire en condiciones medias de presión atmosférica del orden de 1000hPa. Durante la primera parte del desarrollo del curso nos propondremos fundamentar físicamente estas características de la propagación del sonido en aire.

## 

*Pulso, tren de ondas y onda*

Se hace referencia a las “ondas sonoras” pero intentaremos precisar la terminología. El término “onda” se utiliza con mucha frecuencia y en muchos contextos. En el ámbito de la física, se refiere con él a un mecanismo de transmisión de energía que no requiere transporte de materia. Más específicamente, es una perturbación en un medio que, en función de procesos propios del medio, recupera su estado de equilibrio estable forzando que la perturbación se propague al entorno inmediato de la región perturbada. En el caso particular de las ondas mecánicas en medios elásticos, es la elasticidad lo que aporta las fuerzas restauradoras y el mecanismo de propagación. En gases, es el choque entre moléculas el mecanismo de propagación y la anomalía local de presión, lo que altera el estado normal de choque intermolecular.

Podemos precisar un poco más los términos y expresar como “pulso” a una perturbación local que se propaga en el medio que lo permite en tanto la perturbación es única. Si se trata de una secuencia finita de pulsos iguales, será un “tren de ondas”, aunque en la práctica la primera secuencia de pulsos y la última suelen tener un carácter diferente a los pulsos centrales del tren. De modo que es conveniente distinguir el “transitorio de ataque o de inicio” y el “transitorio de decaimiento o de finalización” del tren de ondas. También se puede hablar de “paquete de ondas” cuando el tren finito está compuesto por un complejo de pulsos con diferentes propiedades cada uno. Una “onda” sería, en principio, un tren infinito de pulsos. Si son todos iguales, bastará conocer las propiedades de un pulso para tener un conocimiento completo de la onda. Si varían de acuerdo con una ley de “modulación” que puede describirse en términos de algunas propiedades, bastará adicionar tal ley. Si las propiedades de los pulsos se alteran de acuerdo con alguna ley que describa algún fenómeno físico (reflexión, refracción, difracción….), bastará adicionar tales consideraciones y se tendrá un conocimiento completo de la onda.

En una primera aproximación, se trabajará sobre ésta idealización, pero recordando que en el mundo físico real, sólo hay pulsos, trenes y paquetes de ondas.

En síntesis:

*Pulso:* es una perturbación local en un medio que se propaga sin necesario transporte de la materia, pero con transferencia de energía

*Tren de ondas:* es una secuencia de pulsos con similares (no necesariamente iguales) características que tienen un transitorio de inicio (ataque), un periodo estable (duración), y un transitorio de finalización (decaimiento).

*Onda:* una secuencia infinita de pulsos similares

Todo sonido real es un tren de ondas, aunque lo idealizaremos, como primera aproximación, como una onda limitándonos a la parte central del tren.

## *Fenómenos en ondas sonoras en aire*

Entre los más conocidos, las ondas sonoras en aire se reflejan en superficies de discontinuidad, pero también se refractan cambiando la velocidad de propagación al ingresar a un medio diferente. La reflexión es responsable de fenómenos como el eco o la reverberación o ecos múltiples. Además de ser reflejada y refractada, puede ser absorbida por otro medio transformándose esencialmente en calor. La onda sonora se difunde al propagarse en medios y al reflejarse en discontinuidades rugosas. Se difracta, especialmente al rodear obstáculos o pasar a través de orificios comparables con la longitud de onda, con fenómenos muy complejos dado que las dimensiones de los obstáculos y orificios con efectos de difracción pueden variar entre varios metros a unos pocos milímetros. La superposición de ondas sonoras genera fenómenos de interferencia y algunos efectos especiales como el batido. En determinadas condiciones pero muy importantes por los fenómenos involucrados, puede dar lugar a la producción de ondas estacionarias y efectos de resonancia. La señal sonora puede ser modulada en amplitud o en frecuencia. La emisión y recepción por fuentes y receptores en movimiento relativo da lugar al efecto Doppler, al igual que la reflexión en discontinuidades en movimiento relativo con la fuente.

Veremos que la onda sonora en aire no se polariza (longitudinal), pero puede ocurrir en otros medios en los que se puede propagar como onda transversal. Tampoco se dispersa en aire, pero puede ocurrir dispersión en medios en los que la velocidad de propagación depende de la frecuencia.

Veremos también que la onda de choque u onda expansiva no es una onda sonora propiamente dicha sino que responde a leyes diferentes que las que corresponden a una onda sonora.

## 

## *Elementos de la Teoría Cinética de Gases.*

Nuestra primera aproximación a la noción de una perturbación sonora en aire es la de una región de mayor densidad y compresión local o bien de enrarecimiento local. El choque entre moléculas propaga esta señal de presión como un “pulso” a partir de una fuente generadora de la perturbación.

La teoría cinética de gases se apoya en un conjunto de hipótesis tales como que todo volumen macroscópico de gas está formado por un gran número de moléculas, del orden de 3.1016 en cada milímetro cúbico en condiciones ambientales normales. Las moléculas están en continuo movimiento y separadas por distancias grandes, comparadas con sus dimensiones (si se considera que el diámetro de una molécula de gas es del orden de 10-10m, la separación es del orden de 10-6m, diez mil veces mayor que el diámetro). Las moléculas no ejercen fuerzas entre sí, excepto cuando chocan, por lo que entre choques se mueven en línea recta y con velocidad constante (ésta es una de las hipótesis más débiles y cuestionables de la teoría cinética). Los choques entre sí y con las paredes del recipiente que las contiene son perfectamente elásticos (otra hipótesis cuestionable). En ausencia de fuerzas externas, las moléculas están distribuidas uniformemente en todo el recipiente. Todas las direcciones de movimiento son igualmente probables.

Ésta última hipótesis permite evaluar el choque de moléculas contra las paredes de un recipiente desde todas direcciones y con todas las velocidades posibles con un máximo de aleatoriedad, de modo que la distribución de velocidades por cada dirección resulta gaussiana. El cálculo de la transferencia de cantidad de movimiento en choques perfectamente elásticos y la integración sobre todas las direcciones y velocidades, permite arribar a una ecuación asimilable a la de estado de gases ideales. De allí se interpreta la temperatura de un gas ideal como una medida de la energía cinética media de agitación y, en términos más generales, a la temperatura absoluta como una medida de agitación molecular. A unos 300K y en condiciones típicas de presión en aire, la velocidad cuadrática media es del orden de los 480m/s. Veremos que la velocidad del sonido es del orden de los 350m/s, algo menor que la velocidad cuadrática media del aire, consistente con la noción de pensar al sonido como una propagación de una señal de compresión, resultante del incremento de choque molecular de moléculas más próximas entre sí en zonas de mayor presión y menor número de choques en zonas de enrarecimiento. El recorrido libre medio entre choques se estima en el orden de 2.10-7m a 3.10-7m con unas 5.109 colisiones por segundo y un tiempo medio entre choques del orden de 2.10-10s.

## *Estructura general de un sonido*

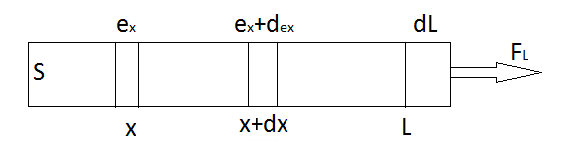
En principio, diremos que un sonido es una perturbación mecánica local en un medio elástico que transmite energía sin transporte de materia. La “emisión” hará referencia al mecanismo o fuente de generación de la perturbación como señal sonora. La “transmisión” puede hacerse a través de cualquier medio elástico, pero nos limitaremos al aire (con unas pocas excepciones que se mencionarán oportunamente), y nos concentraremos en las propiedades o características de la señal sonora en aire y de algunos fenómenos asociados. El motivo es que el sonido se distingue de otras ondas mecánicas no por sus características físicas sino fundamentalmente porque lo oímos. El oído, como receptor de la señal acústica, tendrá que ser estudiado tanto desde la fisiología como de la “psicoacústica”, parte de un área más general conocida como “psicofísica”.

A diferencia de cualquier otra onda mecánica el sonido es “sonido” en tanto hay un “oído” que lo decodifique como tal.

# **Planteo y solución de la ecuación de ondas sonoras**

## *Extensión de la Ley de Hooke*

Sea una barra homogénea de un material isótropo, de longitud y sección . En un extremo de la barra se le aplica una fuerza longitudinal . Esta fuerza le produce un estiramiento de modo que un punto en la posición se desplaza a la posición , y un elemento de longitud se estira a .



Sea , fuerza por unidad de área, medida en pascales ([), o “tensión de extensión”.

Definimos como “extensión” a si la barra es homogénea. Es una medida adimensional que se asume constante a lo largo de toda la barra. Si la barra no fuese homogénea, entonces , la extensión seria función de la posición.

Si se lleva este planteo al límite, la definición de extensión resulta

Una extensión natural de la Ley de Hooke consiste en relacionar la fuerza por unidad de área con el estiramiento en la forma:

donde es el “módulo de Young” con unidades en pascales.

(En la Ley de Hooke hay un signo negativo porque la fuerza elástica es la ejercida por el resorte en contra del estiramiento mientras que, en este planteo, la fuerza es ejercida sobre la barra elástica a favor del estiramiento).

## *Replanteo en gases*

La mayor parte de los gases, en condiciones usuales, son homogéneos e isótropos, pero sólo en tubos puede asumirse un tratamiento en una sola dimensión. Redefinimos el estiramiento como “comprensibilidad” en gases, es decir, el cambio de volumen dividido por el volumen “natural”, esto es, a presión atmosférica.

La extensión natural consiste en relacionar la presión con la compresibilidad. Expresamos la comprensibilidad en forma diferencial. El volumen , que refiere a un volumen elemental de una “partícula acústica” (suficientemente grande para conservar las propiedades macroscópicas del aire pero a la vez pequeña para aproximar aceptablemente el cálculo diferencial en términos del límite para un volumen infinitesimal) lo escribimos como asumiendo que se trata de un paralelepípedo tridimensional.

Cuando se lo somete a una presión externa, escribimos el nuevo volumen como un desarrollo de Taylor a primer orden sobre el desplazamiento de los límites del volumen elemental, y el cambio está dado por:

Operando y tomando el límite queda

Desarrollando el producto y despreciando los términos de mayor orden resulta

Relacionemos la presión con la comprensibilidad en la forma:

donde es el módulo de compresibilidad del gas.

Notemos que en el planteo de la barra, la fuerza aplicada sobre la barra y el estiramiento tienen el mismo signo, mientras que en la compresión, la presión es ejercida sobre el tubo, produce un incremento de la presión interna (variación positiva) y una disminución del volumen (variación negativa). El signo se debe así a que hemos aplicado una presión hacia el interior, asumida como un aumento de presión, y la respuesta es una reducción de volumen.

La ecuación , relaciona la presión con la divergencia de elementos de volumen (partículas acústicas) dentro del gas.

## *Ondas acústicas en fluidos. Planteo de la ecuación de ondas*

En un dado volumen de gas, en cada punto y en cada momento del tiempo , hay una presión *.* En condiciones de flujo estacionario, equivalente a la noción de equilibrio en gases en movimiento, *)* es independiente del tiempo.

Separamos de la presión la componente estacionaria . Esta componente puede ser la presión atmosférica, con variaciones más lentas en varios órdenes de magnitud que el sonido, por lo cual se la considera estacionaria a los fines de propagación de una onda sonora, y por lo que podemos escribir como “perturbación” de la presión, dado que en dimensiones pequeñas, tiempos breves y homogeneidad térmica, la presión atmosférica puede considerarse una constante.

Veremos cómo aplicar la segunda Ley de Newton. Para ello necesitamos la fuerza neta de compresión en cada punto. La obtendremos como:

De la misma manera se obtiene para las coordenadas y para . De modo que en forma vectorial queda

Esta expresión puede escribirse usando el gradiente de presión

Por la segunda Ley de Newton,

donde es la densidad y es la aceleración de la partícula acústica.

Como , resulta

Tomando la divergencia en ambos miembros

Si asumimos que la densidad ρ0 es constante, lo cual es aceptable en un gas en las dimensiones acústicas usuales,

Como y,

Si es constante

Se obtiene así la expresión de la propagación de la señal sonora como una ecuación de ondas. La velocidad del sonido () estará dada por

Una onda sonora es adiabática porque los tiempos de expansión y compresión resultan demasiado breves para la difusión del calor, lo que se expresa en una variación local (a escala de la onda sonora) de temperatura por compresión y expansión. Nos apoyamos entonces en la ecuación de las adiabáticas:

Diferenciándola queda,

Dividiendo ambos miembros de la expresión diferenciada por

Como queda

Si asumimos que es la perturbación en la presión , que sería la presión atmosférica y que definimos

como “compresibilidad”, resulta

o bien

Si ahora derivamos dos veces con respecto al tiempo queda:

Cuando aplicamos el operador divergencia a la segunda ley de Newton obtuvimos:

De lo anterior resulta

Reemplazando queda

Esta última expresión es también la ecuación de ondas sonoras expresada en las perturbaciones de la presión. Cuando habíamos partido de la segunda ley de Newton y de la compresibilidad de gases llegamos a:

o lo que es lo mismo

Vemos que ambas ecuaciones tienen la misma forma y que el módulo de comprensibilidad de gases ideales vale porque es adiabática. Si fuese isotérmico, es decir, si se tratase de un proceso de compresión y expansión lento que permita el intercambio de calor isotérmico, seria .

La ecuación

puede escribirse

donde

es la velocidad de propagación del sonido en gases. Como es la presión atmosférica y es la densidad del aire, que podemos escribir a partir de la masa molecular y el número de moles

De la ecuación de estado de gases ideales

queda

y

En un ambiente gaseoso con menor masa molecular, la velocidad del sonido aumenta y llega la misma cantidad de ondas en menos tiempo, con lo que habría un incremento en la percepción de altura (sonido más agudo). La masa molecular del aire disminuye levemente con la humedad de modo que el contenido de agua en el aire afecta a la velocidad del sonido incrementándose la velocidad y la frecuencia con el aumento de la humedad.

Considerando que la masa molecular del aire seco vale 28.966g/mol (29g/mol), que la constante de estado de gases ideales vale 8,314472J/mol.K (8.314J/mol.K), que la constante de adiabáticas para un gas ideal vale 1,4 y tomando una temperatura de 0ºC (273K), resulta una velocidad de 331m/s.

Como la velocidad del sonido depende explícitamente de la temperatura absoluta, se incrementa levemente con el aumento de la temperatura. Esto permite escribir una forma simplificada para el aire en la expresión:

En relación con la masa molecular, tenemos, para una referencia de 0.029kg/mol, una expresión dada por

Para tener una idea de la variación de la velocidad con la temperatura y la humedad, calculamos su valor a 30ºC en aire seco y obtenemos 348.7m/s. Si utilizamos la aproximación a primer orden resulta un valor de 349.2m/s. En relación con la masa molecular, si partimos del valor de velocidad a 30ºC, dado que a bajas temperaturas el efecto de la humedad es mínimo por la baja capacidad de contención de agua en aire frío, se obtiene una masa molecular de aire saturado a 30ºC de valor 0.028kg/mol, y de velocidad en aire saturado a 30ºC de 354.9m/s. Vemos así que la velocidad en aire, y por lo tanto la altura del sonido percibido, es muy dependiente de la temperatura, pero también de la humedad, si bien el rango y rapidez de variación térmica es más amplio y rápido que los cambios de humedad, por lo que hace que la velocidad sea más dependiente de la temperatura que del contenido de agua.

*Solución de la ecuación de ondas. Ondas progresivas y regresivas*

Hemos planteado la ecuación de ondas e inferido algunas propiedades del parámetro que define la velocidad de propagación. Intentaremos ahora hallar la forma funcional de la solución de la ecuación planteada. En toda ecuación de ondas de la forma , en la que nos hemos restringido a una coordenada espacial por simplicidad, si es la solución general, puede reescribirse;

a modo de una diferencia de cuadrados. Si definimos dos nuevas variables

Reemplazando ambos cambios de variable queda

De modo que la expresión en diferencias de cuadrados queda

O bien

La solución de esta expresión debe ser de la forma:

de modo que, al derivar dos veces con respecto a una y otra nueva variable, o bien , deban anularse las dos soluciones y .

Podemos pensar como una onda que conserva su forma desplazándose en el espacio a medida que transcurre el tiempo, es decir, es simétrica o invariante a transformaciones de la forma . El parámetro , define superficies de igual fase en el avance de la onda, de modo que establece las superficies de perturbación () a medida que transcurre el tiempo (). La onda regresiva tiene la misma interpretación pero con sentido opuesto.

Dicho de otra manera, sólo si los argumentos son iguales, es decir si . Reacomodando los términos de la igualdad , de donde,

es la “velocidad de fase” de la onda. Se la interpreta como la velocidad con que se propaga la onda conservando su forma, es decir, su fase. Podemos interpretar a como dos soluciones que representan una onda progresiva que avanza en sentido positivo, y una onda regresiva , que se desplaza en sentido opuesto. La otra forma conduce a por lo tanto a una velocidad en sentido contrario.

## *Solución sinusoidal unidimensional*

Hemos hallado la forma del argumento de la solución en los parámetros y , en lo que sigue intentaremos darle una expresión consistente con la típica solución a procesos periódicos a través de una sinusoidal imaginaria. Una solución en una dimensión es aproximadamente válida en tubos largos. Si nos limitamos a la coordenada x, la ecuación

se escribe como

Recordamos “relación de Euler”

Esta ecuación tiene una solución, para la onda progresiva, de la forma, si

donde

y se puede, por lo tanto, escribir

Si resulta y reemplazando y en

## *Extensión sinusoidal tridimensional. Desplazamiento y velocidad de la partícula acústica*

Volvemos a la expresión

de la segunda ley de Newton.

Al plantear la ecuación de ondas en forma escalar en términos de la perturbación en la presión (), si se conoce el gradiente de presión como función tridimensional de la posición (campo de presión), puede obtenerse el desplazamiento (), de carácter vectorial, por medio de dos integraciones temporales.

Veremos luego que, de acuerdo con el teorema de Fourier, podemos descomponer una señal compleja en sus componentes armónicos sinusoidales, de modo que nos limitaremos a estudiar el comportamiento de una señal sonora en un campo de presión conocido, por lo tanto con un gradiente que asumiremos dado.

Escribimos el gradiente del campo de presión separando la componente espacial de la oscilación temporal

Se limita a una onda senoidal de frecuencia , llamando a la perturbación de presión correspondiente, el desplazamiento resulta de integrar dos veces en el tiempo la relación entre el desplazamiento y el gradiente de presión.

En esta ecuación es la parte espacial de la solución y relacionamos el gradiente de presión con el desplazamiento de la partícula acústica. Como el rotor del gradiente de un campo escalar es nulo, resulta que la perturbación sonora es irrotacional.

Retomamos la expresión unidimensional a través de la primera coordenada del gradiente. Hemos visto más arriba que Calculando la derivada de con respecto a , como la primera componente del gradiente de , se obtiene:

Y reemplazando queda:

(Notemos que en la ecuación anterior para fue escrita en forma vectorial y separando la parte espacial de la temporal. También puede expresarse a través del producto del número de onda y el vector posición . En la ecuación unidimensional ambas partes se han unificado en un exponente.)

De donde, derivando con respecto al tiempo

Simplificando y usando la propiedad de la unidad imaginaria

es la velocidad con que se desplaza la partícula acústica en respuesta a la onda sonora.

Hasta el momento hemos probado que la onda sonora es mecánica, es decir, que involucra partículas en movimiento sometidas a interacciones y responde a las leyes de Newton; que es una perturbación en la presión atmosférica, que es adiabática dado que hemos usado esa condición termodinámica, y que se propaga con una velocidad independiente de la frecuencia en el aire, por lo tanto, que no es dispersiva, y al ser el desplazamiento y la velocidad proporcionales al gradiente de presión, se muestra que es una onda longitudinal.

El estudio del sonido sobre la base de los parámetros dinámicos como el desplazamiento, velocidad, aceleración de la partícula acústica y los gradientes de presión, es muy difícil de implementar, de modo que se define un conjunto de parámetros que facilitan el análisis de la propagación de la señal sonora.

**Impedancia específica del aire**

Vemos que la perturbación en la presión y la velocidad de la perturbación responden en fase con signos opuestos, ambas con coeficiente reales, que multiplican a .

Si relacionamos la presión con la velocidad en módulo, queda

A se lo define como “impedancia acústica del aire”. Como

De la ecuación de estado y con la definición de “mol” resulta y queda

A una temperatura de 0°C vale . Puede escribirse

que, coincidente con la definición de , permite interpretar a la impedancia como la perturbación de presión necesaria para conservar cierta velocidad de desplazamiento conjunto de la perturbación en el movimiento de las moléculas de gas.

A modo de interpretación de la noción de impedancia, podemos establecer una analogía con la segunda ley de Newton. En la “ley de masa”, este parámetro “masa” establece una relación entre el agente externo responsable de la alteración del estado de movimiento llamado “fuerza”, y el efecto resultante llamado “aceleración”, ambos medibles en forma directa o indirecta. La masa se ofrece como un parámetro que mide la “inercialidad” del cuerpo, es decir, la resistencia a alterar su estado de movimiento. Numéricamente, establece que si se requiere una fuerza de un newton para imprimir una aceleración de un metro por segundo cuadrado, el cuerpo que recibe esa fuerza tiene una masa de un kilogramo. En el contexto de la propagación de una onda sonora en aire, lo que nos dice la impedancia es que se requiere un gradiente de presión de 430Pa para que la partícula acústica conserve una velocidad de desplazamiento de un metro por segundo. En este sentido, la impedancia acústica es una medida de la resistencia del aire, en tanto medio viscoso, a desplazarse uniformemente forzado por un gradiente de presión.

El rango habitual de perturbación de presión en sonido es del orden de 10-4 a 10-2 pascales. Si observamos que se requiere un gradiente de presión del orden de 430 pascales para que la partícula acústica alcance una velocidad del orden de un metro por segundo, las velocidades típicas serán del cuatro a seis órdenes de magnitud inferiores a la unidad, es decir, entre milésimas a décimas de milímetro por segundo. Gradientes del orden de unos pocos pascales y, por lo tanto, velocidades en torno a los pocos centímetros por segundo, se encuentran en el límite del daño auditivo, y velocidades del orden del nanómetro por segundo se encuentran en el límite del umbral audible.

No debe confundirse esta velocidad con el valor de 480m/s de la velocidad cuadrática media de agitación molecular. Aquí tratamos con la “partícula acústica” en un movimiento conjunto de un dominio espacial de aire del orden de la milésima parte de un milímetro cúbico.

Si relacionamos la perturbación del desplazamiento de la partícula acústica con la perturbación en la presión, vemos que la unidad imaginaria nos dice que el desplazamiento se adelanta en fase a la presión en un cuarto de onda y que la aceleración se retrasa un cuarto de onda con respecto a la presión. Es decir que puede pensarse que el desplazamiento provoca un incremento de la presión y, éste, una aceleración en sentido contrario al desplazamiento, que restituye al estado de reposo.

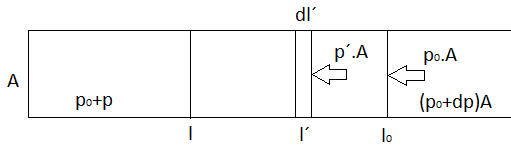
Destaquemos que este resultado refiere a la propagación de la onda sonora, no a su producción. Veremos que la fuente puede ser un desplazamiento forzado como corriente de aire, o bien a partir de un medio sólido que se desplaza en el aire, pero también puede ser un gradiente forzado de presión lo que inicie el desplazamiento.

## **Energía acústica**

Reescribiendo la definición de impedancia, hemos obtenido que

Esta expresión, que puede generalizarse al formato vectorial, establece la forma de la función que describe la velocidad de la partícula acústica sometida a una onda sinusoidal de presión. Para calcular la densidad de energía cinética escribimos:

Para calcular la densidad de energía potencial, escribimos el trabajo de la fuerza ejercida por la perturbación en la presión.



Un pistón se desplaza desde hasta al comprimir el gas. Un volumen inicial a presión es progresivamente comprimido por una perturbación en la presión variable que, aplicada sobre un área ejerce una fuerza y un trabajo equivalente a la energía potencial que almacena al ser comprimido hasta un volumen con presión

En una cierta posición , intermedia en el proceso de compresión entre y , se incrementa la presión para desplazar al pistón un . Escribimos el diferencial de energía potencial a partir del cálculo de trabajo de volumen

Cuando el émbolo ha llegado a la posición , el volumen vale y de la ecuación de las adiabáticas tenemos

Integrando entre

Reescribiendo la ecuación de las adiabáticas al completar la compresión

luego

Sin pérdida de generalidad, podemos considerar como nula la energía potencial en el estado inicial o de referencia para los niveles de energía. Recordando la velocidad del sonido

queda

Vemos que la densidad de energía potencial y cinética responde a la misma expresión. Luego obtenemos la energía mecánica de la onda sonora como

## 

## **Potencia sonora e Intensidad**

Para calcular la potencia, recuperaremos la expresión de la energía, considerando que el volumen de aire tiene una sección , que la señal sonora se desplaza un equivalente a la distancia que recorre el sonido a la velocidad en un tiempo

Luego la potencia será

El flujo de potencia se define como “intensidad” sonora y vale

La intensidad es entonces una densidad superficial de potencia. Como

La intensidad es el producto de la perturbación en la presión por la perturbación en la velocidad.

Es usual que la intensidad de mida en “decibeles”. El motivo nos remite a la psicoacústica, pero abordemos una definición preliminar de esta unidad. Se establece en forma convencional una intensidad sonora umbral audible de I0=10-12W/m2 para un oído humano normal. Si la intensidad física de un sonido vale I, podemos calcular el cociente I como una proporción entre la intensidad física actual y la intensidad umbral audible. Dado que el rango perceptivo es muy grande, se utiliza una expresión logarítmica de esta proporción pero multiplicada por diez.

Se define la intensidad expresada en decibeles (IdB) como

A modo de ejemplo, si la intensidad física es un millón de veces mayor que la intensidad umbral audible, la intensidad del sonido expresada en decibeles vale 60dB.

# **Modelado de parámetros acústicos**

## 

## *Analogía eléctrica – acústica*

Recordando la Ley de Joule y la Ley de Ohm se establece la siguiente analogía:

Intensidad sonora → potencia eléctrica

Velocidad de la perturbación del aire en el sonido → intensidad de corriente

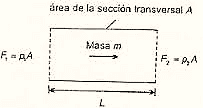
Perturbación en la presión → diferencia de potencial

Impedancia acústica → impedancia eléctrica

Ya hemos definido la “impedancia específica” acústica del aire con el mismo nombre que la impedancia eléctrica, por lo tanto la “resistencia” acústica se obtiene cuando la parte imaginaria de la impedancia es nula y sólo hay un carácter resistivo y disipativo para todas las frecuencias. También hemos definido la “intensidad acústica” asociándola con la potencia eléctrica, la velocidad de perturbación sonora con la intensidad de corriente y la perturbación en la presión con la diferencia de potencial. Esta analogía formal con el comportamiento de circuitos eléctricos y aun con sistemas mecánicos, permite el modelado de circuitos acústicos y hasta su representación por medio de símbolos típicos del ámbito eléctrico. Estas analogías suelen ser útiles al plantear problemas acústicos como formalmente equivalentes a circuitos eléctricos.

## *Inertancia o masa acústica*

La noción de “inertancia”, en analogía a la masa mecánica, responde a la imagen de una masa de aire que se mueve como un sólido, es decir, sin compresión apreciable, sometida a un gradiente de presión.



Si expresamos la segunda ley de Newton a partir de una diferencia de presión, queda

Y si multiplicamos ambos miembros por el área , en el miembro derecho se obtiene el caudal en volumen de aire que se desplaza sometido a la diferencia de presión

También puede escribirse

Si se escribe la diferencia de presión entre los extremos de la masa acústica en la forma

Se define la “inertancia” como una medida de oposición de una masa de aire a ser desplazado como un sólido por efecto de la diferencia de presión acústica entre las superficies que delimitan su volumen. Las unidades son .

La primera expresión de la unidad no es muy informativa, la segunda nos dice que la inertancia mide la presión acústica entre los límites de la parcela de aire que provoca que haya un incremento de caudal de un metro cúbico por segundo en cada segundo.

En realidad, el aire es muy compresible de modo que esta definición y la relación es válida si la cavidad es muy pequeña con respecto a la longitud de onda. A modo de referencia experimental, si la longitud del tubo es se obtiene un error de aproximación del orden del 1% y si el error es del orden del 5%.

En el ámbito de la electricidad, la inductancia de un solenoide (L) es un parámetro que relaciona la diferencia de potencial entre los extremos del solenoide y la variación de intensidad de corriente que genera un campo magnético variable en su interior. Esta relación está dada por , expresión formalmente comparable a la que vincula la diferencia de presión entre los extremos de un tubo de flujo y la variación de caudal que circula por él. Desde el punto de vista de la analogía electro-acústica, la noción de inertancia corresponde a la inductancia en circuitos eléctricos.

En un tubo delgado, como la masa , es decir, la densidad del aire por el volumen que contiene el tubo, podemos escribir el volumen en relación con el área y la longitud del tubo con lo que resulta , luego

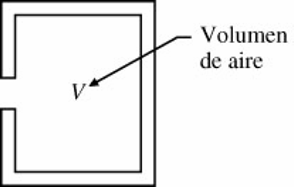
En cilindros hay una corrección en la abertura considerando que el borde abierto no es una superficie bien definida, sino que se extiende al exterior, con una corrección y una longitud efectiva donde , y , donde es el radio del tubo.

La inertancia vale entonces:

## 

## *Compliancia*

El parámetro complementario a la noción de intertancia es el de “compliancia”, que refiere al comportamiento elástico de una masa de aire, es decir, que se comprime sin desplazarse. El efecto de comprimir un volumen sin desplazamiento es equivalente al de incorporar aire en el volumen de un recipiente estanco, con lo cual hay un incremento de la densidad y la presión sin cambio del volumen, condicionado por el recipiente.



Desde el punto de vista de la analogía con circuitos, el término “compliancia” se asocia a la capacidad eléctrica.

En la figura, el volumen de la caja se mantiene sin variación apreciable mientras ingresa una pequeña masa de aire en su interior a través de la abertura, que se considera pequeña en relación con la superficie de la pared del recipiente.

Se asume compresión adiabática, de modo que se parte de diferenciar .

es el volumen de aire que ingresa a la cavidad asociada al caudal .

Por lo tanto es también la compresión requerida en el aire que había en la cavidad de volumen V. La divergencia es positiva si el aire sale de la cavidad, pero la compresión es negativa dado que se considera que el aire entra a la cavidad con el caudal , de modo que hay una convergencia dentro de la cavidad. Escribimos la diferenciación de la ecuación de las adiabáticas en la forma

Una de las expresiones para la velocidad del sonido es:

Entonces

Recordando la expresión de la capacidad eléctrica

vemos la analogía entre las expresiones. Usando esa relación, se define:

Las unidades serán . La compliancia expresa cuántos metros cúbicos de aire logra introducirse en una cavidad sin cambiar su volumen por cada pascal de incremento interno de presión.

## *Resistencia acústica*

Si la relación entre el caudal y la presión es independiente de la frecuencia, el pasaje de aire forzado por la presión a través de un tubo o de una sección cualquiera del espacio puede escribirse en forma análoga a la Ley de Ohm y definir la “resistencia” acústica.

La resistencia ante un flujo continuo de aire a través de un tubo está dada por la ley de Poiseulle por medio de la expresión:

Donde es la longitud del tubo, el radio y es la viscosidad laminar del aire.

En superficies de contacto no suficientemente estrechas, se asume que en la interfaz solido–aire hay una capa delgada en la que el comportamiento es laminar y se la llama “capa límite”. Se aplica una aproximación laminar de capa límite de un espesor dado por:

donde es la frecuencia angular de la onda acústica. A 1kHz .

Para tubos de un radio mucho mayor (uno o dos órdenes de magnitud) que se obtiene

donde es el número de aberturas del tubo.

*Generadores acústicos*

La analogía puede extenderse a generadores acústicos, que pueden ser generadores de presión asociados a generadores de tensión , y que idealmente son independientes del caudal de aire requerido para generar la presión, o bien generadores de caudal asociados a generadores de corriente, independientes de la presión que deban producir para generar el caudal.

La voz humana se apoya en un generador de presión a través de los pulmones, el diafragma y los músculos abdominales como fuentes de compresión del aire interno. De allí que el primer problema en la emisión vocal es el control de la presión pulmonar para mantener un flujo de aire controlado a través de la glotis mientras abren y cierran las cuerdas vocales. Pero al soplar sobre la lengüeta de un instrumento de viento, un generador de caudal es un flujo de aire que hace vibrar la lengüeta, el cual es independiente de la inercia de la masa de aire que rodea la lengüeta y es controlado por el instrumentista.

*Impedancia acústica*

Extendemos la noción de impedancia a la resistencia al pasaje de señales acústicas como función de la frecuencia, lo que incluye los efectos de disipación a través de la resistencia acústica, pero también efectos asociados a la inertancia y a la compliancia no disipativos.

En términos muy generales, la impedancia es una forma de establecer una relación entre la diferencia de presión entre los extremos de un tubo acústico, que puede ser un tubo real o una sección ideal del espacio, y el caudal que circula por el tubo de flujo. Considerado como un tubo físico, es la diferencia de presión entre la entrada, llamada embocadura en instrumentos musicales o garganta en una bocina, y la bocina, corneta o salida en general, y el caudal que circula por el tubo. Esta expresión puede escribirse

Al escribir que la impedancia es función de la frecuencia y el tiempo, lo que decimos es que la relación entre la presión y el caudal varía con la frecuencia del sonido. El cálculo de la impedancia es usualmente difícil de realizar. Puede expresarse en forma compleja, lo cual separa la respuesta en amplitud y en fase de un modo muy simple, y podemos hacerlo más fácilmente a través de la transformada de Laplace. Si aplicamos la transformada de Laplace a y se obtiene y , luego es la impedancia transformada, siendo la anti transformada.

Un caso particular es la impedancia específica del aire, , válido para ondas planas (muy alejadas de la fuente), puramente resistivas en todas las frecuencias. Esta impedancia específica está dada por la relación , una relación entre la presión y la velocidad de la partícula acústica. Si la expresamos como caudal en un tubo, debemos incorporar el área del tubo de modo que

Cuando el efecto del tubo es puramente resistivo, se dice que oficia como una resistencia acústica y la impedancia se limita a un parámetro . Notemos que, de acuerdo con la ley de Poiseuille, la “impedancia específica del tubo” estaría dada por , que debe ser dividida por el área del tubo para obtener la resistencia acústica.

## *Potencia acústica*

Si escribimos la fuerza como , la presión por el área, y a la velocidad del aire como , el caudal sobre el área, si multiplicamos por el tiempo se obtiene el desplazamiento, de modo que el trabajo queda expresado por la relación , y la potencia resulta .

Consideremos que el caudal y la presión están dados por funciones sinusoidales puras de la forma , donde se incluye la “fase” relativa entre el caudal y la presión. La potencia instantánea estará dada por

Si se desarrolla el seno de la suma e integra la potencia en un ciclo completo, se obtiene la potencia media . Podemos llamar y la presión y caudal eficaz, de modo que .

Resulta así que si la impedancia es puramente resistiva escribimos . Vemos que la fase relativa es nula y la potencia entregada es máxima. Si el sistema es puramente inertivo, la relación entre la señal de presión y el caudal será

El término funciona como un tiempo inicial negativo para la presión en relación con el caudal, es decir que la presión se manifiesta como precedente a la señal de caudal. Si en cambio el sistema domina una compliancia pura, vale la relación

El término funciona como un tiempo inicial positivo o posterior a la señal de caudal, como si el caudal precede como “causante” de la presión en término de señales.

En síntesis, si la impedancia es “inductiva” (inertiva) o “capacitiva” (complianctiva), en los que o , el coseno es nulo al igual que la potencia entregada. En un caso la masa se mueve como un sólido sin entregar trabajo neto y en el otro el volumen incorpora y expele aire alternativamente sin modificar sus propiedades. Si se expresa la potencia en términos del caudal de aire en un sistema que contenga resistencia, inertancia y compliancia, será

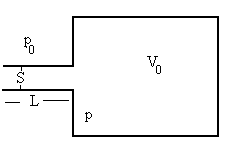
En un ciclo completo de la señal sonora, la integración del cuadrado del seno en el término resistivo vale ½ y la integral del producto del seno y el coseno es nula, es decir que los términos de intertancia y compliancia no transfieren potencia mientras que es máxima en términos resistivos y dada por el producto de la presión y caudal efectivos.

Si se expresan como exponenciales complejas, se definen la “potencia acústica activa” como y la “potencia acústica reactiva”, asociada a la parte imaginaria de la expresión exponencial, en la forma

## *Transformador acústico*

Los transformadores acústicos refieren a los tubos de diámetro variable como una bocina. Trataremos de hacer una breve descripción cualitativa. En un cubo de sección variable habrá dos pares de presión-caudal diferentes en la entrada (garganta) y en la salida (boca). El más típico es la “bocina exponencial”, con una garganta pequeña y una boca grande. En bocinas moderadamente pequeñas, con una longitud de apertura, en la cual el área se incrementa en una relación hacia la boca a una distancia de la garganta, si se ingresa una fuente de presión en la garganta , la presión de salida en la boca es aproximadamente , y el caudal será , donde es la longitud total de la bocina exponencial. Puede notarse una sensible disminución de presión en la boca con respecto a la garganta y un incremento inversamente proporcional en el caudal. Funciona así como un “transformador” acústico con un primario (la garganta) y un secundario (la boca). La alta presión en la entrada (alto voltaje) se ha reducido en la salida a cambio de incrementar el caudal (alta corriente) conservando la potencia. La impedancia a la salida se reduce en un factor con respecto a la entrada. Pero este exponente es una relación de áreas, de modo que la impedancia a la salida disminuye en la misma proporción que la relación de áreas, de lo que resulta que la bocina es una “adaptador de impedancias”. Hay una “frecuencia de corte” por debajo de la cual deja de funcionar como adaptador de impedancias y vale que, para bocinas de unos 10cm de longitud de apertura, se encuentra en los 300Hz, lo que justifica que no sean buenos amplificadores de bajos porque predominan efectos reactivos. Para bajas frecuencias se requiere bocinas largas, de allí el tamaño que requieren instrumentos como el fagot, la tuba o la tarka.

## *Resonador de Helmholtz*



Se trata de un contenedor con un volumen y un cuello de sección , radio y longitud .

La masa total de aire en el cuello vale

La aproximación a realizar es válida para longitudes de onda mucho mayores que el largo del tubo y que la raíz cubica del volumen de la caja de resonancia. De modo tal que la masa de aire en el cuello entre y salga de la caja o contenedor sin compresión apreciable en el cuello, pero comprimiendo el aire dentro del contenedor sin cambio de volumen.

Escribimos el desplazamiento del aire en el cuello, que entra y sale del contenedor, como , que se relaciona con las dimensiones del contenedor y la compresibilidad del aire en el contenedor

Al comprimirse, se incrementa la presión interna generando una fuerza restauradora .

Habíamos relacionado la presión con la comprensibilidad donde para el aire. De modo que

es una fuerza restauradora sobre una masa que entra y sale del contenedor, por lo que el sistema funciona como un acople masa – resorte. En tal sistema, que responde a la ecuación

En nuestro resonador

La frecuencia de resonancia vale

Como la velocidad del sonido es

resulta

Vemos que las frecuencias de resonancia sólo dependen de las dimensiones del resonador. Si recordamos que es la masa de aire en el tubo, que es la inertancia, y que es la recíproca de la compliancia, queda

Una expresión análoga a la del circuito eléctrico oscilante LC. El resonador de Helmholtz puede interpretarse como una antena emisora acústica con “inductancia” abierta al medio. Es el principio básico de los instrumentos con caja de resonancia como el violín con las “efes” o la guitarra con la boca.

# **Teorema de Fourier. Espectros. Incertidumbre**

La composición aditiva de armónicos permite definir variadas formas de onda. Dada una función con comportamiento armónico periódico absolutamente integrable en un intervalo , una función puede representarse como:

Luego veremos que todo sonido con estructura periódica puede descomponerse tanto analítica como físicamente en sus componentes de Fourier, lo que determinará varias propiedades “tímbricas” del sonido y también caracterizará la fuente. Por otra parte, veremos que en cierto modo el oído es un analizador armónico.

## *Descomposición armónica*

El teorema de Fourier, en sus varias versiones, plantea que casi cualquier señal puede descomponerse y reconstruirse, al menos parcialmente, en una suma de armónicos a partir de una frecuencia fundamental.

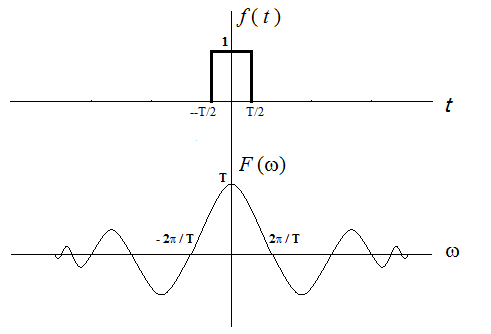
El teorema de Parseval nos plantea que la distribución de potencia y de energía de una señal se expresa a través de la suma de los cuadrados de los coeficientes de la descomposición.

Esto permite analizar la señal sonora desde el punto de vista de la amplitud relativa de los armónicos que la componen.

Otro de los resultados fundamentales expresa que una señal genérica con formas de onda no sinusoidales, inclusive cuadradas, dientes de sierra, puede descomponerse en armónicos por Fourier, de modo que en la práctica cualquier forma de onda sonora puede componerse a partir de una estructura de armónicos.

También se puede plantear el proceso auditivo desde la perspectiva de una función de respuesta que relaciona una entrada (sonido) y , con su proceso auditivo e , relacionadas por con transformadas . Cada etapa de procesamiento (el ambiente, el oído externo, medio e interno) tienen una función de respuesta diferente que se compone con otras para dar por resultado la señal audible.

Si recordamos la transformada de un “pulso cuadrado”



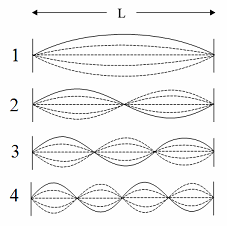
Si se reduce el tamaño del pulso, se amplía la campana en forma inversamente proporcional. Si el pulso es una función (la “delta” de Dirac) el “ancho” de la campana es infinito (ruido blanco) formado por todas las frecuencias.

De allí que en pulsos muy cortos (golpes), no se puede identificar una altura tonal (nota musical). En cambio, en pulsos de larga duración, puede identificarse la tonalidad (altura tonal) con precisión.

El *principio de incertidumbre acústico*, sobre bases matemáticas comparables a las del principio de incertidumbre de Heisenberg apoyándose en el teorema de Fourier, nos dice que la estructura espectral de un ruido de muy corta duración, idealmente un pulso “delta”, al ser un ruido blanco que contiene todas las frecuencias, no es posible asignarle una altura tonal, es decir, una nota musical. Independientemente de la limitación del oído a duraciones del orden de una décima de segundo para poder determinar la altura tonal, existe una limitación física sintetizada en este principio que impide que una respuesta auditiva más rápida logre una mejor calidad de audición tonal y, por encima de los 20 impactos por segundo, es la frecuencia de impactos lo que comienza a percibirse como altura tonal. A modo de ejemplo cuantitativo, un pulso de una décima de segundo de duración tendría un semiancho de la campana de la transformada del orden de los 10Hz, que excede la resolución perceptiva en el registro medio de frecuencia. De allí que los instrumentos de percusión tengan una finalidad rítmica pero una tonalidad muy difusa.

# **Ondas Estacionarias**

La noción de “onda estacionaria” se asocia a la estabilidad en el tiempo de la señal. Esto se logra impidiendo que interactúe con el medio externo. Para eso se las caracteriza por la persistencia en recintos delimitados por paredes “adiabáticas” que no permiten el intercambio de la señal con el ambiente externo. Las encontramos como ondas elásticas en todos los sistemas mecánicos, como ondas electromagnéticas en cavidades reflectantes, en la estructura atómica y molecular, como ondas de gravedad y, en el ámbito del sonido, en la respuesta sonora en ambientes, instrumentos musicales tanto en la emisión del sonido en cuerdas y especialmente en tubos, en cajas de resonancia, particularmente en la emisión vocal, la respuesta del oído en el proceso de audición. Comencemos con el planteo más simple de una cuerda vibrante ligada en los dos extremos.



Una cuerda puede oscilar de modo que deje los extremos fijos, lo cual permite sólo ciertos modos de vibración. Los modos posibles de oscilación corresponden a las longitudes . Basta observar en la figura que el modo “1” corresponde a una longitud doble que la de la cuerda vibrante, el modo “2” a una longitud igual que la de la cuerda, el modo “3” a 3/2 del doble de longitud de la cuerda, el modo “4” a la mitad de la longitud o cuatro veces el doble de la longitud de la cuerda. En general la expresión define la “sucesión armónica” de longitudes de ondas estacionarias.

Estas longitudes describen un conjunto de ondas permitidas a las que se llama “estacionarias” porque no emiten energía al exterior al estar inmóviles los puntos de contacto con el entorno, de modo que, al no intercambiar energía, se conservan invariantes en el tiempo.

El número de onda es de modo que y como . O bien define las frecuencias propias, modos propios o modos naturales de vibración de la cuerda. En estas ecuaciones, es la velocidad de propagación de la señal en la cuerda.

## *Ondas estacionarias en tubos. Discusión cualitativa*

En un tubo con aire, si está cerrado en ambos extremos, en ellos habrá mínimos de desplazamiento (cero formalmente) y máximos de compresión, con lo que se comportan de modo análogo a la cuerda con la velocidad del sonido en las frecuencias naturales .

Si el tubo estuviese abierto en los dos extremos, en ellos tendría nodos de perturbación en la presión (seria , la presión atmosférica) y extremos de velocidad (fluctuación libre). Tiene las mismas frecuencias propias de vibración, pero en cuadratura de fase con el tubo cerrado en los dos extremos.

El tubo cerrado en un extremo y abierto en otro tiene un nodo de presión en el extremo abierto y máximo de amplitud en el cerrado, pero un nodo de velocidad en el cerrado y un extremo de velocidad en el abierto. De modo que contiene un cuarto de onda estacionaria y el primer modo normal tiene una longitud , luego, la primera frecuencia natural es , la mitad de la frecuencia de un tubo abierto – abierto o cerrado – cerrado.

En el extremo abierto no hay borde “biselado” que separa el tubo del exterior, sino una región de transición que funciona como si el tubo fuese un poco más largo de lo que realmente es.

Se hace una corrección parcialmente empírica en la que se extiende el tubo como si tuviese una longitud donde multiplica al radio del tubo, supuesto cilíndrico.

## *Deducción formal de modos propios. Planteo general.*

Aplicaremos el método de separación de variables, razonable en este caso dado que los modos normales son estacionarios en el espacio, pero fluctúan en el tiempo. El método propone expresar la presión como un producto de modo que:

de donde

Dividiendo ambos miembros por

NOTA: son dos funciones siempre iguales, pero de variables independientes por lo que deben ser iguales a una constante, que se escribe, por comodidad .

Vemos que es un problema de auto funciones siendo los autovalores y los modos propios de vibración del sistema.

Es un problema equivalente al oscilador armónico con soluciones:

Deben ser con la misma amplitud porque son dos representaciones de la misma señal.

La señal conjunta tiene la forma .

## *Aplicación al tubo abierto-abierto*

Si el “cero” corresponde a un extremo de un tubo abierto-abierto

dado que perturbación de la presión es nula y permanece en el valor de la presión atmosférica en los extremos. Como , entonces , es decir que , en general escribimos . En el extremo de referencia () . Luego , en particular podemos tener , con lo que (tiene que valer para todo ). Luego, o y como resulta define las frecuencias propias.

Éstas quedan definidas como múltiplos de una frecuencia fundamental . Suele notarse esta frecuencia como en tanto fundamental, si bien corresponde a . En cambio en un tubo cerrado-cerrado hay un máximo desplazamiento y un máximo de velocidad en el centro pero un nodo en la variación temporal de la presión mientras que en los extremos cerrados el desplazamiento será nulo pero la perturbación en la presión será máxima. Como la relación entre el desplazamiento y la presión está dada por la derivada espacial (el gradiente), tomamos la derivada de la ecuación que describe la onda estacionaria de presión. Resulta ser

En los extremos vale

De donde

De allí que y con lo cual y resultan las mismas soluciones que en el tubo abierto en ambos extremos pero desplazadas en un cuarto de onda.

## *Tubo abierto - cerrado*

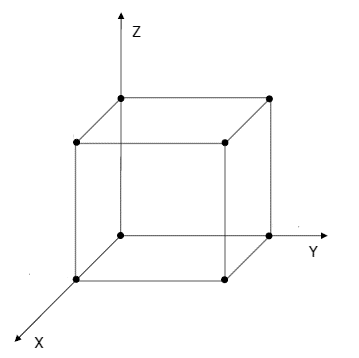
Si el tubo está cerrado en y abierto en , tiene que ser cero el desplazamiento en el extremo cerrado y nula la perturbación de la presión en el extremo abierto. La derivada de la presión en el extremo cerrado nos da el desplazamiento asociado a un coseno con fase , como se obtuvo más arriba. Como , resulta

Luego, como y debe valer , resulta

Esto nos dice que solo tiene armónicos impares .

Se han obtenido los armónicos impares en un tubo cerrado-abierto.

# **Ondas estacionarias en cajas rectangulares**



Estudiaremos los modos de vibración en una cavidad de lados “a”, “b” y “c”. El volumen de la cavidad vale . Asumimos que las paredes son rígidas.

Planteamos, para los modos estacionarios, una separación de variables en cada eje y en el tiempo.

Si planteamos la ecuación diferencial de onda y separamos en cada componente, quedan:

La relación dada por el exponente , entre y es

En esta ecuación consideramos la velocidad del sonido en tanto asumimos que se trata de una cavidad que contiene aire. Por lo tanto, a partir de la relación entre la perturbación en desplazamiento y en presión, se obtiene

Aplicando la separación de variables, queda

Si proponemos como posible solución la forma

Las perturbaciones son nulas en las paredes, es decir

Queda

Luego

donde es el conjunto de frecuencias propias o modos propios de oscilación en el recinto.

Para bajas frecuencias se caracteriza el número y carácter de los modos estacionarios en función de los números enteros “”, “” y “” cuando son pequeños. Si la frecuencia es suficientemente alta es dificultoso estudiarlos por medio de la expresión propuesta, pero puede asimilarse el tratamiento al de una señal continua. Se pretende contabilizar el número de frecuencias propias estacionarias en una cavidad que sean menores o iguales que una frecuencia máxima de interés, establecida por criterios de sonoridad. De este modo las fracciones , , y pueden tratarse como reales en un continuo, si bien cada valor de los números “”, “” y “” define un punto de grilla en este dominio. Sea el valor máximo de frecuencia a considerar, planteamos el conteo en un espacio de configuración de . Los valores permitidos en este espacio de configuración quedan definidos por los parámetros “”, “” y “” en tanto contabilizan los modos propios de vibración.

Usamos una aproximación continua de un medio discreto para escribir la ecuación de arriba como una desigualdad considerando que nuestro interés se centra en contabilizar cuántos puntos definidos por “”, “” y “” están permitidos para esa frecuencia máxima. La expresión se asimila a la forma de definir una esfera de radio y componentes dados por , , y .

Se trata de números discretos o cuantificados y positivos. De modo que sólo consideramos el octante positivo de . Observemos que la distancia entre nodos en una cuerda para un modo está dada por , un de la longitud total con longitudes de onda y frecuencias . A partir de la expresión anterior para tendremos que el número de frecuencias permitidas se relaciona con el número de armónico de acuerdo con . El espaciamiento entre nodos valdrá considerando que hay crestas y valles en la longitud total y la distancia entre extremos vale un de modo que semiperíodos cubren la longitud total de la cuerda. La misma distancia es la que separa los nodos entre sí. En el espacio de frecuencias, la distancia entre frecuencias permitidas vale si las expresamos como . Definamos un espacio de frecuencias como tres ejes coordenados ortogonales en los que representamos las frecuencias de ondas presentes en los ejes cartesianos “x,y,z”. En un dominio espacial sin restricciones, habría un continuo tridimensional de frecuencias posibles. En un recinto rectangular habrá un número limitado de frecuencias permitidas. Consideremos una de las dimensiones como una cuerda ligada a las paredes del recinto. De allí que las frecuencias permitidas en el eje “x” están dadas por y el espaciamiento de los puntos en el espacio de frecuencias vale en el eje “”, y espaciamiento en el eje “” y con espaciamiento en el eje “”. El “volumen” expresa el tamaño de un elemento de volumen cuantificado en este espacio de frecuencias, y permite contabilizar el número de máximo de modos de vibración permitidos.

El número de modos de vibración equivale al volumen del octante en el espacio de frecuencias, dado que sólo es válido considerar ejes positivos, dividido por el volumen de los modos permitidos.

La densidad de modos propios de vibración se obtiene dividiendo este número por el volumen geométrico del recinto.

A modo de ejemplo, consideremos que nuestra frecuencia máxima de interés es la de 350Hz, que coincide numéricamente con la velocidad del sonido, de modo que , nos dice que hay poco más de cuatro modos propios de vibración por cada metro cúbico. Si el recinto tiene 3m de altura por 4m de frente y 5m de fondo tendríamos unos 60m3 de volumen y del orden de 250 modos de vibración.

# **Ondas esféricas**

Lo tratado para ondas unidimensionales es válido para tubos, que no necesariamente deben ser rectos. El análisis de modos de vibración en recintos es válido para ondas planas como perturbaciones en un solo eje que se reflejan en las paredes. Se plantea ahora un punto pulsante que genera ondas de presión con simetría esférica en superficies perpendiculares al radio. De modo que la variable de interés será el radio o distancia a la fuente.

Escribimos el laplaciano en la ecuación de ondas en coordenadas esféricas

Donde la sustitución lleva a tal que

Desarrollando queda

Y simplificando

Se obtiene así una ecuación de ondas expresada en el parámetro . Como y como entonces

Donde es la solución de una onda que se expande y la de una onda que se contrae desde la superficie emisora hasta el centro de la esfera. Vemos que la forma de es y así

es una presión que decrece hiperbólicamente con la distancia a la fuente.

## *Impedancia en ondas esféricas*

El gradiente en coordenadas esféricas es:

Esta expresión limitada al componente radial queda, y aplicado a la presión, omitiendo el versor radial

El desplazamiento vale

Y la velocidad

Multiplicando y dividiendo en el denominador por

La impedancia de un frente de onda radial es

Vemos que tiene una componente resistiva y otra reactiva. Cuando tiende a infinito predomina la parte resistiva, disipativa, y la onda esférica adquiere el aspecto de una onda plana Cuando tiende a cero, el comportamiento es más complejo pero es casi un imaginario puro, predominantemente reactivo, sin disipación de potencia.

El flujo de potencia (por unidad de área) se obtiene de:

La componente resistiva (real) del flujo de potencia de la señal que se expande alejándose de la fuente disminuye en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a la fuente, pero la componente reactiva (imaginaria) disminuye en forma proporcional al cubo de , atenuándose muy rápidamente.

Tomando la parte real de la expresión de la señal para evaluar el flujo activo de potencia, nos queda . Como

Al derivar con respecto al tiempo obtenemos la velocidad.

Simplificando , sacando fuera del paréntesis y reemplazando , queda

Obtenemos entonces la intensidad en términos de flujo de potencia multiplicando la presión por la velocidad

El segundo término dentro del paréntesis contiene una fluctuación de frecuencia doble si consideramos una identidad trigonométrica.

El segundo término oscilatorio tiende a cero cuando la distancia tiende a infinito. En un promedio temporal sobre un ciclo completo, el segundo término se anula y no contribuye al flujo neto de potencia, mientras que el promedio temporal del cuadrado del coseno vale ½. De allí que el flujo promedio de potencia vale

El flujo total de potencia se obtiene de multiplicar , es decir por el área de la superficie esférica.

Y el flujo medio total de potencia

El segundo término dentro del paréntesis, que contiene un seno que duplica la frecuencia del modo fundamental, si bien se atenúa rápidamente genera efectos muy importantes en el “campo próximo a la fuente”.

Si escribimos a , el término en cuestión es relevante cuando

es del orden de 1, comparable con el máximo valor del cuadrado del coseno. De aquí deducimos que

es una “distancia crítica” para la que el término que duplica en frecuencia a la de la señal resulta más relevante que el primero. Para una frecuencia de 25Hz a 30Hz la distancia crítica es del orden de un metro, entre 250Hz y 300Hz esta distancia es del orden de 10cm y desde 2500Hz hasta unos 3000Hz es del orden de 1cm. Puede verse que la distorsión introducida por este término es más importante a bajas frecuencias dado que tiene un alcance radial mayor en términos de las frecuencias afectadas. Este segundo término refiere a un ingreso y salida de energía en las proximidades de la fuente, cuya irradiación es atenuada a mayor distancia.

# **Reflexión y refracción**

Retomamos la expresión unidimensional para la solución de la ecuación de onda sinusoidal, es decir, caracterizada por un único número de onda y frecuencia.

Supondremos que la señal se propaga en un medio hasta alcanzar la superficie de separación con otro medio que posee características diferentes en lo que respecta a la propagación. Los parámetros (número de onda) y (posición) son vectores (en negrita). Podemos limitarnos al plano por simplicidad. La componente “y” será perpendicular al plano de separación de las superficies, y la componente “x”, paralela al plano. Al cambiar de medio de propagación, se conserva la frecuencia pero puede cambiar la velocidad, por lo tanto, el número de onda.

Sea el número de onda incidente, el reflejado (coincide numéricamente con por ser el mismo medio) y el número de onda en el medio donde se refracta el sonido.

Por continuidad de la señal en ambos medios

expresando las igualdades en módulo.

Como el medio de incidencia y de reflexión es el mismo y pero entonces . Si dividimos ambos miembros por , que es el mismo en los dos (la frecuencia no cambia por continuidad), obtenemos la “ley de Snell” para el sonido.

Todos los fenómenos asociados a las ondas y más conocidos en la luz, como la reflexión total, ocurren con el sonido, excepto la dispersión (el sonido es no dispersivo) y la polarización (es una onda longitudinal).

## *Impedancias de ondas reflejadas y transmitidas*

Las presiones a ambos lados de una superficie en que se refleja y refracta una señal son

Por continuidad en la superficie de separación, la componente paralela al plano tiene que ser igual en ambos medios; por otra parte la suma de la perturbación en la presión de la onda incidente y reflejada tiene que ser igual que la perturbación de la señal refractada en amplitud y en cada instante. Tenemos entonces . Por otra parte y en particular en el estado inicial . También los desplazamientos tienen que ser consistentes en todo tiempo siendo

Calculamos la derivada parcial del desplazamiento en el eje “y”, transversal a la superficie de separación de ambos medios. El medio de incidencia es el mismo que el de reflexión, de modo que las densidades son iguales en ambos .

Calculamos la proyección del número de onda sobre el eje “y” usando el coseno

Omitimos los exponentes de la exponencial por un motivo de espacio.

Notemos que el número de onda incidente y reflejado son iguales pero con signos opuestos, al igual que los ángulos de incidencia y reflexión

Simplificando las exponenciales y reemplazando en la ecuación precedente.

Sacando factor común en el primer miembro,

Despejamos la diferencia de amplitudes incidente y reflejada,

Por la ley de Snell

Reemplazando en la ecuación anterior y usando secantes

Por otra parte y usando la impedancia del aire se obtiene el coeficiente de reflexión

En esta expresión es la impedancia del medio de donde proviene la onda incidente y es la impedancia en el medio en donde se refracta la señal. En incidencia normal se omiten las secantes

Y el coeficiente de refracción resulta

Que en incidencia normal también se omiten las secantes

Apliquemos estos índices a dos medios conformados por aire a la misma presión pero con temperaturas diferentes. Por la ecuación de estado de los gases y la definición de densidad como resulta . Luego y resulta

Por otra parte y de modo que

Como la impedancia del aire vale obtenemos la relación de impedancias

Utilizando la ley de Snell

De modo que si la temperatura en el nuevo medio de propagación es mayor que la del medio de incidencia, la dirección de propagación se aleja de la normal a las superficies. Lo contrario ocurre si la temperatura en el nuevo medio es menor que en la del medio de incidencia. Este es un fenómeno que puede observarse por la noche, cuando en las capas cercanas a la superficie del suelo se enfría por emisión de radiación mientras el calor se conserva en niveles superiores. En tal caso hay una “inversión” térmica en la capa límite de la atmósfera y el sonido emitido desde superficie sufre una deflexión paralela a la superficie terrestre siguiendo la curvatura con mayor alcance de la señal sonora. De día, cuando las capas inferiores están a mayor temperatura, la señal sonora que asciende se curva en dirección cenital alejándose del suelo y dispersándose con menor alcance en la expansión de la señal sonora. De noche puede darse inclusive el fenómeno de reflexión total retornando la señal sonora a la superficie terrestre con máximo alcance.

Si consideramos incidencia normal a la superficie, es decir, un sonido emitido verticalmente hacia arriba en ambas condiciones, como

Si , situación predominante durante el día, parte de la señal emitida verticalmente se refleja a superficie mientras que si , lo que ocurre predominantemente de noche, la emisión sonora vertical se alejará definitivamente de la Tierra sin reflexión. Por lo tanto, de noche la “capa de inversión térmica” funciona como un canal conductor de señales sonoras emitidas paralelamente a la superficie, de modo que el ángulo de incidencia será muy grande debido a la curvatura terrestre, mientras que las señales emitidas verticalmente se alejarán de la superficie. De día todas las señales se curvarán hacia el cenit y alejarán de la superficie, aunque una fracción de la señal será reflejada hacia el suelo.

Vemos así que el fenómeno de refracción sonora no sólo se manifiesta al pasar del aire, como medio de propagación, a otro que puede ser agua o cualquier material sólido. La velocidad del sonido es muy dependiente de la temperatura del aire y de la humedad a través de la masa molecular media del aire. Durante el día, la temperatura del aire es mayor cerca de la superficie y, por lo tanto, la velocidad de propagación del sonido será mayor cerca del suelo. El efecto será el de una curvatura de la propagación de la señal sonora en ascenso alejándose de la superficie del suelo. Durante la noche, en cambio, con aire más frío cerca de la superficie, se reduce la velocidad del sonido cerca del suelo y es mayor en altura, con lo cual la señal sonora se curva hacia abajo. A grandes distancias, favorece que el sonido siga la curvatura de la Tierra, pero el efecto se observa también a corta distancia porque la elevación de la señal sonora además hace que se disipe más rápidamente durante el día en el aire libre. También establece un área de “sombra” sonora debido a que la dirección de propagación del sonido se eleva si la temperatura del aire próxima a superficie es mayor que en altura y, a cierta distancia, no llega al suelo.

El perfil o gradiente vertical de viento produce un efecto similar a la refracción atmosférica. Por fricción viscosa, la velocidad del viento es mayor en altura que cerca de superficie, en especial durante la noche favorecida por el gradiente térmico y la estratificación. Por adición de velocidades, la velocidad del sonido será mayor a favor del viento que en contra. Como esto se observa más en altura que cerca de superficie, a favor del viento la velocidad del sonido se incrementa con la altura y es menor cerca del suelo, con un efecto similar a la refracción por gradiente térmico vertical positivo en ascenso, precisamente frecuente durante la noche. Esto favorece la curvatura hacia el suelo corriente abajo del viento. De allí que es notable que se escuchen sonidos lejanos durante la noche con viento a favor. En contra del viento se produce un efecto opuesto. La velocidad del sonido es menor con la altura y mayor cerca de superficie, curvándose la propagación en elevación con respecto al suelo. De día se incrementa el efecto de refracción con viento en contra de la fuente.

En ambientes cerrados el efecto de refracción es poco importante, pero podría tener cierta relevancia si, en una sala de concierto, el aire caliente se concentra cerca del techo generando patrones de ondas estacionarias diferenciados en cada nivel y una curvatura del sonido hacia abajo.

Analicemos también brevemente algunos aspectos más concretos de los fenómenos de reflexión sonora. En primer lugar, del mismo modo que la luz genera imágenes en espejos, también el sonido genera imágenes acústicas. La reflexión en una pared plana y pulida genera una imagen virtual a la misma distancia a la que se encuentra el emisor de la pared.

Desde el punto de vista auditivo, si estamos en presencia de la fuente sonora pero también de su imagen reflejada, la percibiremos como una fuente secundaria superpuesta a la señal directa pero ambas llegan al oído con tiempos diferentes. Depende de la distancia a la que se encuentren el que podamos distinguir el sonido directo del reflejado. En una habitación normal habrá seis paredes y, por lo tanto, seis fuentes virtuales además de la propia fuente sonora, lo cual genera complejos efectos de reflexión.

Si nos encontramos entre dos paredes a distancias menores que 15m o 20m, de modo tal que los ecos retornen en tiempos de una décima de segundo o menor, se percibe una oscilación (flutter) que altera perceptivamente el sonido haciendo a veces difícilmente inteligible la comunicación mediante palabras. Puede disminuirse el efecto mediante el uso de materiales absorbentes, paredes no paralelas y modificando la ubicación del emisor.

La reflexión de una onda plana sobre una superficie convexa provoca de apertura de la dirección de propagación comparable con el efecto de un espejo convexo, en especial en sonidos longitud de onda al menos cinco a diez veces menor que el radio de convexidad. Las superficies cóncavas presentan un efecto comparable al de un espejo esférico cóncavo para las mismas longitudes de onda. Estas reflexiones producen efectos considerables en auditorios con techos abovedados, en especial en iglesias. Puede ser usado en micrófonos con fines direccionales. En superficies parabólicas hay un foco de concentración que puede ser usado como punto emisor y generar ondas planas emitidas desde el paraboloide. El efecto es particularmente notable si el emisor está en un foco del paraboloide y el receptor en el otro foco, en especial si el sonido es dirigido en forma tangencial a la superficie por el emisor y no en forma directa.

La existencia de ondas estacionarias entre paredes planas es un efecto particular de reflexión. Otro efecto singular se produce en ángulos a 90° dado que el sonido es reflejado hacia el emisor desde todas direcciones.

## *Reverberación*

Se llama “reverberación” a la persistencia del sonido en múltiples reflexiones dentro de un ambiente hasta el decaimiento. Estamos acostumbrados a los ambientes reverberantes, en especial para la audición musical. La falta de reverberación genera un sonido excesivamente directo, “plano”, sin percepción de ambiente sonoro. El exceso de reverberación da lugar a sonidos confusos, en especial para el habla, dado que se superponen sonidos emitidos con anterioridad a la emisión actual. Se mide el tiempo de reverberación como el de decaimiento a un nivel perceptual dado por diferentes criterios. Se trata del parámetro más relevante para caracterizar y calificar la acústica de salas. Será tratado con mayor detalle más adelante.

## *Difusión*

La idea de un sonido difuso puede expresarse en términos de uniformidad de densidad y flujo de energía en todo el rango de frecuencias audibles y compuesto por una superposición de ondas planas. Esto es prácticamente imposible de lograr en ningún ambiente pero puede sintetizarse en criterios más observables como el requerir que sean despreciables las irregularidades espaciales de respuesta en frecuencia, suavidad en el decaimiento de la señal sonora, que debe ser preferentemente exponencial, tiempos de reverberación homogéneos e isótropos en todo el ambiente y los mismos para todas las frecuencias. La difusión sonora es deseable en la medida que se desee “sumergir al oyente en un ambiente sonoro” dado que pierde noción de direccionalidad de la fuente y se logra fidelidad en la transmisión de la señal sonora.

El uso de irregularidades en las paredes y una distribución de materiales absorbentes contribuyen a la difusión sonora en ambientes. La presencia de superficies semicilíndricas en paredes favorece la difusión. Pero la distribución de paneles semicilíndricos no debe ser uniforme porque puede generar un efecto comparable a una red de difracción. Es preferible que haya aleatoriedad en la distribución de paneles cilíndricos, tanto en la ubicación, alineación y diámetro. También puede usarse prismas tridimensionales pero resultan más efectivos para la reflexión hacia el emisor que para la difusión.

Para que los fenómenos de difusión no sean relevantes, las rugosidades de la pared deben ser sensiblemente menores que la longitud de onda del sonido. Las más bajas frecuencias audibles se encuentran en el rango de los 15m (17m si consideramos el límite de 20Hz a las bajas frecuencias) y las más altas en el orden de los 2cm para las altas frecuencias (1,7cm si consideramos 20kHz) o del orden de los 4cm para unos 8000Hz, en el límite del rango “musical” de frecuencias (La8=7040Hz, Do9=8392Hz). Es claro entonces que las rugosidades en la escala de los centímetros favorecen la difusión en altas frecuencias y la reflexión en bajas frecuencias, con lo cual los ecos se comportan en cierta medida como un filtro pasa bajos.

## *Difracción*

Cuando se produce una señal en un punto del espacio, la perturbación se propaga generando nuevas perturbaciones puntuales “secundarias” en cada lugar donde llegó la señal. La superposición de todas las ondas secundarias produce interferencia destructiva en todos los puntos, excepto en la dirección perpendicular al frente de onda. Es el mecanismo general de propagación sintetizado en el principio de Huygens. Pero cuando hay un obstáculo, parte de las ondas secundarias no existen, las señales que sí se producen interfieren en forma constructiva en algunos puntos y destructiva en otros. El esquema de interferencia resultante se llama patrón de difracción.

En el sonido se produce un efecto de difracción muy complejo debido a diversos obstáculos que se presentan entre la fuente y el oyente, la mayor parte comparables al tamaño de las ondas sonoras. Cada obstáculo, inclusive los hombros y la cabeza, generan efectos de difracción sobre la audición sonora. En las ondas cortas es más fácil que se observe el efecto de un obstáculo como “sombra” sobre el sonido, mientras que las ondas largas de baja frecuencia rodean con más facilidad un obstáculo preponderando un efecto de difracción o inclusive resultar el obstáculo “transparente” a la baja frecuencia. A modo de ejemplo, un obstáculo circular de un metro de diámetro es casi trasparente a una onda de 10m de longitud (35Hz), presenta una fuerte difracción a una onda de 1m de longitud (350Hz) y predomina un efecto de sombra sobre una onda de 10cm de longitud o menores (3500Hz o mayor frecuencia).

El estudio de la difracción tiene importancia en el diseño de barreras acústicas, por ejemplo en zonas de tránsito o ruido industrial. Las barreras son más efectivas en alta frecuencia con un incremento en el filtro de ruido que aumenta logarítmicamente con la frecuencia del sonido. En relación con el sonido que atraviesa pequeños orificios, si la apertura es comparable con la longitud de onda, funciona como un punto radiante de ondas esféricas. Un mismo orificio puede ser fuente de ondas esféricas en baja frecuencia y “canal de paso” para ondas de alta frecuencia. Algunos experimentos, conocidos a partir de los fenómenos ópticos de difracción, pueden ser realizados con sonidos, tal el experimento con una ranura, dos ranuras y redes de difracción. Se observa el característico patrón de difracción con un máximo principal y máximos secundarios intercalados entre mínimos de intensidad.

La cabeza y los hombros generan un patrón de difracción sonoro. Hay un incremento de la presión en la parte delantera ante un sonido proveniente del frente, y un decremento en la parte trasera de la cabeza más pronunciado a los lados. Para bajas frecuencias el efecto prácticamente no se percibe y es notable a partir de los 1000Hz (longitud de onda de 35cm), muy claro a partir de los 5000Hz (7cm).

*Absorción*

La absorción de sonido es esencialmente la transformación de la energía sonora, asociada con el movimiento molecular y expresado en términos de perturbación en la presión, en energía térmica, si bien puede haber otras transformaciones. De hecho escuchar un sonido involucra la transformación en energía mecánica en el oído y energía eléctrica en el sistema nervioso. En términos térmicos, la energía involucrada es mínima para expresarse en un aumento sensible de la temperatura.

Cuando una onda sonora incide sobre una superficie sólida, además de haber perdido parte de la energía absorbida por el aire (muy pequeña excepto para ondas muy cortas), parte de la señal es reflejada y parte penetra dentro del material (refractada). La señal refractada, en general en sólidos, viaja con una velocidad mayor que en el aire. El material suele ofrecerse como canal de conducción con múltiples reflexiones dentro de las paredes y eventual emergencia en nuevas refracciones hacia el medio de origen y atravesando la pared. La mayor parte de la energía cinética de las moléculas activadas por la vibración sonora es disipada como calor dentro del material “absorbente”. La misma refracción y reflexión involucra una leve disipación adicional asociada a la imperfecta elasticidad de las paredes del medio sólido. Si se suma la energía reflejada y la refractada que atraviesa la pared sólida, no balancean la energía incidente siendo absorbida una parte de la energía en varios mecanismos y procesos.

Los “coeficientes de absorción” son parámetros que miden la efectividad de los materiales en la absorción del sonido. Como no depende sólo del material sino de la frecuencia y del ángulo de incidencia, además de la forma y disposición, lo que suele tomarse como coeficiente “del material” es un promedio para todos los ángulos de incidencia, válido para un sonido difuso y por unidad de área, y es caracterizado como función de la frecuencia. Si tiene importancia el ángulo, se requiere una especificación o determinación precisa.

Si llamamos α a tal coeficiente de absorción (promedio angular por unidad de área para sonidos difusos) y S es la superficie de un material absorbente, será la “absorción del sonido” medida en “sabines métricos” (en honor de Wallace Sabine, que será mencionado en relación con la acústica de salas, el sabine propiamente dicho se mide en pies cuadrados siendo un sabine métrico equivalente a 10.76 sabines), si bien en el Sistema Internacional es una unidad derivada expresada en m2 dado que el coeficiente de absorción es adimensional en el rango 0 a 1. El absorbente “perfecto” es una ventana abierta a una habitación con paredes absorbentes (cuerpo negro), con un coeficiente idealmente unitario.

En la práctica, se suma la contribución de todos los absorbentes como una sumatoria sobre cada una de las superficies con su coeficiente y puede obtenerse una absorción media para el ambiente. El “coeficiente de reducción de ruido” (NRC) es un promedio de los coeficientes de absorción a 250Ha, 500Hz, 1000Hz y 2000Hz, es decir, válido para el rango medio de frecuencias.

Un método para determinar los coeficientes de absorción es una cámara de reverberación. Se trata de una habitación en la que se ha estudiado el tiempo de reverberación y los modos resonantes. Se dispone una placa de material absorbente en el suelo y compara los tiempos de reverberación atribuyendo al material la absorción de energía y disminución del tiempo de reverberación. Otro método usa el Tubo de Kundt, especialmente para materiales porosos. Esencialmente consiste en un tubo en el que se generan ondas estacionarias. También puede medirse un sonido en forma directa y el sonido reflejado por una superficie porosa conservando la distancia a la fuente.

# **Efecto Doppler. Ondas de proa y de choque**

## *Efecto Doppler*

El efecto Doppler refiere a un cambio de frecuencia entre el emisor y receptor cuando están en movimiento relativo, o cuando hay una reflexión en una pared móvil. Sea un emisor de un sonido de frecuencia propia .

A medida que el emisor, que viaja con velocidad , se desplaza, digamos, hacia la derecha, las frecuencias de ondas delanteras están más próximas y las traseras más separadas.

Para cuantificarlo se evalúa el desplazamiento en cada periodo de la señal del emisor El tiempo que tarda una señal en llegar desde el emisor al receptor inicialmente a una distancia , vale:

Dado que la segunda señal fue emitida un tiempo después, el móvil se ha desplazado una distancia adicional y se encuentra a una distancia del receptor, por lo que tarda un tiempo dado por

El intervalo de tiempo entre las dos señales emitidas en intervalos que recibe el receptor vale la diferencia de tiempos entre la segunda señal recibida y la primera . Este intervalo de tiempo es el período que registra el receptor

De modo que, si la frecuencia emitida vale , la frecuencia recibida será, si el emisor y el receptor se acercan

Y si se alejan

Si no esta en la trayectoria de sino que se mueve en una trayectorias paralela, basta calcular la proyección de la velocidad del emisor en la trayectoria del emisor considerando el ángulo entre la velocidad del emisor y la posición del receptor en su trayectoria paralela

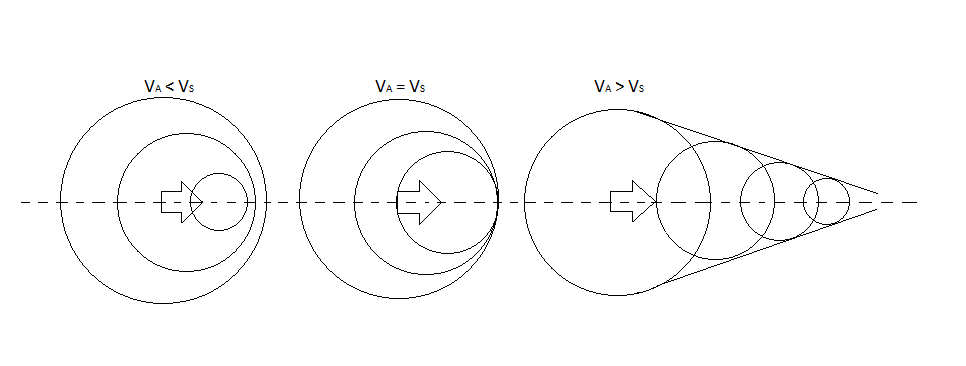
Si se desplaza el receptor, se obtiene el mismo resultado y también se plantea el efecto de reflexión en una pared móvil o de un emisor que refleja la señal que emite en una pared fija. En tal caso es válida la ecuación

El coeficiente “2” proviene del hecho que la señal tiene que recorrer el doble de distancia entre la emisión y la recepción en el tiempo en que el emisor se desplaza un ΔX entre emisiones de frentes sucesivos.

## *Ruptura de la barrera del sonido*

En el caso particular en que (o bien en que en forma general), se obtiene una singularidad de (infinita).

En tal caso, el receptor recibe un paquete de ondas con gran acumulación de energía. Es el efecto que produce un avión supersónico, una bala con , o el chasquido del látigo. Sobre el emisor se conserva una velocidad , todas las ondas de presión que emite se concentran en la posición móvil del emisor con una gran acumulación de energía local. En el caso de un avión, la alta concentración de presión sonora sobre el fuselaje genera daños. Por ello la “ruptura” de la barrera del sonido tiene que durar un tiempo lo más breve posible.



## *Ondas de proa*

Se llama “onda de proa” a la perturbación que un móvil produce al desplazarse en un medio fluido. Esta denominación proviene de las ondas de gravedad en el agua que genera la proa de un barco al moverse. Si la velocidad del móvil (del barco) es menor que las ondas de gravedad , los frentes de onda se adelantan al barco frente a la proa y se atrasan en la popa produciendo un efecto similar al Doppler. Si el barco supera la velocidad de las ondas de gravedad, produce un efecto similar a la ruptura de la barrera del sonido que, en objetos que se mueven en el aire, aunque no emitan sonido (la bala) generan el efecto de ruptura por las ondas de proa.

## *Ondas de choque u onda expansiva*

Si la compresión local es muy intensa, se produce un incremento local de la temperatura, por lo tanto, un aumento de la velocidad de propagación y una gran acumulación de energía de compresión en un frente que viaja con una velocidad mayor que la del sonido y que impacta de modo violento sobre un receptor. Es el resultante de la explosión de una bomba y de rupturas de la barrera del sonido de alta intensidad.

# **Psicoacústica y psicofísica**

## 

## *Fisiología del oído*

Distinguimos tres partes en el oído: externo, medio e interno. El oído externo está formado por el pabellón auditivo, el canal auditivo y el tímpano. La forma del pabellón, la forma de la cabeza, los hombros, el cabello, son algunos de los parámetros que afectan a la señal de entrada al canal auditivo. En general se sintetiza en una función de transferencia que relaciona la señal acústica con la señal de entrada en la forma (convolución). La función del pabellón es canalizar la señal hacia el canal auditivo y ayuda a localizar la fuente sonora.

El canal auditivo es un tubo no recto, de menos de un centímetro cuadrado de área y de unos a de longitud. En tanto tubo cerrado–abierto (tímpano-ambiente), tiene frecuencias de resonancia con una longitud de onda fundamental que cuadriplica la longitud del canal, es decir a . Si calculamos :

Las frecuencias de resonancia del oído, debidas a la longitud del canal auditivo se encuentran entre y , típicamente de unos , con un máximo de respuesta en torno a esta frecuencia y, por lo tanto, resultan amplificadas las señales acústicas en esta banda por simple resonancia en el oído externo.

El canal auditivo termina en el tímpano, una lámina muy delgada pero tensa sin ser rígida, de unos de superficie, que responde en fase con la señal de desplazamiento que ha llegado al final del canal auditivo. La función del tímpano es acoplar su vibración a la señal de presión sonora.

En el oído medio, tres pequeños huesos transmiten la vibración al oído interno. El “martillo” está ligado al tímpano, usa el “yunque” como intermediario móvil para transferir la vibración al “estribo”, éste ligado a la “ventana oval”, interfaz con el oído interno. El oído medio incrementa la amplitud de las vibraciones que recibe el tímpano dado que éste es más grande que la ventana oval. El tímpano es fácil de mover por perturbaciones en la presión de aire porque está sometido a la misma presión media de la atmósfera a ambos lados. En cambio la ventana oval, que conecta directamente con el oído interno, es más pequeña y al otro lado hay líquido (perilinfa), de modo tal que sería altamente reflectante si el sonido incidiese directamente sobre ella. El tímpano tiene un área unas quince veces mayor que la ventana oval, con lo cual, basta pensar en la relación de superficies para inferir que la fuerza inducida sobre la ventana oval es unas quince veces mayor que la que recibe el tímpano por diferencia de presión entre su cara interna (atmosférica media) y externa (atmosférica perturbada por la onda sonora). El desplazamiento del tímpano se traduce en un desplazamiento del extremo del yunque, ligado a la ventana oval, de menor amplitud; en otras palabras, la velocidad de desplazamiento de la ventana oval es menor que la del tímpano debido a que los huesecillos ejercen un efecto de palanca de primer género con una ganancia neta del orden de 1,3. El resultado combinado de palanca y relación de áreas da una amplificación del orden de veinte a treinta veces en proporción con la señal sonora que llega al oído externo con respecto a la que ingresa al oído interno.

El oído medio está inmerso en aire gracias a la apertura de la “trompa de Eustaquio” que, al tragar, lo conecta con la parte posterior de la faringe. Si estas presiones medias fuesen diferentes, la membrana timpánica se tensaría con menor flexibilidad y respuesta a la vibración sonora, mayor reflectividad y hasta sensación de sordera y dolor.

Si la perturbación de presión sonora es muy alta, el estribo se mueve con un ángulo diferente al que se desplaza con presiones moderadas o bajas reduciendo la fuerza con que actúa sobre la ventana oval. Por otra parte, los sonidos de baja frecuencia muy intensos ocasionan que se relajen los músculos tensores de los huesecillos y disminuya la fuerza actuante sobre la ventana oval. De este modo se protege el oído interno de sonidos intensos y prolongados.

El estribo está ligado a la ventana oval. Al moverse, transmite las vibraciones al canal vestibular. El oído interno está formado por tres canales, los otros son el canal timpánico y el conducto coclear que los separa. El canal vestibular y el timpánico están conectados por medio del helicotrema en el fondo más delgado o ápice del canal. El líquido o perilinfa, con alto contenido en sales, que ocupa los canales pasa a través del helicotrema hasta mover la ventana redonda en el extremo del canal timpánico, también conectada al oído medio. Al moverse la perilinfa dentro de los conductos, entrando-saliendo o saliendo-entrando la ventana oval y redonda respectivamente, se mueven las membranas internas de la cóclea.

El conducto coclear no está conectado con los canales vestibular ni timpánico. Está formado por dos membranas: de Reissner y basilar. La membrana de Reissner está del lado del canal vestibular y la membrana basilar está del lado del canal timpánico. El conjunto forma una especie de triángulo entre los dos canales. El conducto coclear está lleno de endolinfa, más viscoso que la perilinfa y con alto contenido de iones de potasio. Es la membrana basilar la que realiza la transducción de los movimientos de la cóclea en impulsos nerviosos. La membrana basilar tiene unos 30mm de largo, es más angosta y cien veces más rígida cerca de la base (0,08mm) y más ancha y flexible en el ápice (0,5mm). Esta reducción de la rigidez hace más eficiente la transferencia de energía desde la base hacia el ápice. El órgano de Corti está dentro de la membrana basilar y es el responsable de la transducción a impulsos nerviosos. El órgano de Corti está cubierto por la membrana tectorial. A lo largo del órgano de Corti hay unas 15000 células pilosas o ciliadas. Hay unas 3000 células pilosas internas y de tres a cinco fibras similares de células pilosas externas al órgano de Corti. Las células pilosas internas tienen de 40 a 60 vellos cada una sumergidos en la endolinfa. Las externas tienen de 10 a 120 vellos cada una firmemente adheridos o próximos a la membrana tectorial. Los vellos de cada haz piloso están conectados por las puntas de modo que se mueven como una unidad. Cuando se doblan en dirección a los vellos más largos, tiran de la membrana tectorial acercándola a los vellos más cortos.

Unas 30000 fibras nerviosas se conectan a la base de la cóclea. El 95% de las fibras se conectan una a una con las células pilosas internas. El 5% restante se conecta cada una con unas diez células pilosas externas y con no más de cuatro fibras nerviosas. Las que actúan sobre las células internas están recubiertas con mielina dando una mayor velocidad a la transmisión del impulso. Las fibras nerviosas provienen del ganglio espiral, que inerva la cóclea y sus axones forman el nervio auditivo. Es posible que las células nerviosas internas transmitan la información sonora y las externas modifiquen las propiedades mecánicas de las células pilosas internas. Un haz cruzado de nervios lleva la información a la corteza auditiva en los lóbulos parietales.

*Sintonización de la membrana basilar*

El movimiento de la perilinfa en los canales auditivo y timpánico, producidos por el movimiento del estribo sobre la ventana oval, produce ondas de presión a través del conducto coclear. A su vez, generan ondas mecánicas sobre la membrana basilar desde la base hasta el ápice en unos 3ms. Las ondas son comparables a la flexión de una manta con similares características. Las diferencias de elasticidad y extensión de la membrana basilar hacen que las ondas de flexión varíen en amplitud y cambien de velocidad de propagación en cada punto acumulándose energía en diferentes regiones de la membrana en función de la frecuencia. La energía de las ondas de alta frecuencia se disipa con rapidez muy cerca de la base, mientras que las de baja frecuencia se extienden a lo largo de la membrana acumulando un máximo de flexión y energía en puntos más profundos en función de la frecuencia de la onda sonora. Es posible que exista algún mecanismo activo que modifique el estado de las células ciliadas internas y mejore la sintonización mecánica a la frecuencia. Al tener una actividad mecánica, el oído “emite” sonidos que se superponen a la señal acústica.

*Mecanismo de transducción*

Las ondas de torsión que recorren la membrana basilar hacen que se mueva de forma lateral con respecto a la membrana tectorial. Las cilias que están unidas a la membrana tectorial se inclinan y las que no están en contacto lo hacen en forma solidaria y por el movimiento de la endolinfa. Al flexionar las cilias cortas, ingresa un flujo de iones potasio positivo a las cilias. El flujo normal de sodio y potasio genera una polarización estable de unos -60mV dentro de la célula. Al ingresar más iones por la flexión, se despolariza la célula alcanzando +20mV en la parte interna. Al despolarizarse, se liberan neurotransmisores desde la parte inferior de la célula pilosa, que estimulan las dendritas del ganglio espiral y genera potenciales de acción que se propagan por el nervio auditivo a los centros cerebrales superiores.

En el nervio auditivo hay neuronas que disparan señales nerviosas en sintonía con cierta frecuencia. Estas neuronas están localizadas en la región de la membrana basilar que responde con más amplitud a la flexión inducida por la frecuencia del sonido. La tasa de disparo cambia con el intervalo de tiempo entre estímulos, de modo que hay una adaptación neuronal que insensibiliza ante un sonido persistente. En los sonidos de alta frecuencia, hay regiones de la membrana basilar que responden específicamente, pero en baja frecuencia responde toda la membrana basilar con una tasa de disparos máxima en tal frecuencia de señales nerviosas en fase con las crestas de la señal sonora que se desplaza a lo largo de la membrana. A medida que la intensidad del sonido aumenta, hay un incremento en la tasa de disparo, a modo de un transductor digital de señal continua (la intensidad sonora) en una secuencia de disparos (tasa de impulsos nerviosos). Superado cierto umbral, llegan al máximo de disparos y un incremento de la intensidad no aumenta el número de señales nerviosas. Si la intensidad aumenta, también lo hace la flexión de la membrana basilar y responden otras neuronas próximas, no sintonizadas a la frecuencia pero próximas a ella, incrementando la respuesta en intensidad pero perdiendo sintonía en frecuencia. En síntesis, la frecuencia media o alta se codifica en *cuáles* neuronas se disparan, los sonidos de baja frecuencia en la *tasa* de disparos de la *totalidad* de las neuronas de la membrana, los sonidos de alta intensidad se codifican en *cuántas* neuronas se disparan, y los de baja intensidad, en la *tasa* de disparos de neuronas *específicas*.

Las señales van primero al núcleo coclear, parte al ventral y parte al dorsal, en la parte inferior trasera del cerebro. Las señales del núcleo coclear ventral se dividen a una región próxima y más baja del cerebro llamada oliva superior izquierda y derecha. La señal que recibió el núcleo coclear dorsal se dirige al colículo inferior, en el lóbulo occipital del hemisferio opuesto, mientras que de la oliva se dirige a los mismos núcleos combinando las señales de ambos oídos. También de las olivas se envía señales eferentes a las cócleas del hemisferio opuesto. Del colículo inferior van fibras aferentes al colículo medial, pero parte de la señal del colículo inferior va a estratos internos del colículo superior donde se integra con señales de origen visual y táctil. Del colículo medial se proyectan fibras hacia parte de la corteza temporal en circunvalaciones profundas laterales del cerebro, llamada “área de proyección auditiva primaria”. La corteza auditiva primaria se dispone en seis capas y diversas áreas especializadas, una de ellas es la llamada “área de Wernicke”, especializada en el reconocimiento del habla.

En los núcleos cocleares, olivares, colículos y la corteza hay grupos de neuronas sintonizadas en frecuencia, del mismo modo que lo están en la cóclea. La respuesta “tonotópica” de la membrana basilar se proyecta sobre el nervio auditivo y en la corteza auditiva primaria. A medida que se incrementa la frecuencia, las señales se mapean a mayor profundidad en la corteza auditiva.

Hay neuronas que responden a la activación de un sonido, otras al apagado, otras a ambos eventos, otras persisten durante la presencia del sonido y otras son inhibitorias. Menos de la mitad de las neuronas responden a eventos especiales más complejos como ruidos con diferentes características o sonidos muy suaves. Algunas estarían especializadas en ciertos aspectos del habla y otras entrenadas en el reconocimiento de patrones especiales como identificación de voz.

En especial, en el hemisferio izquierdo hay regiones particularmente destinadas al reconocimiento del habla. Los sonidos musicales, especialmente los aspectos melódicos, están más asociados con áreas en la corteza auditiva del hemisferio derecho, mientras que los aspectos rítmicos lo están con el hemisferio izquierdo.

## *Psicofísica*

La “psicofísica” es el estudio de las relaciones entre el estímulo del medio físico y las sensaciones que experimentamos. El nombre fue propuesto por Gustav Fechner (1801-1877) en un intento de relacionar en forma cuantitativa la mente (πσικη πσικις) con los fenómenos (φισκη φισις).

El aspecto físico de una señal involucra un estímulo que llega a un receptor u órgano sensorial. El órgano sensorial traduce (transduce) el “estímulo” físico en una “sensación”, que se expresa, en los mamíferos al menos, como disparos eléctricos a través del sistema nervioso.

Esa señal nerviosa, en respuesta del estímulo, es interpretada en forma primaria como una “percepción” por órganos superiores del sistema nervioso, por ejemplo en reconocer el sonido de una voz o de un instrumento.

La elaboración de esa percepción lleva a una interpretación, acción o decisión, o modificación de patrones aprendidos, reacomodando los procesos de elaboración de esa información. Si esa “acomodación” del sistema conduce a una mejor adecuación, registro en memoria o elaboración de una síntesis, se habrá llegado al nivel de “abstracción”. La psicofísica está en esa etapa intermedia entre la sensación y la percepción de señales externas.

El enfoque de la psicofísica, a medio camino entre la física y la fisiología, es “medir” y teorizar sobre los procesos perceptivos.

Los tres problemas nucleares que aborda la psicofísica son la *detección* de señales, la *discriminación* entre señales y la *escala* para cuantificar las percepciones. Podemos agregar en cuarto lugar el problema de la *identificación* de la señal.

El problema de la detección de señales es el de definir un umbral a partir del cual la señal es detectada. Puede definirse como un umbral de energía mínimo en el estímulo de modo que la señal sea percibida en forma consciente. Si en un eje de ordenadas se cuantifica el estímulo y en abscisas se indica la proporción de los sujetos que dan una respuesta afirmativa a la percepción, una detección ideal debería definir una función escalón. En la práctica, las funciones de detección son sigmoideas y se toma como umbral el valor de abscisa en el estímulo que define el 50% de respuestas afirmativas en la detección en ordenadas.

En el método de *estímulos constantes* se configura un conjunto de señales de diferente intensidad que es presentado en forma aleatoria y a los que el sujeto responde en forma afirmativa o negativa a la detección. Lo que se cuantifica es la proporción de respuestas afirmativas a cada nivel de estímulo en un conjunto de sujetos. En el *método de límites* se presenta una secuencia descendente y alternativamente ascendente de estímulos hasta que el sujeto deja de percibir o comienza a percibir. Los resultados son variables en un mismo sujeto y, en términos generales, los umbrales son menores con las series ascendentes. Se puede oscilar en torno al umbral para determinar el límite.

El problema de la discriminación o resolución entre señales se plantea como el problema de diferenciar cuándo dos señales son iguales o diferentes. Para evaluarlo se prohíbe decir a los sujetos que dos señales son iguales y sólo deben diferenciar por más o menos intensa. Se toma como convención que la proporción de detección de diferencias entre el 25% y el 75% de los encuestados define el “intervalo de incertidumbre” en la discriminación. La mitad del intervalo de incertidumbre es el “umbral diferencial”. El umbral diferencial para “exceso” puede ser diferente del umbral diferencial para “defecto”, y el promedio entre ambos se llama el umbral para “diferente”, que se conoce como “diferencia apenas perceptible” y simboliza “DAP”. Estos umbrales están influidos no sólo por el proceso perceptivo en sí sino por el tiempo entre la presentación de ejemplos, saturación, el rango y otras variables que entran en juego.

La *ley de Weber* plantea la relación entre el umbral diferencial ΔI y la intensidad del estímulo I. Los trabajos de Weber y Fechner a mediados del siglo XIX mostraron que hay una relación lineal entre el umbral y la intensidad, de modo que en general, para todos los procesos perceptivos, se verifica la relación

llamada “Ley de Weber” y es la “fracción de Weber”. Para la intensidad del sonido vale 0,048. La fracción de Weber es aproximadamente constante en casi el 99% del rango de sensibilidad pero en los extremos se incrementa. Esto quiere decir que hay una pérdida de sensibilidad en los extremos del rango perceptivo. En el límite inferior aumenta debido a la dificultad de discriminar la señal en el ruido fisiológico de fondo, y en el límite superior los sistemas sensoriales se ven afectados por no linealidades en condiciones de saturación y de mecanismos de protección ante señales muy intensas.

Otro de los problemas que se presenta es el “tiempo de reacción” como el lapso entre la presentación del estímulo y la respuesta efectiva, entendida como tal el disparo neurológico de la señal. Los tiempos de reacción se incrementan al aproximarse al umbral de detección, es decir que la respuesta es más lenta en el límite de la sensibilidad. El “tiempo de reacción simple” para la detección de un estímulo difiere del “tiempo de reacción opcional” para la discriminación entre alternativas.

El problema de la identificación de señales es mucho más complejo y plantea la necesidad de clasificar una percepción a partir de indicadores. El planteo se hace desde la teoría de la información. Un breve desarrollo de este modelado se apoya en la comunicación de una señal. Para ello se elabora un conjunto de preguntas que deben ser respondidas en forma afirmativa o negativa hasta identificar la respuesta correcta. A modo de ejemplo, para ubicar un punto en el espacio, se requiere tres bits de información que identifique las relaciones arriba-abajo, adelante-atrás y derecha-izquierda. Si usamos el cero y el uno en el orden del ejemplo, la secuencia 101 indicaría el octante abajo-adelante-izquierda. A los fines de minimizar la información transmitida, es conveniente informar “cero” en el caso más probable y “uno” para el caso menos probable. De este modo sólo se transmitirá información (uno) cuando haya ocurrido lo menos probable. Si la probabilidad de ocurrencia de un evento vale , podríamos usar esta probabilidad para ponderar la cantidad de información que se requiere transmitir en cada evento posible. Si hay dos eventos posibles, sólo habría que transmitir un bit de información y se haría cuando ocurre el evento menos probable. Si hubiese cuatro eventos posibles habría que transmitir a lo sumo dos bits de información para identificar los casos y ponderar ese requerimiento en términos de la probabilidad de cada uno. Si hay ocho eventos posibles, se requeriría a lo sumo tres bits. Podemos ver que estos números resultan del logaritmo en base dos del número de casos posibles (dos, cuatro y ocho). Es más adecuado escribir estos logaritmos en términos de la probabilidad, que sería para casos posibles en tanto haya equiprobabilidad. De modo que escribiremos

Como “información medida en bits” para el acontecimiento i-ésimo. Este planteo, válido para la equiprobabilidad, puede generalizarse a

El promedio ponderado por la probabilidad de la cantidad de bits requerida para transmitir cierta información puede escribirse en la forma

Este parámetro se define como “entropía” en la teoría de comunicación de señales y de información. El número de bits que puede transmitir una vía de comunicación se llama la “capacidad de canal”.

En términos generales, el sistema sensorial no puede transmitir más que entre dos y tres bits de información en estímulos puros. La combinación de estímulos con dimensiones múltiples incrementa sensiblemente, aunque no de un modo lineal, la información que debe ser transmitida para identificarlo. También esto incrementa el tiempo de reacción en forma lineal con la cantidad de información en el estímulo (ley de Hicks).

Es muy llamativo que todos los órganos sensoriales tienen un límite en la capacidad de canal entre dos y tres bits. Esto nos dice que ningún órgano puede discriminar más de entre cinco y nueve señales puras, siendo unas siete señales el valor típico que puede discriminarse. Para poder identificar una gama tan amplia de señales, si nos limitamos a alturas tonales, esta capacidad de discriminación está en el orden de las cincuenta alturas por cada octava en el rango central de altura tonal musical (unos 300Hz a 600Hz). Suele llamarse una “coma” a la mínima diferencia perceptible entre dos sonidos musicales y se estima, en una forma de interpretar las escalas, en nueve “comas” la distancia entre dos tonos consecutivos (Do-Re). Considerando el rango de alturas tonales perceptibles musicalmente, habría varios cientos de alturas tonales que deberían poder discriminarse. Notemos que el logaritmo en base dos de 1024 vale diez y de 528 vale nueve. De allí que si tenemos una capacidad de discriminación del orden de varios centenares de alturas tonales, debe haber al menos tres o quizá cuatro mecanismos que intervienen en el reconocimiento de la altura de un sonido y no solamente la frecuencia del armónico fundamental. Estos mecanismos involucran la composición armónica y también el ataque y decaimiento de la señal sonora.

El problema de las escalas se relaciona con el de la identificación en el sentido que asigna un número como medida de percepción y puede considerarse una identificación cuantitativa. Sin embargo no debe confundirse con el problema de la identificación porque éste trata la discriminación perceptiva de estímulos mientras que la escala trata el problema de la cuantificación de la percepción.

Se puede conformar una escala “directa” si se propone un rango numérico a varios sujetos y pide que asignen un número en ese rango acorde a su percepción. Las escalas “indirectas” se basan en parámetros que pretenden tener mayor objetividad. Fechner propuso usar la diferencia apenas perceptible (DAP) como unidad de sensación. Una DAP por encima del umbral absoluto genera una sensación de valor unitario. Otra DAP por encima de la unidad produce dos unidades y progresivamente se configura la escala hasta la saturación como un conteo. La integración de la ley de Weber, escrita en formato diferencial

O

En esta expresión representa el número de unidades de sensación que genera el estímulo en proporción logarítmica con el umbral absoluto y es la constante de Weber. A esta expresión se la conoce como “ley de Fechner”. Las escalas directas presentan una forma logarítmica, pero difieren de la ley de Fechner, en especial en los extremos del rango, cerca del umbral de percepción y de la saturación.

Sobre la base de experiencias con escalas de numeración directa, Stevens halló una ley que lleva su nombre. Se apoya en una reformulación de la ley de Weber expresando que la relación entre la variación de la percepción y el nivel de percepción de referencia , es proporcional a la variación de intensidad del estímulo y el estímulo de referencia . Podemos escribirla

Tomando el límite e integrando resulta

O bien

Esta ley suele escribirse para ciertas constantes y son experimentales, y la intensidad del estímulo se escribe en formato adimensional para una intensidad unitaria de referencia. En tal caso debería notarse

aunque es más apropiada matemáticamente la expresión anterior. El exponente es el parámetro donde se focaliza mayor atención. En general para todos los mecanismos perceptivos. Esto es un indicador de que todos estos mecanismos tienen mayor sensibilidad en bajas intensidades pero la respuesta disminuye a intensidades altas. Para el volumen, el exponente vale 0,60 cuando se expone al oyente en forma bi-aural. Además el contexto en el cual se recibe una sensación influye sobre la percepción, en especial porque hay una adaptación al nivel del estímulo que altera la respuesta del sujeto.

## *Psicoacústica*

La psicoacústica es la rama de la psicofísica que se aboca específicamente a las señales sonoras. El primer problema a tratar es el de la detección de una señal sonora, es decir, el umbral audible. En este sentido se distingue la *presión audible mínima*, registrada por medio de micrófonos cerca del tímpano, y el *campo audible mínimo*, que refiere al umbral de sonido audible externo al oído. El campo audible mínimo es unas tres o cuatro veces más bajo que la presión audible mínima, es decir con un umbral menor y mayor sensibilidad, quizá debido a los efectos amplificadores del oído externo. La mayor sensibilidad se registra entre 1000Hz y 5000Hz con un máximo en torno a los 2000Hz a 3000Hz con unos cinco decibeles menos en el umbral con respecto a la presión audible mínima. En el otro extremo se determina el “umbral de dolor” como el sonido cuya presión máxima produce una sensación de dolor en el tímpano. Este límite es del orden de los 150dB para frecuencias entre 100Hz y 5000Hz. La diferencia entre los dos umbrales define el “rango dinámico” audible.

Los umbrales se ven afectados por la duración del sonido. Para sonidos que duran entre 1ms a 200ms, la “ley de Hughes” plantea que lo que determina el límite de sensibilidad es la integración temporal entre la energía sonora y el tiempo de duración.

En esta expresión es la potencia con que se recibe la señal sonora y es el umbral audible. Este valor indica que debe ser la energía acumulada por una señal para que sea perceptible durante la mitad de las presentaciones. Esta ley funciona adecuadamente para duraciones de hasta 200ms.

También el oído suma señales de modo que si dos sonidos se presentan cada uno por debajo del umbral pero con una suma que lo excede, la suma será detectada. Sin embargo esto ocurre en tanto los sonidos no difieran mucho entre sí en frecuencia, más específicamente, en tanto se encuentren dentro de una “banda crítica” del orden del 20% de diferencia con la frecuencia de uno de los sonidos tomado como referencia, excepto por debajo de los 200Hz o 300Hz en que se integra sobre un ancho de banda de unos 100Hz. Entre 500Hz y 5000Hz la banda crítica es más estrecha, del orden del 15% al 10% de diferencia con respecto a una señal de referencia. Nuevamente se incrementa al 20% y aún más por encima de los 5000Hz. También hay una suma de señales en ambos oídos, en tanto el tiempo entre señales sea menor que 200ms. De esta manera la sensibilidad “biaural” aproximadamente duplica la sensibilidad “monoaural”.

El “enmascaramiento” refiere al efecto que produce un sonido que se sobrepone a otro que pretendemos escuchar como objetivo audible. Si se presentan los dos sonidos a la vez se llama “enmascaramiento simultáneo”. Ante un enmascaramiento de una frecuencia determinada, el efecto es más intenso cuando coincide la frecuencia con el sonido enmascarado, pero se difunde más intensamente hacia frecuencias mayores. Cuando el sonido de enmascaramiento es previo al sonido objetivo, se lo llama enmascaramiento “prospectivo”, y no ocurre si la diferencia de tiempo supera los 300ms. El enmascaramiento “retrospectivo” ocurre cuando el sonido de enmascaramiento ocurre unos 25ms después del sonido objetivo. También hay un enmascaramiento “central” cuando ambos sonidos se presentan en oídos diferentes, pero la intensidad del sonido de enmascaramiento debe ser al menos cinco órdenes de magnitud mayor que la del objetivo. Cuando el enmascaramiento dificulta la discriminación o interpretación se lo llama “informativo”.

En principio el efecto es fácil de explicar si recordamos que la membrana basilar responde a la alta frecuencia cerca de la base, de modo que el sonido que coincida con la frecuencia de enmascaramiento y todos los de frecuencia mayor recibirán esta señal superpuesta, mientras que los sonidos más graves, con más penetración en la membrana basilar, no serán afectados. Sin embargo el enmascaramiento central en modo biaural, es decir, con el objetivo en un oído y el enmascaramiento en el otro, produce un efecto similar aunque de menor intensidad, lo que indica que el enmascaramiento se manifiesta con un efecto inhibidor en las respuestas neuronales en fases superiores del procesamiento de la señal.

El enmascaramiento prospectivo puede explicarse considerando que las células nerviosas requieren un tiempo de reposo de algunos milisegundos para estar nuevamente activas, pero también es posible que la membrana basilar continúe vibrando hasta unos 10ms después de la supresión del sonido. El enmascaramiento retrospectivo es menos claro y es posible que ocurra en niveles muy altos del procesamiento de la señal sonora. El enmascaramiento informativo es más complejo y es menor cuanto más alejada está la máscara del objetivo en cualquiera de las propiedades de la señal, lo que es un indicio que este enmascaramiento ocurre en altos niveles de procesamiento neurológico.

*Discriminación de sonidos*

El problema de la discriminación se plantea en términos de evaluar en qué medida deben diferir dos sonidos para que puedan ser identificados como diferentes. Un caso especial es el del enmascaramiento en el sentido de qué señales debe contener para ser identificado de un fondo de ruido.

El primer problema puede plantearse en términos de medir la fracción de Weber para distintos niveles de intensidad y frecuencia. Este coeficiente es menor para sonidos en la banda de frecuencia en el orden de los 3000Hz a 4000Hz, es decir, con mayor sensibilidad, mientras que se incrementa (menor sensibilidad) predominantemente en la baja frecuencia. Disminuye a medida que se incrementa la intensidad siendo menor que 0.1 a partir de unos 60dB en presión. En general, el oído puede distinguir variaciones entre 10% y 20% de una señal en un amplio rango de frecuencias e intensidades. La discriminación mejora en la audición biaural y en función de la duración del sonido en intervalos de 2ms a 2s. Otro planteo es el de la “discriminación de perfil”, entendiéndose por identificar variaciones en uno de los componentes de sonidos complejos. Este poder de discriminación es mucho mayor que el de tonos puros obteniendo fracciones de Weber de 0.005 y aún menores en condiciones especiales. La capacidad de discriminación biaural es en general un 33% mejor que en modo monoaural.

*Localización espacial de fuentes sonoras*

El problema de la localización se plantea en términos de la ubicación de la fuente tanto en dirección y sentido como en distancia tomando al oyente como referencia. Para ello el oyente recurre a ciertas “claves” para la detección de la fuente.

El ángulo horizontal de origen de la fuente es el “azimut”. Si un sonido proviene de uno de los lados, habrá un oído que lo recibirá en forma directa mientras que el otro recibirá la señal difractada por la cabeza con cierto retraso. El efecto es tanto mayor cuanto más grande sea el ángulo con respecto a la dirección frontal hasta los 90º. Los sonidos de alta frecuencia tendrán un mayor efecto de “sombra”, expresado en una diferencia de intensidad sonora, mientras que los de menor frecuencia lo manifestarán en la diferencia de tiempo y en la alteración por difracción. La máxima diferencia de tiempo es menor que 1ms (0,8ms) para un ángulo recto con respecto a la dirección frontal. Esta diferencia de tiempos puede expresarse como una diferencia de fase entre las dos señales sonoras en baja frecuencia, pero es ambigua en alta frecuencia por encima de los 1000Hz. Los sonidos con claves conflictivas se perciben como antinaturales o como provenientes de fuentes diferentes, por ejemplo, un sonido de baja frecuencia que llegue con más intensidad pero a posteriori a un oído que a otro. En términos generales, el error en la localización azimutal es del orden de 10º a º15 en baja y alta frecuencia, mientras que en frecuencias intermedias (3000Hz) es de unos 20º. El oído es más sensible para la detección azimutal en la dirección frontal mientras que es más sensible a la altitud en la dirección lateral.

La estructura espectral de sonidos también es un indicio, especialmente en lo que respecta a la elevación con respecto al horizonte. La forma del pabellón auditivo, de la cabeza y difracción en hombros da indicios de la elevación debido a la modificación espectral que impone la función de transferencia, en especial del pabellón. Aun sonidos de intensidad baja o intermedia pueden detectarse con duraciones de 25μs. Si la intensidad es muy alta, la modificación espectral es mínima y no ofrece indicios de altitud.

Si la fuente es móvil, la detección direccional es más precisa y puede ser menor que 1º. Inclusive las aceleraciones pueden ser detectadas si la señal dura un tiempo más prolongado.

*Claves de reverberación*

El efecto de ecos múltiples en un período breve de tiempo de un sonido que se refleja repetidamente en paredes y obstáculos que rodean a la fuente emisora se conoce como “reverberación”. Si el tiempo entre reflexiones es mayor de 35ms, puede identificarse como dos sonidos diferenciados y sólo reconocer como fuente al emisor original pero si los sonidos reflejados llegan al receptor en un intervalo menor, el conjunto sonoro se percibe fusionado como una unidad. Sin embargo, entre todos los sonidos producidos por la reverberación se asocia la fuente con el primero en recibirse, lo que se conoce como “efecto de precedencia”.

El efecto de precedencia es más marcado, desde el punto de vista perceptivo, cuando el primer sonido es de más baja frecuencia que el segundo, pero si es el sonido agudo el precedente se produce un efecto de confusión. Los ecos de sonidos dan una imagen del entorno espacial. El movimiento de cabeza permite obtener una imagen espacial más precisa utilizando los ecos múltiples como referencia.

A medida que la fuente se aleja, el sonido recibido en forma directa disminuye más rápidamente que el producido por reverberación, de modo que la proporción entre el sonido directo y el reverberado ofrece también un indicio acerca de la distancia a la fuente. La estructura espectral también da un indicio de distancia dado que los sonidos de alta frecuencia se asocian a fuentes próximas mientras que los de baja frecuencia se vinculan a fuentes más lejanas. La intensidad del sonido también ofrece una clave de distancia, así como la variación de intensidad en relación con pequeños acercamientos y alejamientos a la fuente.

*Función de transferencia y espacio auditivo*

Para representar el efecto conjunto de la cabeza y los pabellones sobre el sonido, se caracteriza la alteración por medio de la “función de transferencia de cabeza” (FTC o HTR head transfer function). Cada persona tiene una función de transferencia propia pero existen formas genéricas que pueden usarse para crear espacios auditivos virtuales. De este modo, si un sonido que el oyente recibe a través de auriculares es transformado mediante la función de transferencia adecuado, el oyente percibe este sonido como proveniente del exterior y se sumerge en un “espacio auditivo virtual”.

## *Dimensiones subjetivas*

Se consideraba que las dos dimensiones que caracterizan primariamente a un sonido eran la sonoridad, asociada con la intensidad y la presión física, y la altura tonal, asociada con la frecuencia. El “timbre” se relacionaba con la estructura espectral y se agregaba la duración del estímulo sonoro. Hoy se reconoce que además de la altura tonal y la sonoridad, hay otras dimensiones que caracterizan los sonidos como la “ubicación percibida” de la fuente, la “duración percibida” (no necesariamente la duración física del sonido), el “timbre”, en tanto cualidad mucho más compleja que el espectro pero que permite identificar al emisor y, en el caso del habla, da indicios del estado de ánimo y el sentido metafórico del lenguaje; el “volumen” desde la perspectiva de “llenar el espacio”, la “densidad” en tanto medida subjetiva de concentración del sonido con imágenes de “pequeñez” y “dureza”; la “consonancia o disonancia” entre sonidos que parecen acoplarse o bien chocar entre sí. Nos concentraremos especialmente en la sonoridad y en la altura tonal en tanto se relacionan más estrechamente con cualidades físicas pero ahora en términos perceptivos.

## *Sonoridad*

Una manera de medir la presión sonora es por medio de la unidad definida como decibel. Para ello se toma como presión umbral audible un límite de Po=20μPa=2.10-5Pa y define la intensidad medida en “decibeles” como

Como la presión está relacionada cuadráticamente con la intensidad, se toma como umbral de intensidad Io=10-12W/m2 y define la intensidad en decibeles

Este límite de presión umbral es convencional y en cierto modo típico para el oído humano funcionando en forma monoaural. El campo audible mínimo refiere a la respuesta biaural del oído al sonido, y la respuesta umbral de un sonido biaural proveniente del entorno a 1000Hz es del orden de 10μPa mientras que a unos 4000Hz es de unos 2μPa a 5μPa. El umbral de presión sonora a otras frecuencias en general es más alto, en especial en bajas frecuencias menores que 100Hz, mientras que hay un máximo de sensibilidad en torno a los 3000Hz.

Podemos ver que la intensidad y la presión están relacionadas funcionalmente pero no son asimilables en forma directa a la sonoridad, que refiere a un parámetro perceptivo. De modo que los “decibeles físicos” no representan una medida de percepción de sonoridad sino apenas una primera aproximación. De acuerdo con la ley de Stevens, una medida de sonoridad a partir de la presión está dada por

donde S es la sonoridad, es la presión sonora, es un umbral de referencia, es una constante, y vale aproximadamente 0.6 para la sonoridad. En principio se toma como referencia la frecuencia de 1000Hz. Para ello muchos observadores asociaron números a diferentes sonidos. A un sonido de 40dB tomado como referencia se le asignó el número 100 y, a modo de ejemplo, a un sonido con el doble de sonoridad se le asignó el número 200. El exponente indica que la sonoridad varía más rápidamente con presiones bajas mientras que se estabiliza a presiones altas. Por otra parte, este valor típico de varía con la frecuencia siendo mayor a frecuencias bajas y menor para sonidos más agudos; para una frecuencia de 60Hz una intensidad de 40dB está en el umbral de sensibilidad.

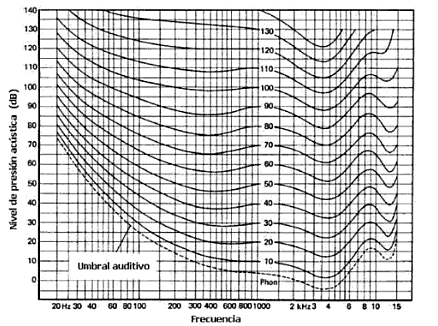
Planteando esta forma de ley de sonoridad a diferentes frecuencias e intensidades, Stevens propuso tomar como referencia una señal de 1000Hz a un nivel estándar de referencia de 40dB. Un sonido de 40dB con una frecuencia de 1kHz tiene una sonoridad de “un son” (también un sone). La duplicación de la sonoridad medida en sones requiere aproximadamente un incremento físico del orden de los 10dB pero no en forma constante en todo el rango de frecuencia. La sensibilidad es mucho mayor a bajos niveles de intensidad de modo que pequeñas variaciones en los niveles de presión sonora da lugar a sensibles alteraciones en la sonoridad pero en niveles altos de intensidad el efecto sobre la sonoridad es mucho menos notable.

Al plantear a diferentes oyentes que comparen la sonoridad de sonidos a diferentes frecuencias con el sonido de referencia, se obtiene una curva de “iso-sonoridad” o “contornos de igual sonoridad”.

La igualdad de sonoridades en 40dB pero a diferentes frecuencias condujo a diseñar una curva de respuesta de sonoridad en función de la frecuencia o curva “isofónica” a la que se asoció la unidad de un son.

En otra escala de sonoridad se definió a la curva de igual sonoridad a partir de 40dB como de 40fon. En esta escala, sólo a una frecuencia de 1000Hz la sonoridad de 40dB coincide numéricamente con una sonoridad de 40fon. Planteada para otros niveles de intensidad en decibeles se compone un gráfico de “curvas isofónicas” o “curvas de Fletcher–Munson”. Se llama entonces “fon” a una medida de sonoridad que sigue la forma de las curvas. A modo de ejemplo, a 1000Hz la isofona de 40dB corresponde a 40fon pero a 100Hz se requiere 62dB de intensidad física para percibir una intensidad de 40dB audibles o 40fon.

En la siguiente figura se presenta las curvas isofónicas



En el eje horizontal se representa la frecuencia y en el vertical el nivel de presión acústica en decibeles. Se destaca el mínimo umbral o máxima respuesta auditiva en torno a los 3500Hz. Los límites de frecuencia corresponden al rango audible. Puede notarse que no hay linealidad en lo absoluto, que parece haber una mejor respuesta en niveles medios de presión a frecuencias en el orden de los 400Hz y nuevamente una mejor respuesta en muy alta frecuencia en torno a los 12kHz.

La medida en sones se expresa por medio de una relación de tipo potencial a partir de la medida de sonoridad en fones

donde “F” es la medida de sonoridad en fones. Notemos que a F=40fon tenemos S=1son. A F = 50fon resulta S=2son mientras que a F=80fon, el doble de 40fon, se obtiene S=16son. En este último ejemplo vemos que duplicar la sonoridad medida en fones equivale a multiplicar por 16 la sonoridad medida en sones, que sería la más representativa como medida psicoacústica, pero que esto requiere una intensidad del orden de diez mil veces mayor en el sonido y un incremento en presión del orden de cien. Si bien la medida más asociada con la percepción estaría dada por el son, la más usada es el fon.

La relación propuesta más arriba es válida para sonoridades superiores a los 40fon. Por debajo de los 40fon vale aproximadamente la relación:

Expresado como relación de presiones e incorporando el parámetro α

Notemos que el umbral varía con la frecuencia.

Cuando se iguala un son a físicos

La duración del sonido también afecta la sonoridad cuando es menor que 200ms. Por ejemplo, un sonido con una duración de 10ms debe tener unos 10dB más para igualar la sonoridad de un sonido similar de 200ms de duración, como si el oído integrase la señal sonora en una ventana temporal de unos 200ms. También hay una suma de sonoridad biaural, de modo que hay casi una duplicación de la sonoridad cuando el sonido se recibe en ambos oídos, lo que corresponde a un incremento de unos 3dB, 3fon 0 un incremento de 0.23son cuando se escucha con los dos oídos con respecto a lo que se recibe en un solo oído.

Un fenómeno de “adaptación auditiva” hace disminuir la sonoridad de un sonido cuando se escucha en forma continua. Esta adaptación es mayor en tonos agudos que en graves y es probable que se produzca en niveles más profundos del procesamiento de la señal sonora. La “fatiga auditiva”, producida por exposición a altos niveles de intensidad, también provoca una disminución de la sensibilidad que puede durar horas y alcanzar descensos de respuesta auditiva del orden de hasta 50dB inmediatamente después de la exposición. También incrementa la sonoridad la exposición a sonidos de un amplio rango de frecuencias. Hay un ancho de banda crítica, del orden del 15% en frecuencia en torno a un tono central, en el que el incremento de frecuencias con la misma sonoridad dentro de la banda no tiene un efecto sensible en la intensidad percibida, pero al extender las frecuencias fuera de la banda crítica con el mismo nivel de intensidad, hay una percepción de incremento del nivel sonoro. El efecto es complejo cuando hay sonidos simultáneos dentro y fuera de la banda crítica.

## *Altura tonal*

En principio se asocia la idea de altura tonal con la frecuencia, pero la respuesta tonal del oído no es estrictamente proporcional a la frecuencia. Si bien existe una fuerte relación entre la altura tonal y la frecuencia, esta relación no es directa de modo que resulte correcto asimilar los dos aspectos, separando la altura tonal en el marco de la psicoacústica de la frecuencia en el ámbito de la física.

La escala tonal refiere a la secuencia de sonidos de altura creciente. La palabra “altura” del sonido refiere a la altura de la columna de agua con que se llenaba un tubo, cerrado en el fondo y abierto en el tope, para que resuene en modos progresivamente más agudos. Sobre esta base y la de la longitud de cuerdas se construyeron variadas escalas musicales que se apoyan en la noción física de frecuencia.

La escala no musical más conocida hasta el momento fue propuesta por Stevens, Volkman y Newman en 1937 y se la conoce como “escala mel”. Para construirla diseñaron un teclado cuya frecuencia de cada tecla podía variarse por medio de un dial. Cada oyente podía modificar la frecuencia de la siguiente tecla de modo que perceptivamente obtenga una sucesión de intervalos tonales iguales. Estos intervalos no resultaron ser iguales ni proporcionales en frecuencia, ni coincidentes con ninguna escala musical.

El sonido estándar es el de 1000Hz a 40dB, al que se le asigna una altura tonal de 1000mel. En la escala mel la distancia tonal en la baja frecuencia es menor que en la alta frecuencia, es decir que una duplicación en frecuencia en sonidos graves se percibe como sonidos más cercanos en altura tonal que en la alta frecuencia. Por ejemplo, entre 100Hz y 200Hz se percibe una distancia unas tres veces menor que entre 1000Hz y 2000Hz, mientras que ambos intervalos corresponden a una octava o duplicación en frecuencia en escalas tonales musicales.

Se genera perceptivamente contornos de tonalidad igual para sonidos con distinta intensidad. En tonos agudos la altura tonal percibida es mayor si se incrementa la intensidad, mientras que lo contrario ocurre con sonidos graves. Este efecto es poco notable para sonidos entre 1000Hz y 3000Hz, pero muy sensible a partir de los 300Hz en sonidos graves y por encima de los 5000Hz en sonidos agudos.

Para percibir la altura tonal se requiere una duración mínima del orden de los 10ms. La percepción de altura tonal mejora hasta alcanzar la duración de unos 250ms y a partir de ese tiempo la altura percibida es independiente de la duración.

El procesamiento de la señal de altura tonal se realiza fundamentalmente en el lóbulo temporal derecho (giro del Herschl), rodeado de un área especializada en el reconocimiento del lenguaje hablado (área de Wernicke).

*Altura tonal y timbre*

Ya hemos dicho que la distribución de células ciliadas en la membrana basilar se mapea en una parte del lóbulo temporal derecho del cerebro. Se plante el problema de diferenciar sonidos próximos. Puede expresarse en términos de la “fracción de Weber” . Pero la “constante” de Weber varía con la frecuencia y el nivel de presión sonora. Tenemos una máxima discriminación entre y que puede ser inferior al . La discriminación mejora con la intensidad siendo muy pobre cerca del umbral de presión. La discriminación biaural es el orden de a mejor que la monoaural.

En general los sonidos son complejos, es decir, generados por más de una frecuencia en forma simultánea. Esta es la situación más usual dado que sonidos sinusoidales simples son apenas y dificultosamente generados con fines experimentales. Si hay sólo dos tonos presentes, el más bajo se reconoce como el “fundamental” y los superiores son “parciales” o bien “armónicos superiores” cuando su frecuencia es múltiplo de la fundamental.

El “timbre” es una forma de sintetizar un conjunto muy amplio y complejo de percepción sonora. En principio es lo que nos permite reconocer la fuente del sonido. Una primera aproximación a la explicación física del timbre se basa en el complejo de armónicos y parciales presentes en un sonido y su intensidad relativa. La presencia de armónicos superiores mejora sensiblemente la percepción de la altura tonal de la fundamental.

Ya Helmholtz intentó una clasificación tímbrica sobre bases físicas.

Fundamental solo: Suave

Fundamental y primer armónico: Melosa

Fundamental y varios armónicos: Ancha y plena

Fundamental y armónicos altos: Agudo

Fundamental intenso y armónicos menos intensos: Plena

Fundamental menos intenso, armónicos más intensos: Hueca

Armónicos impares, predominando 1, 3 y 5: Nasal

Razones de frecuencia : Áspera o de rechinido

La fundamental es el máximo común denominador de sonidos complejos. Por ejemplo un sonido compuesto por armónicos de 300Hz, 600Hz, 900Hz y 1200Hz tiene el de 300Hz como fundamental, pero un sonido compuesto por 600Hz, 900Hz y 1200Hz también tiene el de 300Hz como fundamental aunque no esté presente físicamente, y este sonido es percibido como “fundamental ausente”.

Hay dos modelos teóricos, que en cierto modo son complementarios, que explican el reconocimiento tonal. Uno es la “teoría del lugar” o mapeo tonotópico en la membrana basilar y en la corteza auditiva del cerebro. El otro es la “teoría de la frecuencia”, que se apoya en considerar que hay disparos globales en toda la membrana basilar y se contabiliza el número de disparos. La teoría del lugar no da una explicación clara de la presencia de la fundamental ausente. Se supone que ambos modelos funcionan de modo complementario. Hasta 1000Hz se codificaría el número de disparos complementado con la tonotopía. Entre 100Hz y 4000Hz no son neuronas aisladas sino grupos alternos o “andanada” lo que mapea en frecuencia y en disparos. Por encima de 4000Hz predomina el principio del lugar.

En el reconocimiento de la altura tonal no sólo se tiene en cuenta el tono fundamental sino la estructura de armónicos. Esto favorece una mayor precisión en la determinación de la altura a niveles de error del 1%, que disminuye a un 8% si se presenta el tono senoidal puro.

Se conoce como “ley acústica de Ohm” la que refiere al funcionamiento del oído como un analizador de Fourier. El oyente es capaz de discriminar una superposición de armónicos en un sonido compuesto. A la frecuencia de tono puro más baja y habitualmente más intensa se la llama “fundamental”. Por encima de este tono fundamental hay un complejo de armónicos superiores. Desde el punto de vista del análisis de Fourier, los armónicos superiores son múltiplos enteros del fundamental. En la práctica hay componentes de frecuencia más alta que no son armónicos superiores en tanto múltiplos exactos sino frecuencias inarmónicas que acompañan al fundamental. No hay una nomenclatura uniforme al respecto pero en el análisis musical suele referirse a “parciales” o a “sobretonos” en relación con los armónicos superiores. Esta referencia a “parciales” distingue la noción matemática de los armónicos de Fourier de los componentes de un sonido superiores en altura tonal al fundamental.

La aproximación primaria a la noción de “timbre” es la referida a la estructura espectral de un sonido complejo. Sería esta estructura la que nos permite identificar la fuente sonora, es decir, reconocer el sonido de una voz o si el emisor es un violín, un piano o un clarinete…. Sin embargo el reconocimiento tímbrico de la fuente es mucho más complejo que la estructura espectral. Tiene gran relevancia la dinámica del sonido, es decir el ataque o transitorio de inicio, el modo en que el sonido se sostiene, si hay un decaimiento temporal, eventualmente exponencial. La evolución no sólo involucra al tono fundamental sino que los parciales que componen el sonido complejo pueden responder a una evolución dinámica diferenciada. Por ejemplo, en vibraciones de campanas el fundamental tiene una duración temporal mucho más larga que los parciales superiores, que suelen ser inarmónicos. En las cuerdas y tubos la estructura armónica es más homogénea, es decir, comparable a los múltiplos esperados del análisis de Fourier.

La dinámica o evolución temporal de un sonido produce el efecto singular de no poder identificar la fuente si el sonido se reproduce en sentido temporal opuesto, especialmente si los decaimientos son marcados pero aún en sonidos sostenidos como la nota de un violín.

Como las fuentes producen sonidos armónicos e inarmónicos con respecto al fundamental, los armónicos superiores tienen también sus armónicos en tanto componentes de Fourier. De allí que haya un complejo de sonidos no sólo múltiplos del fundamental, aun cuando esté compuesto por armónicos puros, sino también sonidos que pueden representar fracciones racionales del fundamental e inclusive proporciones irracionales cuando hay parciales inarmónicos. En tales casos el fundamental es el máximo común divisor de los sonidos presentes. Esto suele dar lugar al efecto muy singular de combinar sonidos que no son múltiplos enteros de un fundamental pero con un máximo denominador común que, si bien no existe en el sonido real, se lo percibe como el “fundamental ausente”.

Fue Helmholtz quien propuso la “teoría del lugar” como un mecanismo para reconocer los tonos presentes en un sonido complejo. En 1960 Bekesy estableció el mecanismo de propagación y vibración de la membrana basilar, que fue descripto brevemente al tratar la fisiología del oído, motivo por el cual recibió el premio Nobel algunos años después. Helmholtz y Bekesy más tarde intentaron explicar el fundamental ausente considerando que la combinación de los armónicos presentes produce vibraciones y curvaturas en la membrana basilar que lo manifiestan como un componente físico a nivel fisiológico pero no está presente en el sonido externo. Pero experimentos sobre enmascaramiento del fundamental ausente muestran que tal sonido permanece aun cuando debería ser enmascarado por ruido, de modo que este fenómeno se produce en niveles superiores del procesamiento de la señal auditiva o bien existe otro mecanismo que permite identificar la altura tonal.

Otra teoría se apoya en la frecuencia de disparos de las neuronas presentes en la membrana basilar en fase con las crestas de las ondas sonoras que ingresan al oído y reproducen internamente la frecuencia de la onda sonora en la frecuencia de disparos. Esta teoría en principio podría explicar la percepción del fundamental ausente, pero se ha observado que este fenómeno también ocurre cuando tonos puros no múltiplos entre sí se presentan en diferentes oídos. Otro problema con esta teoría es que el tiempo de recuperación de una neurona para poder disparar nuevamente un impulso nervioso impide que pueda responder a frecuencias mayores que 1000Hz. De allí que se piensa que funcionan en grupo disparando una mientras otras se recuperan cuando se supera esta frecuencia. Este “intercambio de roles” en las neuronas permitiría codificar frecuencias hasta el orden de 4000Hz. Otro problema radica en la percepción simultánea de altura y sonoridad. Se piensa que la sonoridad puede estar codificada en el número de disparos asociados con la presión sonora. De modo que el oído estaría de este modo digitalizando la señal de intensidad en el número de disparos, considerando que cuanto más intenso sea el sonido, más neuronas son activadas, mientras que la altura tonal estaría asociada a la densidad de disparos o número de estímulos nerviosos que recorren el nervio auditivo.

Wever, hacia 1970, propuso un doble marco teórico aceptando la codificación en frecuencia de disparos y digitalización de intensidad hasta unos 4000Hz y en forma exclusiva debajo de 500Hz. Entre 500Hz y 20kHz funcionaría la “teoría del lugar”, pero no resulta suficiente como explicación para la gran resolución en frecuencia en la banda intermedia. De modo que se piensa que entre 500Hz y 4000Hz intervienen ambos mecanismos, por debajo de 500Hz la respuesta global en frecuencia y digitalización de intensidad, y por encima de los 4000Hz la codificación por el lugar donde se concentra la actividad de la membrana basilar.

*Escalas*

De todos modos se utiliza nomenclatura de origen musical en términos de “escalas” sonoras. La secuencia de ocho notas musicales hasta repetir el “nombre” de la nota llevó a la denominación de “octava” cuando se duplica la frecuencia de un sonido. Se ha tomado como referencia el “La440” de 440Hz. Se lo llama “La4”, que se lee “La cuarta” porque se encuentra en la parte central del registro del piano, cuarta secuencia de la escala mayor iniciada en “Do”, completa. En esta nomenclatura, el La3 se ubica en la “octava inferior” y corresponde a una frecuencia de 220Hz, el La2 a 110Hz, el La1 a 55Hz y el La0 a 27,5Hz. El La5 tiene una frecuencia de 880Hz, el La6 de 1760Hz, el La7 de 3520Hz, el La8 de 7040Hz y el La9 de 14080Hz. El La10 está fuera del rango audible. Esto nos indica que tenemos un rango audible de unas diez octavas, de las cuales unas siete u ocho octavas tienen interés musical como frecuencias tonales, pero los armónicos superiores tienen relevancia tímbrica.

Para hallar el resto de las notas musicales se aplica un conjunto de relaciones matemáticas en varias formas diferentes en la música occidental, lo que lleva a construir las llamadas escala cromática y escala temperada.

Pitágoras plantea la primera escala por “ciclos de quinta” proponiendo que la frecuencia de la quinta es de la frecuencia de la nota de referencia. Así, si la quinta corresponde al . Lo importante es que hay una proporción de frecuencia que corresponde la mitad del tercer armónico de la serie de Fourier. La quinta del es el , con una frecuencia de:

Y así sucesivamente hasta armar la secuencia de doce notas para volver a la octava al finalizar el ciclo. El problema es que no hay ninguna relación de potencias tal que para cerrar el ciclo en la octava. Se combina secuencias crecientes con decrecientes pero hay varias opciones para generar escalas.

En la escala cromática las relaciones son muy simples desde el punto de vista matemático. La quinta nota a partir de la fundamental, o quinta justa, tiene una relación en frecuencia de 3/2 con el La-4ª, es decir, que corresponde al Mi-5ª.

Para facilitar el reconocimiento de las notas musicales, si partimos de la nota Do como fundamental con una frecuencia de 264 Hz, la relación cromática con las notas superiores en la escala mayor es

Do-4ª Re-4ª Mi-4ª Fa-4ª Sol-4ª La-4ª Si-4ª Do-5ª Re-5ª Mi-5ª Fa-5ª Sol-5ª

1ª 2ª 3ª 4ª 5ª 6ª 7ª 8ª 9ª 10ª 11ª 12ª

264 297 330 352 396 440 495 528 594 660 704 792

1 9/8 5/4 4/3 3/2 5/3 15/8 2 9/4 5/2 8/3 3

Puede notarse que la octava tiene una frecuencia doble que la fundamental (Do-5ª, 528 Hz), la quinta (Sol-4ª) es la octava inferior de la nota que tiene una frecuencia triple (Sol-5ª, 792 Hz), el cuádruple corresponde a la siguiente octava de Do (Do-6ª, 1056 Hz), el quíntuple o quinto armónico al Mi-6ª, (1320 Hz), el sexto armónico es Sol-6ª, con 1580 Hz, el séptimo armónico no corresponde a ninguna nota (entre el La-3ª y el Si-3ª), el octavo a otra octava de Do y el noveno al Re-7ª (2376 Hz). El armónico quince corresponde al Si-6ª (3960 Hz). Puede notarse que la estructura de los primeros seis armónicos superiores responde a la forma del acorde perfecto mayor (Do – Mi – Sol). El acorde de novena (Do – Mi – Sol – Re) incluye hasta el noveno armónico. Puede verse también que las notas Fa y La no pueden ser alcanzadas por armónicos de la fundamental. Los sostenidos y bemoles se obtienen multiplicando la frecuencia de la nota aumentada o disminuida por 16/15 o 15/16 respectivamente.

La escala aumentada ascendente desde la nota fundamental Do-4ª resulta

Do-4ª Do#-4ª Re-4ª Re#-4ª Mi-4ª Fa-4ª Fa#-4ª Sol-4ª Sol#-4ª La-4ª La#-4ª Si-4ª

1ª 2ª 3ª 4ª 5ª 6ª 7ª 8ª 9ª 10ª 11ª 12ª

264 281.6 297 316.8 330 352 375.5 396 422.4 440 469.3 495

1 16/15 9/8 6/5 5/4 4/3 64/45 3/2 8/5 5/3 16/9 15/8

La escala disminuida descendente desde la nota fundamental Do-5ª resulta

Reb-4ª Re-4ª Mib-4ª Mi-4ª Fa-4ª Solb-4ª Sol-4ª Lab#-4ª La-4ª Sib-4ª Si-4ª Do-5ª

12ª 11ª 10ª 9ª 8ª 7ª 6ª 5ª 4ª 3ª 2ª 1ª

278.4 297 309.4 330 352 371.25 396 412.5 440 464.1 495 528

1 9/8 75/64 5/4 4/3 45/32 3/2 75/48 5/3 225/128 15/8 2

Es notable esta estructura matemática perfecta y la posible relación con la estructura del canal auditivo del oído interno, lo cual puede conducir a un análisis matemático de la “estética” musical. Puede notarse que no coinciden las notas aumentadas con la siguiente disminuida, lo cual complica el pasaje tonal y modal en el desarrollo de la música.

La escala temperada tiene un fundamento en la técnica musical. Cuando se selecciona una nota fundamental diferente, si se mantienen las relaciones armónicas, la escala de frecuencias cambia para responder a las relaciones exactas. Por lo tanto, los instrumentos musicales de teclado deberían ser afinados cada vez que se cambia la escala de referencia (en música se llama cambio de tonalidad). Esto impediría que la mayor parte de la música sea ejecutada por muchos instrumentos.

La escala temperada divide el intervalo de octava en doce notas en intervalos iguales en la relación entre sí, y no hay entonces diferencia entre notas en el cambio de escalas musicales. Por ejemplo puede verse que el Do# tiene una frecuencia de 281,6 Hz, mientras que el Reb tiene una frecuencia de 278,44 Hz. En la escala temperada, el Do# y el Reb tienen una frecuencia intermedia de 279,7 Hz. Esto produce en la música un efecto de batidos debido a que se superponen notas a armónicos ligeramente diferentes, pero se resuelve ejecutando con mayor velocidad y dejando que los acordes prolongados sólo contengan notas justas.

Si adoptamos en la escala temperada el La-4ª de 440 Hz, resulta la siguiente secuencia en la tercera octava a partir de una nota Do-4ª

Do-4ª Do#-4ª Re-4ª Re#-4ª Mi-4ª Fa-4ª Fa#-4ª Sol-4ª Sol#-4ª La-4ª La#-4ª Si-4ª

1ª 2ª 3ª 4ª 5ª 6ª 7ª 8ª 9ª 10ª 11ª 12ª

261,6 277,2 293,7 311,1 329,6 349,2 370,0 392,0 415,3 440,0 466,1 493,9

En 1937 Stevens, Volkman y Newman propusieron una escala psicofísica en unidad “mel” por medio de métodos directos. Les dieron a varios sujetos la posibilidad de generar tonos a partir de un registro continuo en intervalos auditivamente iguales. La escala obtenida no coincide con una relación lineal de frecuencias, ni logarítmica ni con ninguna escala musical conocida. A un tono de 1000Hz y 40dB se le asignó 1000mel. Es una nota entre Si5 y Do6. En la escala de mel la octava entre Do3 y Do4 corresponde a 167mel mientras que entre Do6 y Do7 hay 508mel. Hay mayor discriminación de frecuencias en registro agudo que en grave y las escalas son perceptivamente más amplias en el registro agudo que en el grave. La mayor resolución tonal estaría entre y .

La intensidad sonora también influye en la percepción de altura tonal. Así como se puede construir curvas isofónicas o de igual sonoridad para distintas frecuencias, también se puede construir curvas isotónicas o de igual altura tonal para distintas intensidades o presiones sonoras. Entre 2000Hz y 3000Hz la altura tonal perceptiva es bastante estable y casi independiente de la intensidad. Los tonos agudos se perciben como más agudos cuando se incrementa la sonoridad y los tonos graves como más graves con intensidades por encima de los 40dB o 50dB.

La duración tiene una gran influencia en la determinación de la altura si es menor que 200ms, pero aun por encima de este tiempo, la discriminación tonal mejora con la duración. Para tonos por encima de 1000Hz se requiere al menos unos 10ms para determinar la altura tonal. Por debajo de esa frecuencia, se requiere al menos de seis a nueve ciclos para la determinación de la altura.

El principio de indeterminación acústica extiende la transformada de Fourier de pulsos de corta duración como descriptos por un patrón de ondas de un amplio rango de frecuencias. Idealmente una delta de Dirac, simulado como un impulso muy intenso de corta duración, aproximado por un golpe, no tiene altura tonal perceptible dada la estrecha ventana temporal. Es decir que los sonidos de corta duración no sólo tienen un límite perceptivo dado por el sistema auditivo sino un límite físico dado por la representación en frecuencia de la señal temporal.

El efecto Doppler influye en la percepción de la altura tonal cuando la fuente o el observador están en movimiento, y también influye la temperatura y la humedad a través de la masa molecular alterando la velocidad del sonido, la existencia de viento y fenómenos de refracción sonora.

**Ruido ambiente**

El estudio del ruido se hace sobre una medida en decibeles que simula una adaptación a la sensibilidad auditiva del oído humano por medio de un filtro. Para ello se define tres curvas en la escala de fones como referencia. Como el oído tiene menos sensibilidad a la baja frecuencia, el filtro debe atenuar la baja frecuencia y acentuar aquellas a las que el oído humano es más sensible. Para cada nivel de sonoridad hay una curva diferente. Por ello se propuso, como norma, tomar tres curvas de referencia: la de 40fon o curva A, la de 70fon o curva B, y la de 100fon o curva C. Otra dificultad, no resuelta, es que las curvas están diseñadas para sonidos senoidales puros y los sonidos reales, en especial los ruidos, no son senoidales. De las tres curvas, la que mejor correlación presentó con los daños y respuestas en la industria es la curva A, también con la interferencia a la interpretación del habla.

Los valores de sonoridad en decibeles medidos de acuerdo con estas curvas se llaman “nivel sonoro A, B o C” según corresponda. Simbólicamente suele notarse dB(A), dB(B) y dB(C).

La curva de respuesta del filtro a 40fon o dB(A) es

Y para el filtro C es

Claves espaciales. Localización del sonido

**Emisión sonora**

Una emisión sonora proviene de una vibración de una fuente que, si es puntual y en un medio homogéneo, genera ondas sonoras esféricas que irradian desde la fuente. Muchos cuerpos tienen propiedades elásticas suficientemente definidas de modo que, cuando son apartados de su posición de equilibrio por medio de un desplazamiento inicial o por un golpe, retornan a la posición de equilibrio con un movimiento oscilatorio amortiguado. Este movimiento oscilatorio se transmite al aire en contacto con la superficie del material emitiendo un sonido tonal acorde con la frecuencia más energética de la vibración. Los sólidos vibrantes pueden ser cuerdas, varillas, membranas o placas. Las cuerdas y membranas deben ser mantenidas en tensión para que funcionen como fuente de sonido.

*Cuerdas*

Las cuerdas son sólidos elásticos en los que predomina una dimensión sobre las otras dos, cuyos modos de vibración se omiten y, en general, tienen frecuencias propias muy por encima del rango audible. Los modos de vibración a lo largo de la cuerda pueden ser transversales o longitudinales. En los puntos de sujeción hay nodos, puntos en los que el desplazamiento idealmente nulo. Puede hacerse un análisis de reflexión de los trenes de ondas en los puntos nodales o bien plantear la superposición de una onda virtual en oposición de fase proveniente de una extensión de la cuerda más allá del punto nodal. Además de los nodos de sujeción, hay puntos de vibración nula correspondientes a los modos de vibración o armónicos superiores al fundamental, definido por los nodos de sujeción. El armónico fundamental es el que da la altura tonal del sonido de la cuerda mientas que la proporción de energía de los armónicos superiores caracteriza el timbre.

En la cuerda se producen ondas transversales y longitudinales. En general las longitudinales son mucho más rápidas, asociadas a la compresión local de la cuerda, y producen sonidos de alta frecuencia, a veces dentro del rango audible, que deben ser evitados en la ejecución de instrumentos musicales. Las ondas transversales son más lentas. Las frecuencias propias de vibración responden a

donde es la frecuencia correspondiente al n-ésimo armónico, es la longitud de onda, es la longitud de la cuerda y es la velocidad de propagación de la perturbación en la cuerda. Cuando se define el armónico fundamental y la altura tonal de la cuerda. En los instrumentos musicales de cuerda, se modifica la longitud bien colocando el dedo del instrumentista para generar nodos de sujeción variables, en algunos con varillas para definir nodos predeterminados (guitarra) y en otros sin ellos (violín), por lo que se dispone de un registro continuo de frecuencias permitidas. El punto de percusión o pulsión permite controlar la distribución de energía de los armónicos y, con ello, el timbre del sonido. Si se toca la cuerda en alguno de los puntos nodales correspondientes a los armónicos más bajos, se suprime los armónicos inferiores forzando la vibración a partir del armónico seleccionado.

Marin Mersenne (1588-1648) expuso fenomenológicamente las leyes de las cuerdas vibrantes y Euler (1707-1783) y D’Alembert (1717-1783) establecieron la teoría matemática. La velocidad de propagación de las ondas transversales depende de la tensión de la cuerda y de la densidad longitudinal de masa .

Si se escribe la densidad longitudinal en función de la densidad del material por su sección , queda . Luego

De este modo obtenemos las frecuencias propias de la cuerda. Debe tenerse en cuenta que en general las cuerdas que usan los instrumentos musicales no son homogéneas.

En instrumentos como la guitarra, el laúd, el charango o el arpa las cuerdas son punteadas, es decir, desplazadas de su posición de equilibrio y soltadas para que vibren a partir de una fase inicial de máximo desplazamiento. En otros instrumentos como el piano o el clave, las cuerdas son golpeadas o percutidas por martillos en posiciones fijas. El sonido se apaga progresivamente a medida que se disipa la energía vibrante. En los instrumentos de arco, es la fricción del arco lo que aporta energía de modo continuo y controlado, lo que permite prolongar el sonido a voluntad del instrumentista.

*Tubos*

En los tubos lo que genera el sonido es la columna de aire contenida en el tubo. Los nodos pueden ser de desplazamiento en extremos cerrados, o de presión en extremos abiertos. Pueden tener los dos extremos abiertos o sólo un extremo abierto. La longitud de la columna de aire no depende de la forma del tubo, de modo que pueden ser rectos o curvos. Las diferentes frecuencias principales o alturas tonales se logran por medio de orificios que, al ser tapados o abiertos, se modifica la longitud de la columna de aire vibrante. En tubos abiertos en un extremo y cerrados en el otro sólo están permitidos los armónicos impares de la frecuencia fundamental, y producen sonidos “nasalizados”. En los tubos doblemente abiertos o doblemente cerrados están permitidos todos los armónicos. En los extremos cerrados los nodos están más definidos, pero para que haya emisión de sonido, se requiere al menos un extremo abierto. El nodo es de presión, fija por la atmosférica. Como hay un intercambio de aire con la atmósfera del entorno, no hay bordes bien definidos que delimiten los nodos y la longitud del tubo, mayormente en los tubos de boca ancha.

La fuente de vibración puede estar localizada en cualquier parte del tubo, no necesariamente en un extremo. Puede ser la vibración de una lengüeta, los propios labios del instrumentista o la turbulencia del aire incidente sobre una cuña.

En el *Tubo de Quinke* hay una fuente de perturbación en una abertura y la recepción se ubica en otra abertura deslizable en el otro extremo de dos ramas en que se abre el tubo. Al moverse el receptor o bien modificarse la longitud de una de las ramas, se puede analizar el patrón de interferencia detectándose intensificaciones en los múltiplos de longitud de onda, y atenuaciones en los nodos, en los múltiplos impares de media longitud de onda.

En el *Tubo de Kundt* está formado por dos émbolos fijos en los extremos, uno de ellos vibrante, que genera ondas estacionarias en el interior del tubo. Un material liviano se mueve por la vibración del aire, es desplazado de las crestas de las ondas estacionarias y acumula en los nodos, visualizándose como acumulación del material.

Ya hemos hecho el análisis de ondas estacionarias en tubos. Recordamos la sucesión de modos propios en tubos doblemente abiertos y cerrados. Como la velocidad del sonido vale

En tubos doblemente abiertos (o doblemente cerrados)

Y en tubos abierto en un extremo y cerrado en el otro

Si se toma el valor de 330m/s para la velocidad del sonido a 0ºC, una forma de aproximar la dependencia con la temperatura es

O bien la que presentamos más arriba

Notemos que una variación en la presión atmosférica altera el patrón de frecuencias del instrumento. Si bien es muy leve la incidencia, si se transporta a altitudes diferentes el efecto puede ser notable. La mayor dependencia se da con la temperatura, pero también la humedad influye de modo que un incremento de la humedad del aire disminuye la masa molecular y aumenta la velocidad del sonido.

La longitud no es la del tubo sino la longitud equivalente de la columna de aire vibrante. Si se trata de un tubo cilíndrico doblemente abierto de radio , se puede estimar mientras que si está abierto en un extremo y cerrado en el otro, excitado cerca del extremo abierto, sería .

*Tubos de sección variable*

En un tubo de sección variables dada por , si se asume que el aire es incompresible, válido a las presiones usuales en tubos sonoros, si una masa de aire se desplaza dentro del tubo de una posición a otra , si el espesor de la columna de aire vale , al desplazarse se incrementa en . La presión atmosférica se incrementa a a un lado y a al otro lado de la sección de aire desplazada. La masa de aire contenida en la sección que se desplaza vale . Cuando se aplica un gradiente de presión y se desplaza a la nueva posición, la fuerza neta vale

Aproximando el desplazamiento por un desarrollo en serie, el área queda

La fuerza neta actuante se aproxima por

Aplicando la segunda ley de Newton

Si dividimos por el volumen, es decir, por el área y por el espesor , y tomando el límite para el espesor tendiendo a cero, queda

Si la variación de la sección es suave en comparación con la sección, y el desplazamiento es pequeño, que para valores moderados o suaves de sonido es del orden de algunos micrones, y considerando que en instrumentos musicales e inclusive en bocinas exponenciales, las variaciones son pequeñas en relación con el área, en tales condiciones puede despreciarse el segundo término dentro del paréntesis y escribir

Lo aplicamos ahora a la ecuación de las adiabáticas

Como y .

Si tomamos el límite cuando el espesor del volumen que se desplaza tiende a cero (e queda

Si asumimos nuevamente que es mucho menor que , queda

Y derivando el producto

Esta ecuación combina la presión y el desplazamiento como incógnitas. Si la derivamos dos veces con respecto al tiempo queda

Usando la ecuación (1) reemplazamos la derivada segunda del desplazamiento con respecto al tiempo

Esta es la “ecuación de Webster” o ecuación de la bocina. Si la sección es constante, se reduce a la del tubo cilíndrico recto.

*Varillas*

Las varillas son construidas con materiales sólidos elásticos. Pueden estar fijas en un punto o en más puntos. Si el punto de fijación es central, son simétricas, y si está desplazado con respecto al centro, son asimétricas, pudiendo fijarse en un extremo. Pueden percutirse perpendicularmente al eje de la varilla, con lo que se genera ondas transversales, o frotarse a lo largo generando ondas longitudinales.

En varillas simétricas frotadas en un extremo, se genera un nodo en el punto de sujeción y un patrón de ondas estacionarias dada por , donde es la velocidad de propagación de la vibración longitudinal en la varilla, usualmente muy rápida y dependiente del material de construcción.

Si el punto de sujeción es un extremo, en él habrá un nodo de vibración y en el otro habrá un máximo, de modo que el patrón de ondas será similar al de tubos abierto-cerrado, dado por la expresión . Si el punto de sujeción no coincide con el centro ni con el extremo, genera dos patrones de ondas estacionarias con armónicos impares sobre dos frecuencias fundamentales.

Para montar varillas de modo que vibren en forma transversal, se fija en puntos ubicados a distancias de los extremos. De modo que la longitud fundamental es , lo que da un valor de y . Los sobretonos o parciales no son múltiplos de la frecuencia fundamental .

En varillas fijas por un solo extremo, la frecuencia fundamental es proporcional al espesor e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud. Los parciales superiores también son inarmónicos.

*Diapasón*

Inventado en 1711 por John Shore, en general tiene forma de U. Se trata de dos ramas de una varilla simétrica que vibra transversalmente. La vibración se transmite al mango, una varilla debajo de la U, que transmite las vibraciones en forma de ondas longitudinales. Los sobretonos son inarmónicos pero de muy baja energía de modo que puede considerarse un sonido casi senoidal puro. Se construye de modo que dé una frecuencia deseada, en especial el La4 de 440Hz.

*Membranas y placas*

Las membranas deben estar tensas y las placas pueden tener uno o más puntos de apoyo. Vibran tanto transversal como longitudinalmente y pueden ser percutidas o frotadas. La vibración se propaga sobre la superficie reflejándose de modo complejo en los extremos. Generan un patrón de líneas nodales y de superficies de máxima amplitud de vibración. El patrón de ondas es muy complejo y rico en parciales disonantes. Las leyes fueron enunciadas por Florence Chladni (1756-1827) sobre la base del análisis de patrones nodales en placas vibrantes. Los obtenía esparciendo arena o limaduras sobre placas circulares vibrantes de modo que se depositasen sobre los nodos.

Observó que la frecuencia fundamental es directamente proporcional a la tensión de la membrana, y en membranas y placas es inversamente proporcional a su espesor y al cuadrado del diámetro.

## **Formantes**

Hemos visto que los tubos tienen frecuencias propias de resonancia dependientes de su longitud y de las condiciones de apertura de los extremos. Los recintos tienen frecuencias propias de resonancia en un patrón complejo dependiente de las tres dimensiones espaciales. En recintos rectangulares todavía resulta moderadamente simple el planteo de resonancias y la determinación de los modos propios. Pero en recintos con geometrías más complejas, el patrón de resonancias puede ser imposible de determinar en forma analítica.

Gran parte del análisis se limita a un estudio experimental de respuesta de recintos a una relación entre distribución de potencia de entrada y salida en función de la frecuencia. Los máximos de esta distribución se llaman “formantes” de la cavidad. Si se ingresa ruido blanco como un patrón de distribución de potencia de entrada en todas las frecuencias, lo que puede ser simulado por un golpe, y se observa que la distribución de potencia que se registra como respuesta de la cavidad tiene algunos máximos espectrales, tales máximos determinan los formantes. Son estos máximos los que caracterizan el “sonido propio” o “timbre” de un recinto.

En el caso de los instrumentos de viento, el ruido blanco de entrada es generado por la vibración de una lengüeta, los labios del instrumentista o la turbulencia en un borde biselado. La longitud del tubo determina cuál de los componentes de ruido blanco será reforzado por resonancia dando la altura tonal del sonido que emite. Otros formantes, caracterizados por la forma variable de la sección o por el cono de salida, establecen la sonoridad propia del instrumento.

Cuando una cavidad recibe como entrada una distribución de frecuencias que no es ruido blanco, si las frecuencias que recibe coinciden con algunos de los formantes, serán reforzadas. En caso contrario, serán atenuadas.

Si la cavidad tiene medios de comunicación con el exterior, (orificios) parte de la señal sonora resonante será emitida al exterior con las características de reforzamiento y atenuación propia de la cavidad.

La función de transferencia aplica a cada frecuencia un reforzamiento o atenuación dependiente de las dimensiones y en segundo lugar contiene las propiedades absorbentes de las paredes.

Los formantes no tienen por qué responder a una serie de armónicos ni ser líneas. En general, los formantes tienen un “ancho de banda”, que se define por una caída de con respecto al máximo en la transferencia.

**Voz humana**

La laringe es el órgano fonador. Está compuesto por un esqueleto que contiene cinco cartílagos. La glotis es la separación entre dos pliegues de músculos tiroaritenoideos o cuerdas vocales. Los músculos están recubiertos por capas de epitelio resistentes al contacto que es forzado por la fonación al vibrar. Hay músculos que tensan las cuerdas vocales, otros las acortan y modifican la masa muscular, otros abren la glotis y otros la cierran.

Hay dos mecanismos que colaboran en la emisión sonora. La teoría aerodinámica mioelástica (van den Berg, 1958) propone que antes de la fonación, los pliegues vocales se juntan e impiden el paso de la corriente de aire impulsada desde los pulmones. La presión de aire separa los pliegues. El efecto Bernoulli y la elasticidad tiende a cerrarlos nuevamente. A medida que sale aire desciende la presión subglótica y los pliegues se juntan otra vez. La presión aumenta, los vuelve a separar y se repite el ciclo. La altura tonal depende de la relación entre la presión subglótica y la tensión de las cuerdas vocales. La intensidad de la voz se incrementa con la presión subglótica, la resistencia glótica o cierre de los pliegues, y la velocidad del flujo de aire. La frecuencia se incrementa con la tensión y el alargamiento de los pliegues, y disminuye con el aumento de la masa por unidad de longitud de las cuerdas.

La teoría muco ondulatoria (Perelló, 1962) propone que hay un movimiento ondulatorio continuo y transversal en las cuerdas vocales. El aire escapa en una obturación rítmica de las cuerdas. La intensidad se incrementa con el grado de aducción o cierre de los pliegues y con la presión subglótica. La altura se incrementa con la tensión y adelgazamiento de los pliegues, cuanto menor es la superficie de borde libre en que se produce la apertura y cierre.

En la voz plena o “de pecho” ondulan conjuntamente la parte muscular y la mucosa, mientras que en la voz de “falsete” sólo ondula la mucosa mientras permanece relajado el músculo interno de las cuerdas vocales.

El sonido producido por las cuerdas vocales es muy débil. Se amplifica por resonancia en las cavidades supraglóticas: la laringe, la faringe y la cavidad oral. La forma de estos conductos depende de algunos músculos y articuladores como los labios, la mandíbula y la lengua. La laringe naturalmente sube cuando se tensan las cuerdas vocales para producir sonidos agudos. Una de las primeras consideraciones en el canto es mantener descendida la laringe en todo el registro.

Los formantes dependen de la configuración de las cavidades. Cuanto más cerca esté el tono fundamental, un armónico o parcial de uno de los formantes, más se amplificará internamente e incrementará la emisión a nivel de los labios. Hay cuatro o cinco formantes principales. Los niños y las mujeres tienen un tracto vocal más corto que los hombres, por lo que tienen un formante fundamental más agudo. Para un varón adulto, con un tracto vocal de unos 17cm a 18cm, los cuatro formantes principales se ubican en 500Hz, 1500Hz, 2500Hz y 3500Hz. La frecuencia del primer formante se incrementa a medida que se abre la mandíbula. El segundo formante es muy sensible a la forma y disposición de la lengua. El tercer formante está relacionado con la posición de la punta de la lengua. El cuarto y quinto formante están vinculados a la forma de la base de la laringe. En el canto lírico (cubierto) se desciende y ensancha la parte inferior de la faringe y el ventrículo de la laringe o tubo epilaringeo. Esto robustece el formante en torno a los 2200Hz a 3800Hz conocido como “formante del canto”.

La intensidad del sonido a nivel glótico es de unos 160dB en voces entrenadas a máxima potencia, pero a nivel de los labios alcanza los 130dB. Parte de la potencia es absorbida por las paredes blandas del tracto vocal. Es fundamental la apertura interna de la cavidad para lograr formantes estables y un timbre homogéneo, pero también para reflejar parte de la energía sonora antes de la emisión incrementando la resonancia y la inertancia, y disminuyendo la compliancia. En especial se refuerzan los primeros armónicos aproximando el tracto vocal a un tubo cerrado-cerrado. Al abrir mucho la boca, disminuye la impedancia de emisión, se aproxima a un tubo cerrado (glotis) abierto (boca), disminuye la reflexión interna y la potencia lograda por resonancia, se favorece los armónicos altos y pierde calidad sonora en los tonos fundamentales.

Los sonidos vocálicos son esencialmente glóticos, pero los consonánticos son ruidos generados por turbulencias al articular, aunque algunos (m, n) tienen componente glótica. En ciertos aspectos la cavidad bucal se presenta como un resonador de Helmholtz con un tubo delgado en la laringe y una cavidad en la boca. La forma interna, el volumen y la relación entre la cavidad y el tubo, que también tiene longitud y forma variable, determina los máximos de resonancia y los formantes.

Las vocales del castellano tienen formantes específicos. La “i” tiene un formante principal en torno a los 300Hz, uno secundario en 3000Hz, y otro de menor relevancia en 2200Hz. La letra “e”, un poco más “abierta”, tiene un máximo en 400Hz y dos formantes adicionales en 1700Hz y 2300Hz. La vocal “a” tiene formantes en 800Hz, 1300Hz y uno sensiblemente menor en 2500Hz. Las vocales más cerradas “o” y “u” tienen sólo dos formantes en 500Hz y 800Hz, y en 350Hz y 600Hz respectivamente.

*Reconocimiento del habla*

En primer lugar distinguimos la “fonética” como la forma en que se producen los sonidos del habla y la “fonémica” como el modo en que los sonidos adquieren significado en términos específicos en cada idioma. En todas las lenguas siguen principios similares.

Se producen dos tipos básicos de sonidos: vocálicos y consonánticos. En general los sonidos de apertura del tracto vocal producen vocales mientras que los sonidos de cierre son consonantes. Las aperturas y cierres involucran la garganta, la boca y la nariz.

Las consonantes “sonoras” involucran un cierre del flujo de aire seguido por una vibración de las cuerdas vocales en menos de 30ms tras el cierre (bote). En las consonantes “sordas” el sonido tarda más de 40ms en seguir al cierre (pato). Las consonantes “oclusivas” interrumpen completamente el flujo de aire (te). En las “fricativas” se corta el flujo de aire nasal y se deja salir un pequeño silbido a través de la boca (fricativa). Las “nasales” se producen en la nariz cerrando la boca (nariz).

La oclusión puede formarse en los labios entre sí o contra los dientes incisivos. También puede formarse dentro de la boca con la lengua detrás de los dientes (alveolar, dato), contra el paladar duro (palatal, libro), o contra el velo del paladar (velar, gato).

Las vocales se producen mientras sale aire y vibran las cuerdas vocales. La “i” se produce con la lengua adelantada y elevada, la “e” requiere una posición más retrasada, la “a” con la lengua al centro y a distancia media, la “o” con la lengua baja y retrasada, y la “u” es la más retraída en lo que respecta a la posición de la lengua. La forma de los labios es abierta en la “a”, más recta y cerrada en la “e”, aún más cerrada y con leve elevación de comisuras en la “i”, redondeada en la “o” y además cerrada en la “u”.

La unidad básica de los sonidos del habla es el “fono” y en cada lengua se distinguen ciertos “fonemas”. En términos generales, las lenguas tienen algunas decenas de fonemas. En la articulación del habla muchas veces coexisten posiciones vocales relativas a dos o tres fonemas.

Las frecuencias típicas del habla oscilan entre 300Hz y 700Hz con duraciones de los fonemas del orden de los 200ms a 300ms. Por cada posición bucal se refuerzan algunas frecuencias destacando ciertos formantes en función de cada sonido. En general hay tres o cuatro formantes. El de menor frecuencia, en general con mayor energía, es el primer formante o fo. En general se asocia a la forma de la faringe y ronda los 500Hz. El segundo formante, en torno a los 1500Hz, se produce por la forma de la cavidad oral. El tercer y cuarto formante tiene que ver con resonancias nasales o el entrenamiento del “formante del canto”. Los sonidos artificiales tratan de reproducir el primero y segundo formantes. La identificación de los sonidos vocálicos se logra mediante la relación entre formantes, de modo que no importa el tono fundamental sino la relación con los formantes superiores, en especial el segundo, para identificar la vocal. Las consonantes se identifican por medio de ruidos y transición entre formantes en intervalos menores a 100ms. Las vocales cortas suelen tener transiciones de menos de 50ms y si duran más de 100ms suelen ser diptongos.

Es un problema complejo y no resuelto la discriminación de los sonidos vocálicos y consonánticos en el habla normal. El “área de Wernicke”, en la parte temporal superior izquierda, está especializada en el reconocimiento del habla. El “área de Broca”, en la parte posterior del lóbulo frontal izquierdo, está especializada en la producción del habla.

Bibliografía

-Calvo Manzano A Acústica Físico-Musical. Milán, Real Musical, 1991

-Coren S Ward LM Enns JT Sensación y Percepción (5° Ed) México, McGraw Hill Interamericana, 2001 (Excelente libro sobre el problema de la percepción. Se tomó fisiología de la audición (cap. 6), psicofísica (cap. 2), psicoacústica (cap. 7) y habla y música (cap. 12).

-Elmore WC Heald MA Physics of Waves New York, Mc Graw Hill, 1985 (reedición de 1969) (Excelente texto general sobre ondas. El capítulo 5 dedicado a ondas acústicas. Se tomó el desarrollo de la ecuación de ondas, velocidad del sonido, propagación de ondas planas y esféricas, energía, potencia e intensidad, ondas estacionarias, resonador del Helmholtz, reflexión y refracción, efecto Doppler y ondas de choque)

-Everest FA Pohlmann KC MasterHandbook of Acoustics (Fifth Edition) New York, Mc Graw Hill, 2009. (Muy bueno en especial sobre aspectos técnicos y aplicados, más elemental en relación con fundamentos físicos y formales. Se tomó aspectos cualitativos de efectos relativos a la reflexión, refracción, difusión y absorción de ondas sonoras)

-Facal ML La Voz del Cantante. Buenos Aires, Akadia, 2006

-Miyara F Introducción a la Acústica. Rosario, Apuntes de Cátedra accesibles por Internet (Muy bueno y más que apuntes de cátedra. Se tomó algunos aspectos complementarios a la ecuación de ondas, velocidad del sonido, ondas estacionarias, propagación de ondas planas y en tubos, energía, potencia e intensidad, ecuación de Webster)

-Miyara F Introducción a la Electracústica. Rosario, Apuntes de Cátedra accesibles por Internet (Muy bueno y más que apuntes de cátedra. Se tomó electroacústica o parámetros acústico-eléctricos)

-Miyara F Introducción a la Psicoacústica. Rosario, Apuntes de Cátedra accesibles por Internet (Muy bueno, excelente interpretación de la mecánica de la audición. Complementario en los aspectos físicos de la percepción)

-Sacheri S Ciencia en el Arte del Canto. Buenos Aires, Akadia, 2012

-Sears FW Salinger GL Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística. Barcelona, Reverté, 1978. (Excelente texto sobre termodinámica. Se tomó aspectos generales de la teoría cinética de gases)

Índice

[**Conceptos generales** 1](#_Toc463629445)

[*Sonido – Onda* 1](#_Toc463629446)

[*Fenómenos en ondas* 1](#_Toc463629447)

[*Pulso – Tren de ondas – Onda* 2](#_Toc463629448)

[*Estructura general de un sonido* 3](#_Toc463629449)

[**Planteo y solución de la ecuación de ondas sonoras** 3](#_Toc463629450)

[*Extensión de la Ley de Hooke* 3](#_Toc463629451)

[*Replanteo en gases* 4](#_Toc463629452)

[*Ondas acústicas en fluidos* 5](#_Toc463629453)

[*Solución unidimensional* 9](#_Toc463629454)

[**Impedancia, energía y potencia** **¡Error! Marcador no definido.**](#_Toc463629455)

[*Impedancia* 9](#_Toc463629456)

[*Energía acústica* 13](#_Toc463629457)

[*Potencia sonora* 14](#_Toc463629458)

[*Analogía eléctrica – acústica* 15](#_Toc463629459)

[**Ondas Estacionarias** 23](#_Toc463629460)

[*Ondas estacionarias en un tubo* 25](#_Toc463629461)

[*Tubo cerrado – abierto* **¡Error! Marcador no definido.**](#_Toc463629462)

[*Deducción formal de modos propios* 26](#_Toc463629463)

[*Deducción tubo cerrado – cerrado* 26](#_Toc463629464)

[*Tubo abierto - cerrado* 27](#_Toc463629465)

[*Resonador de Helmholtz* 22](#_Toc463629466)

[**Ondas estacionarias en cajas rectangulares** 28](#_Toc463629467)

[**Ondas esféricas** 30](#_Toc463629468)

[*Impedancia en ondas esféricas* 31](#_Toc463629469)

[**Reflexión y refracción. Difracción** 34](#_Toc463629470)

[*Impedancias de ondas reflejadas y transmitidas* 34](#_Toc463629471)

[*Difracción* 36](#_Toc463629472)

[**Teorema de Fourier. Espectros. Incertidumbre** 40](#_Toc463629473)

[*Descomposición armónica* 23](#_Toc463629474)

[**Efecto Doppler. Ondas de proa y de choque** 40](#_Toc463629475)

[*Ruptura de la barrera del sonido* 42](#_Toc463629476)

[*Ondas de proa* 42](#_Toc463629477)

[*Ondas de choque u onda expansiva* 42](#_Toc463629478)

[*Inertancia o masa acústica* 15](#_Toc463629479)

[*Compliancia* 17](#_Toc463629480)

[*Resistencia acústica* 18](#_Toc463629481)

[*Impedancia* 19](#_Toc463629482)

[**Psicoacústica y psicofísica** 42](#_Toc463629483)

[*Fisiología del oído* 42](#_Toc463629484)

[*Psicofísica* 46](#_Toc463629485)

[*Psicoacústica* 49](#_Toc463629486)

[*Discriminación* **¡Error! Marcador no definido.**](#_Toc463629487)

[*Sonoridad* **¡Error! Marcador no definido.**](#_Toc463629488)

[*Altura total y escalas* **¡Error! Marcador no definido.**](#_Toc463629489)

[*Emisión sonora. Formantes. Resonancia* 66](#_Toc463629490)

**Apéndices**

Relación de Euler.

El desarrollo de la exponencial compleja puede descomponerse en una parte par, que contiene las potencias pares de la unidad imaginaria y coincide con el desarrollo en serie del coseno, mientras que las potencias impares contienen la alternancia de signos de la unidad imaginaria asociada con el desarrollo en serie del seno.

Fuente de la figura en la que se presenta las curvas isofónicas o de Fletcher-Munson. https://www.google.com.ar/search?q=curvas+isofonicas+graficos&tbm=isch&imgil=-\_Vy19JeUgkIdM%253A%253BeUGdKwvPfC6SiM%253Bhttps%25253A%25252F%25252Fwww.bunker-audio.com%25252Fbunker-audio-portal-sonido-documentos.php%25253Fid%2525253D8&source=iu&pf=m&fir=-\_Vy19JeUgkIdM%253A%252CeUGdKwvPfC6SiM%252C\_&usg=\_\_mkJ7XHbCLXJJlG5rovVYRHwX81c%3D&biw=1366&bih=662&ved=0ahUKEwjcmomK-9fVAhUHjZAKHVhqBVYQyjcIVg&ei=ZD2SWdzYDIeawgTY1JWwBQ#imgrc=r4lQSFiOLZuL1M: