<u>CAPITULO XII</u>: FÍSICA ONDULATORIA: ÓPTICA FÍSICA Y ACÚSTICA

Ondas Sonoras:

....

ONDAS SONORAS

I Generalidades

I.a ONDAS (Breve repaso)

En general podemos definir como *onda* a una perturbación que se propaga en el tiempo y en el espacio. Esta perturbación es autónoma y transporta energía e impulso, y no la podemos considerar como ubicada en un lugar determinado. Precisamente ésta es una de sus características, y es por esto que se la acostumbra denominar onda viajera u onda progresiva.
Tenemos muchos ejemplos de ondas entre los más cotidianos podemos mencionar al sonido como onda mecánica, y a la luz, ondas de radio, rayos X, como ondas electromagnéticas. El medio en el cual se desplazan las ondas mecánicas es la materia, y las ondas electromagnéticas el vacío y la materia.
Podemos considerar básicamente dos tipos de onda, las *ondas transversales* que son aquellas en las cuales la perturbación se desplaza en una dirección perpendicular a la de propagación de la onda (ondas en una cuerda), y las *ondas longitudinales* en donde el desplazamiento de la perturbación es en la misma dirección de la propagación.
Si consideramos (por ahora) que las ondas no cambian de forma mientras se desplazan, podemos expresar a estas perturbaciones como una función del espacio y el tiempo, de la forma:

$$\psi = f(x, y, z, t)$$

Como las ondas en un medio isótropo se desplazan en una dirección, podemos “acomodar” el sistema de coordenadas para hacer coincidir el desplazamiento con el eje *x* y de esta forma la representación la podemos hacer como:

$$\psi = f(x, t)$$

Si queremos conocer la forma que adquiere la perturbación en el espacio para un instante dado de tiempo, por ejemplo para $t = 0$, lo obtenemos de la expresión anterior:

$$\psi = f(x, t) = f(x, 0) = f(x)$$

Una característica delas ondas es que su velocidad de propagación es constante mientras el medio sea isótropo y sus condiciones físicas no varíen.
Entonces, al cabo de un tiempo *t* la onda se ha desplazado a lo largo del eje *x* una distancia *vt* siendo ésta la única variación que ha sufrido. Podemos ahora asociar a esta onda en movimiento, un sistema de coordenadas que se mueva junto con la misma, o sea a la misma velocidad *v* de propagación de la onda. De esta forma las coordenadas del nuevo sistema serían *x'* y la función quedaría:

$$\psi = f(x')$$

La función de transformación de un sistema de coordenadas a otro sería entonces:

$$x' = x - vt$$

si reemplazamos en la expresión anterior, tendremos

$$\psi = f(x - vt)$$

Esta expresión es la forma más general de la *función de onda*. Está definida para una dimensión, pero puede ser fácilmente expresada en tres dimensiones. Esta función indica que una función cualquiera $\psi = f(x)$ describe el “perfil” de una onda, y si la misma se desplaza en el sentido positivo del eje *x* con su velocidad de propagación, reemplazamos las variables *x* por *(x-vt)* y obtenemos la función de onda mencionada.

Ecuación diferencial de onda

Jean Le Rond d’Alembert desarrolló en 1747 un trabajo sobre las cuerdas vibrantes, en el cual aparece por primera vez, una ecuación diferencial de segundo orden denominada *ecuación diferencial de onda*.
Resumidamente mencionamos que esta expresión relaciona las derivadas segundas en el espacio con las derivadas segundas en el tiempo:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2}$$

Ésta, llamada también *ecuación de d'Alembert*, describe el comportamiento más general de una onda. Podemos decir que cuando analizamos un fenómeno físico cualquiera, si en dicho anális aparece esta relación de d'Alembert, tenomos asociado a dicho fenómeno, una onda.

Ondas periódicas

Cuando el perfil de una onda onda se repite indefinidamente al cabo de un tiempo τ denominado *período* ó *período temporal*, y de una longitud λ denominada *longitud de onda* ó *período espacial*, se dice que dicha onda es una *onda periódica*. Podemos distinguir, conceptualmente, dos tipos de ondas periódicas, las *ondas armónicas*, y las *ondas anarmónicas*.

Ondas armónicas

Las ondas armónicas son la forma de onda periódica más sencilla, el perfil de la misma es una curva seno (o coseno). Entonces podemos describir el perfil de la misma como:

$$\psi = f(x) = A\,\text{sen}\,kx$$

Como la función seno varía entre –1 y +1, la multiplicamos por un factor *A* denominado *amplitud* de la onda; la función seno opera siempre sobre un ángulo expresado en *radianes* que es una magnitud adimensional, como en nuestro caso está operando sobre *x*, debemos multiplicarlo por una constante de forma tal que el producto sea adimensional, esta constante *k* es denominada *número de onda*, entonces podemos decir que la función seno opera sobre una relación de dos longitudes.
Lo que vamos a hacer ahora es reemplazar la variable *x* por *(x-vt)* para obtener la función de onda.

$$\psi = f(x - vt) = A\,\text{sen}\,k(x - vt) \qquad (1)$$

Esta expresión bastante sencilla, no es de un entendimiento inmediato, es necesario pensarla un poco para ver que nos está diciendo. Si en esta expresión nosotros fijamos el valor de *x* (o sea nos situamos en un punto fijo del eje *x*), podemos observar una variación senoidal de la perturbación en el tiempo. Si fijamos el valor de *t* (o sea le tomamos una "foto" a la función), vamos a observar una variación senoidal de la función en el espacio. Es por esto que a esta función se la suele llamar *ecuación de doble periodicidad*, en el espacio y en el tiempo.
Un ejercicio fácil de efectuar es verificar que esta función es una solución de la ecuación de d'Alembert mencionada más arriba.
Rápidamente podemos verificar que:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

expresada en[rad/m] ó [1/m]. La velocidad de propagación está dada por la relación entre el período espacial y el período temporal:

$$v = \frac{\lambda}{\tau}$$

expresada en [m/s].
Definimos como *frecuencia* ó *frecuencia temporal* a la inversa del período temporal

$$f = \frac{1}{\tau}$$

representa el número de períodos por unidad de tiempo, expresado en [1/s] y denominado en nuestro Sistema de Unidades [Hertz].
Por *velocidad angular* (ocasionalmente también llamado *frecuencia temporal angular*) definimos:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{\tau}$$

expresado en [rad/seg].
Reemplazando estas expresiones en (1) podemos obtener varias formas de representar la misma. Las dos formas más comunes de esta expresión son la (1) y la siguiente:

$$\psi = A\,\text{sen}\,(kx - \omega\, t)$$

Ondas anarmónicas

Como su nombre lo indica, las ondas anarmónicas son todas aquellas ondas periódicas que no son armónicas, o sea de forma senoidal. Entonces efectuar la representación matemática de una onda anarmónica podría ser un tema bastante complejo si no fuera por una importantísima herramienta matemática desarrollada un físico, el Barón de Fourier, ésta es el *Teorema de Fourier*. Básicamente el teorema de Fourier demuestra que una función anarmónica cualquiera se puede definir mediante una suma términos de funciones armónicas. para ello en la función original del perfil de la onda:

$$\psi = f(x)$$

expresamos a *f(x)* como una suma de términos armónicos de la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} A_m \cos mkx + \sum_{m=1}^{\infty} B_m \operatorname{sen} mkx$$

[no olvidemos que para transformar la expresión en una función de onda, luego hay que reemplazar *x* por *(x-vt)*]. O sea tenemos una serie infinita de términos desde m=1 hasta infinito.
Esta serie puede tener varias simplificaciones.

a) Si la función es par ($f(-x) = f(x)$), o sea es simétrica alrededor de $x=0$ la serie tendrá solamente términos coseno.

b) Si la función es impar ($f(-x) = -f(x)$), o sea es antisimétrica alrededor de $x=0$ la serie tendrá solamente términos seno.

c) En general, con el cálculo de 3 a 5 términos (los coeficientes A_m ó B_m), es suficiente.

Cuando obtenemos la funcion de onda:

$$\psi = f(x-vt) = A_0/2 + A_1 \cos k(x-vt) + A_2 \cos 2k(x-vt) + \ldots + A_m \cos mk(x-vt) + B_1 \operatorname{sen} k(x-vt) + B_2 \operatorname{sen} 2k(x-vt) + \ldots + B_m \operatorname{sen} mk(x-vt)$$

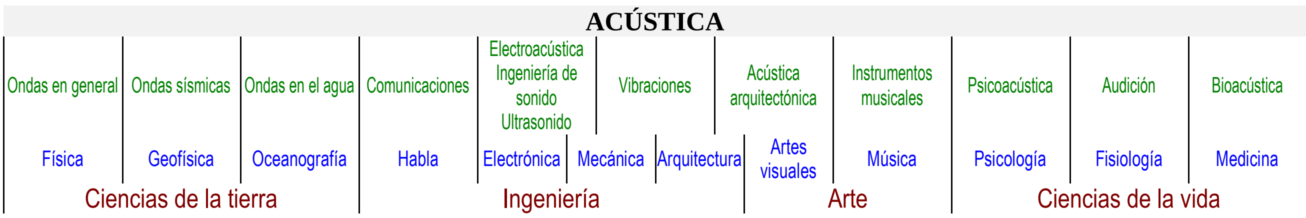
o, expresada de otra forma:

$$\psi = f(x-vt) = A_0/2 + A_1 \cos (kx-\omega t) + A_2 \cos (2kx-2\omega t) + \ldots + A_m \cos (mkx-m\omega t) + B_1 \operatorname{sen} (kx-\omega t) + B_2 \operatorname{sen} (2kx-2\omega t) + \ldots + B_m \operatorname{sen} (mkx-m\omega t)$$

podemos darnos cuenta fácilmente que esta serie incluye términos en donde la frecuencia *mf* (recordar que $\omega = 2\pi f$) es proporcional en números enteros a *f* . Éstas se denominan armónicas de *f* .

I.b ACÚSTICA

Acústica es la ciencia que estudia la producción, transmisión y percepción de las ondas sonoras. Debido a la gran diversidad de situaciones en las cuales el sonido cobra un aspecto fundamental, la acústica posee muchas áreas en donde su estudio cobra importancia, como por ejemplo la voz, la música, grabación y reproducción de sonido, audioelectrónica, telefonía, radiotelefonía, fonoaudiología, generación y control de ruido, acústica arquitectónica, acústica submarina, aplicaciones tecnológicas médicas y militares, y sigue la cuenta. A continuación las describimos en un gráfico muy general.



I.c ONDAS SONORAS

Las *ondas sonoras* u *ondas acústicas* son ondas mecánicas longitudinales (también denominadas *ondas elásticas*) que se distribuyen en la materia (sólida, líquida o gaseosa) en las tres dimensiones. No obstante podemos tomar en el espacio una dirección desde la fuente de origen y analizarlas como ondas unidimensionales.
La expresión ondas sonoras se debe a que parte de ellas –las que están comprendidas en un espectro de frecuencias que va desde los 20 Hz a los 20.000 Hz- pueden ser escuchadas por el oído humano, y constituyen lo que se llama *sonido*, o *intervalo audible* de las ondas sonoras. Las ondas sonoras que tienen frecuencias por debajo del intervalo audible se denominan *ondas infrasónicas* o *infrasonido*. Las ondas sonoras que tienen frecuencias por encima del intervalo audible se denominan *ondas ultrasónicas* o *ultrasonido*.
La manifestación de las ondas sonoras en medios fluídos se produce a partir del movimiento de las moléculas de dicho medio, hacia uno y otro lado en la dirección de propagación de la onda. Este movimiento molecular es muy pequeño, y va produciendo regiones de compresión y rarefacción por lo que las ondas longitudinales se van manifestando como pequeños cambios de presión en el fluído considerado. Para tener una idea de lo que representa este movimiento molecular, podemos decir que para una onda de 1 000 Hz, la máxima amplitud de variación de presión que tolera el oído es de unos 30 Pa (tengamos en cuenta que la presión atmosférica está en el orden de los 100 000 Pa), esta amplitud de presión equivale a un desplazamiento de las moléculas del aire de alrededor de 10^{-5} m (una centésima de milímetro); mientras que la variación de presión más débil que puede escuchar el oído humano, está en los 3.10^{-5} Pa, que equivale a una amplitud de desplazamiento que se encuentra aproximadamente en 10^{-11} m; si lo comparamos con el diámetro medio de una molécula de gas que está en el orden de los 10^{-10} m, nos daremos cuenta de la increíble sensibilidad del oído. Estos pequeños movimientos de vaivén molecular que se producen alrededor de su posición de equilibrio

muestran que lo que se propaga no es materia sino información expresada como pequeños cambios de presión que se producen en la dirección de propagación y que está representado por la onda sonora.
Cuando se estudia a nivel fisiológico los efectos del sonido se utilizan términos como fuerza, tono y timbre; como estos términos describen sensaciones, o sea representan magnitudes sensoriales, tienen valores subjetivos y por lo tanto varían de persona a persona. Desde el punto de vista físico resulta necesario trabajar con valores medibles y objetivos, por lo tanto se intenta correlacionar las sensaciones sonoras con valores objetivos. La correlación establecida:

Efectos sensoriales		Propiedad Física
Volumen	⇨	Intensidad
Tono	⇨	Frecuencia
Timbre	⇨	Forma de la onda

Desde el punto de vista de la física nosotros debemos trabajar con magnitudes objetivas y medibles. Lo que vamos a hacer, entonces, es relacionar las propiedades sensoriales señaladas con propiedades físicas, a fin de poder cuantificar, comparar y trabajar metódicamente con estas magnitudes.
Entonces cuando trabajemos con la propiedad sensorial intensidad acústica, desde el punto de vista físico nos vamos a referir a la intensidad del sonido. Cuando trabajemos con el tono nos referiremos a la frecuencia del sonido. Cuando trabajemos con el timbre nos vamos a referir a la forma de la onda o, lo que es lo mismo, a su contenido espectral o de armónicas, establecida a través de la serie de Fourier.
De todas maneras, si bien vamos a efectuar el análisis físico del sonido con valores objetivos, también vamos a buscar establecer unidades que nos permitan cuantificar de algunar forma estas sensaciones sonoras. Esto lo veremos más adelante cuando estudiemos el concepto de *sonoridad*.

I.d VELOCIDAD DE LAS ONDAS SONORAS

En las ondas mecánicas, la velocidad de propagación es función de las propiedades elásticas e inerciales.del medio. Las ondas sonoras, como son ondas longitudinales, la propiedad elástica está descripta en cómo responde el medio a los cambios de presión, y esta respuesta en el caso de los fluídos gaseosos se produce con una variación de volumen. Como estas variaciones de presión y de volumen se producen “demasiado rápido” en relación a la conductividad térmica de los gases, podemos decir que no se producen transferencias de calor en estas variaciones de presión, entonces consideramos a todo este proceso como adiabático.
La velocidad de propagación de las ondas sonoras en un fluído la podemos entonces expresar como:

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

en donde B es el *módulo de compresibilidad adiabática* del fluído, y expresa las propiedades elásticas del medio, ρ es la densidad en equilibrio del medio y expresa sus propiedades inerciales. El módulo de compresibilidad adiabática del medio se expresa como:

$$B = -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta V}{V}}$$

en donde ΔP indica la variación de presión y ΔV la de volumen; el signo menos aparece para que B sea positivo ya que a un aumento de presión corresponde una disminución de volumen.
En un fluído gaseoso el módulo de compresibilidad B es proporcional a la presión, la presión es proporcional a la densidad ρ y a su *temperatura absoluta* T [ªK] ; entonces el cociente B/ρ es independiente de la densidad y es proporcional a la temperatura T. Si denominamos como c_0 a la velocidad de propagación en un gas a 0 ºC, podemos expresar la velocidad a una temperatura cualquiera, como

$$c = c_0\sqrt{\frac{T}{273}}$$

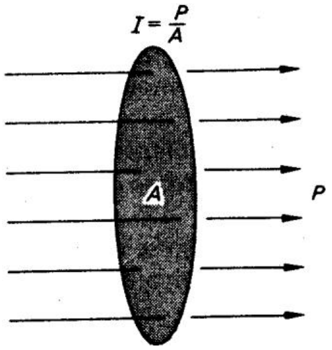
A continuación detallaremos los valores de la velocidad de propagación de las ondas sonoras en diferentes medios:

Medio	fase	temperatura t [ºC]	velocidad c [m/s]
Aire	gas	0	331
Aire	gas	20	343
Helio	gas	0	965
Hidrógeno	gas	0	1270
Oxígeno	gas	0	317
Vapor de agua	gas	100	405
Agua	líquido	0	1402

Agua	líquido	20	1482
Agua de mar	líquido	13	1500
Aluminio	sólido		6300
Acero	sólido		6100
Vidrio (Pyrex)	sólido		5600
Hielo	sólido		3200
Corcho	sólido		500

II Energía transportada por las ondas

Como dijimos antes, podemos ver a las ondas sonoras como un flujo de energía a través de la materia. Este flujo de energía lo vamos a expresar a través de la *intensidad* de las ondas sonoras. La intensidad de una onda sonora la definimos como la energía *promedio* transportada por unidad de tiempo, a través de una superficie unitaria perpendicular a la dirección de propagación de la onda; en otras palabras, como la potencia transmitida por unidad de área.



Entonces la unidad de medida de la intensidad I es $[W/m^2]$.
Históricamente, en la industria aplicada y entre los expertos en acústica se usa como unidad de medición de la intensidad sonora el $[W/cm^2]$. Si bien debemos desalentar el uso de esta unidad, no por ello debemos dejar de estar familiarizados con ella, teniendo en cuenta que

$$1\frac{W}{m^2} = 10^{-4}\ \frac{W}{cm^2}$$

Sin desarrollar la deducción de la expresión, podemos escribir la ecuación que relaciona la intensidad sonora con la variación de presión:

$$I = \frac{P^2}{2\rho\, c}$$

Donde P es la variación de presión, ρ la densidad del aire, y c la velocidad de propagación de las ondas sonoras en el aire. Podemos darnos una idea de las intensidades sonoras si calculamos las mismas para los valores extremos que puede escuchar el oído humano. El sonido más débil audible supone una variación de presión de 30 μPa dijimos, si tomamos la densidad del aire a presión atmosférica normal como ρ = 1,22 Kg/m^3 , y la velocidad de propagación del sonido como c = 343 m/s, tendremos una intensidad sonora de aproximadamente $1{,}07.10^{-12}$ W/m^2. Para una variación de presión de 30 Pa (umbral de dolor) y con los mismos valores de ρ y c la intensidad sonora será aproximadamente 1,07 W/m^2.

III Niveles de intensidad: el decibel

Si repasamos lo descripto más arriba, nos vamos a dar cuenta de la enorme capacidad del oído humano. El mismo puede detectar una variación de presión mínima de 3.10^{-5} Pa equivalente a una intensidad de 10^{-12} W/m^2, hasta una variación máxima de 30 Pa (≈ 1 W/m^2) sin llegar al peligro de daño del mismo. Estamos diciendo que el oído ¡puede captar intensidades sonoras que cubren 12 órdenes de magnitud! Asimismo los humanos analizan la sonoridad relativa de dos sonidos por la relación entre sus intensidades. Entonces, para poder expresar las intensidades (magnitud objetiva) con los valores subjetivos que escucha el oído, aparece la necesidad de utilizar una escala logarítmica. Entiéndase, nosotros vamos a utilizar una escala que se adapte a los valores subjetivos que escucha el oído, por las razones mencionadas hacemos a esta escala logarítmica, y por supuesto nos resulta cómodo que sea de base 10.
Originalmente se estableció que cuando la intensidad I_1 de un sonido es 10 veces mayor que la intensidad I_2 de otro, su relación de intensidades era de 1 bel (B)

$$B = \log\frac{I_1}{I_2} \qquad \text{(beles) } [B]$$

El uso práctico de esta unidad demostró que era muy grande, por lo que se estandarizó el uso de un submúltiplo 10 veces más pequeño, el *decibel* (*dB*). O sea que el valor en decibeles es el valor en beles multiplicado por 10.
De esta manera, definimos el *nivel de intensidad sonora* de un sonido como:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad [dB] \text{ (decibeles)}$$

Donde *log* es logaritmo en base 10 e I_0 es una intensidad de referencia. Esta intensidad de referencia es aproximadamente el sonido más débil audible, $I_0 = 1\ pW/m^2$.
De igual manera podemos definir el *nivel de potencia sonora* tomando como potencia de referencia $P_0 = 1\ pW$:

$$L_W = 10 \log \frac{P}{P_0} \qquad [dB] \text{ (decibeles)}$$

Y también el *nivel de presión sonora*, cuya presión de referencia es entonces 20 μPa

$$L_P = 20 \log \frac{p}{p_0} \qquad [dB] \text{ (decibeles)}$$

En esta expresión nos damos cuenta que como la relación de potencias es el cuadrado de la relación de presiones, el logaritmo aparece multiplicado por 20.
A continuación vamos a expresar en una tabla, valores típicos de ruido de diverso origen y su respuesta humana:

Descripción del ruido	**Presión sonora [*Pa*]**	**Intensidad sonora [W/m^2]**	**Nivel de intensidad [*dB*]**	**Efecto**
Zona de lanzamiento de cohetes	$29.\ 10^3$	10^6	**180**	Pérdida auditiva irreversible
Sirena antiaérea Operación de jets en pista	290	10^2	**140**	Dolorosamente fuerte
Prensa hidráulica a 1 m Trueno cercano	91	10	**130**	
Despegue de jets (60 m) Máximo esfuerzo vocal	29	1	**120**	Umbral de molestia
Bocina de coche a 1 m Martillo neumático	9,1	10^{-1}	**110**	Extremadamente fuerte
Camión recolector Petardos	2,9	10^{-2}	**100**	Muy fuerte
Dentro del subterráneo	1,62	$3,2.10^{-3}$	**95**	
Interior del Boeing 737 Tránsito urbano	$910.\ 10^{-3}$	10^{-3}	**90**	Muy molesto
Coche chico a 6 m Secador de cabello	$290.\ 10^{-3}$	10^{-4}	**80**	Molesto
Tránsito normal a 30 m	$91.\ 10^{-3}$	10^{-5}	**70**	Difícil uso del teléfono
Conversación a 1 m	$52.\ 10^{-3}$	$3,2.\ 10^{-6}$	**65**	
Aire acondicionado	$29.\ 10^{-3}$	10^{-6}	**60**	Intrusivo
Coche silencioso	$9,1.\ 10^{-3}$	10^{-7}	**50**	Silencio
Radio con volumen bajo	$2,9.\ 10^{-3}$	10^{-8}	**40**	
Biblioteca Susurro a 5 m	$910.\ 10^{-6}$	10^{-9}	**30**	Muy silencioso
Murmullo	$290.\ 10^{-6}$	10^{-10}	**20**	
Hojas apenas movidas por brisa	$91.\ 10^{-6}$	10^{-11}	**10**	Apenas audible
	$29.\ 10^{-6}$	10^{-12}	**0**	Umbral de audición

IV Campo de audición

Sin entrar a considerar al oído humano, podemos decir que el oído es básicamente un *transductor*, transforma una magnitud física como es la presión sonora, en impulsos eléctricos que son transmitidos por los nervios al cerebro. Éste interpreta y elabora la sensación subjetiva de sonido.
El análisis y el estudio de magnitudes que tienen que ver con el oído, al actuar mecanismos fisiológicos y psicológicos que subjetivan las sensaciones, se hace necesario realizarlo a través de numerosas mediciones y preguntas realizadas a cientos de personas. Para poder establecer valores comparativos se definen algunas unidades que mencionaremos en

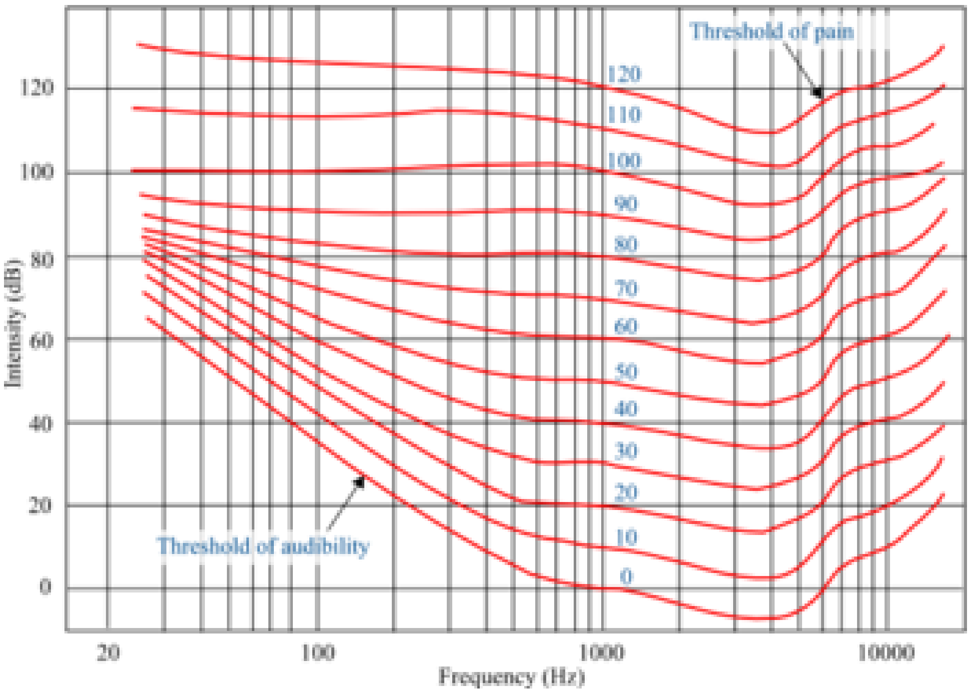
este punto y que debemos tener en claro que no son producto de mediciones científicas, sino resultados estadísticos que con determinados procedimientos se han estandarizado.

Umbrales auditivos

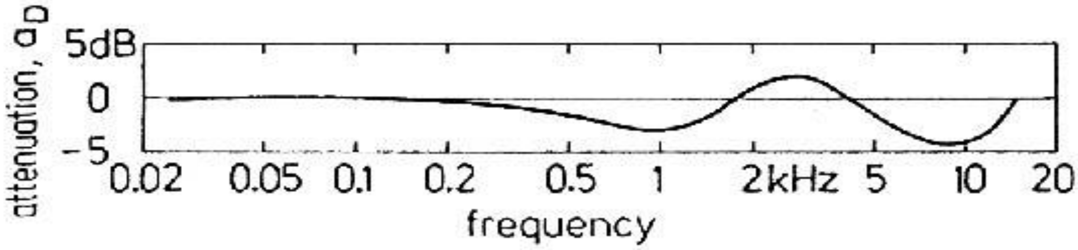
Hay una característica que es necesario mencionar en primer lugar y es el *umbral de audibilidad*. Éste es el nivel de presión sonora mínimo que puede detectar una persona a diferentes frecuencias. Este umbral varía de persona a persona, y en una misma persona varía con la edad. Se puede decir también que este umbral es muy sensible a la contaminación auditiva del medio en el cual se encuentre la persona, particularmente si esta contaminación tiene niveles de intensidad elevados.
Luego tenemos en el otro extremo del campo auditivo (alrededor de los 120 dB) el *umbral de molestia*, históricamente denominado umbral de dolor. A este nivel se produce una sensación de cosquilleo y es poco dependiente de la frecuencia. En alguna bibliografía se lo denomina también *umbral de sensación*.
Si los niveles de intensidad aumentan, este cosquilleo se convierte en dolor; al llegar a los 140 dB (*umbral de daño*) se producen daños permanentes en el oído, aún con exposiciones cortas a estos niveles de intensidad.

Curvas de igual nivel de sonoridad

Mientras la intensidad y el nivel de intensidad sonora son valores objetivos que se miden y cuantifican con instrumental apropiado, la *sonoridad* y el *nivel de sonoridad* son valores subjetivos que se establecen experimentalmente ya que el oído no tiene la misma sensibilidad para todas las frecuencias.
Las curvas de igual nivel de sonoridad se establecen experimentalmente haciendo escuchar a voluntarios, tonos de distintas frecuencias en forma alternada, hasta que al voluntario le parece de la misma sonoridad. En estas pruebas se manifiesta que los tonos de bajas y altas frecuencias, requieren de una mayor intensidad para tener la misma sonoridad que los tonos de las frecuencias medias. Partiendo de la sonoridad de referencia para 1000 Hz establecemo la curva de igual nivel de sonoridad hacia las frecuencias inferiores y superiores, para una dada intensidad sonora de referencia a 1000 Hz. Sucesivamente vamos construyendo diferentes curvas para diferentes intensidades sonoras de referencia. Cada curva se denomina *curva de igual nivel de sonoridad* y esta curva indica el *nivel de sonoridad* que lo expresamos en una unidad denominada *fon*. El valor de la curva en *fones* equivale al valor del nivel de intensidad en dB para la frecuencia de referencia de 1000 Hz. Las curvas de este tipo más utilizadas históricamente fueron las obtenidas por *Fletcher y Munson* en estados Unidos allá por el año 1930. Estas curvas fueron posteriormente corregidas por *Robinson y Dadson* en Inglaterra, siendo estas últimas las adoptadas internacionalmente en la actualidad. A continuación, representamos dichas curvas:
Por favor analicen detenidamente dos o tres de las mismas.



El oído no es sensible por igual a sonidos que provienen de diferentes direcciones. Además, esta variación de sensibilidad también depende de la frecuencia. Las curvas representadas fueron elaboradas y son válidas para el *campo sonoro directo* (cámara anecoica, auriculares), pero no para el *campo difuso* (situación cotidiana, el sonido proviene de todas las direcciones posibles). Presentamos a continuación una curva que nos dá la corrección necesaria para que una onda armónica tenga igual intensidad tanto en el campo directo como el difuso.



Las curvas de igual nivel de sonoridad nos muestran que la reproducción sonora es fuertemente dependiente del volumen del sonido. Si disminuímos el nivel del sonido, las frecuencias graves y agudas caen más rápidamente en nuestra sensación subjetiva. Es por eso que algunos sistemas de audio poseen un "control de sonoridad" denominado tambien "loudness"..

Sonoridad y Nivel de sonoridad

La norma IRAM 4066 define a la *sonoridad* como "atributo de la sensación auditiva, según la cual los sonidos pueden ser ordenados en una escala que se extiende desde suaves a fuertes.
Si nosotros tomamos dos sonidos diferentes que tengan el mismo *nivel de sonoridad* (L_N) expresado en *fones*, estos sonidos se consideran de igual sonoridad, pero esto no quiere decir que si los escuchamos en forma simultánea, la sensación subjetiva llamada *sonoridad (N)* sea proporcional al nivel de sonoridad. Un sonido de 80 fones no suena el doble de fuerte que uno de 40 fones. La sonoridad se duplica por cada aumento en el nivel de sonoridad de aproximadamente 9 fones (10 fones según la norma IRAM 4064). Esto es fácilmente entendible ya que la medición del nivel de sonoridad en fones proviene de la medición del nivel de intensidad en dB que sigue una escala logarítmica.
La unidad de sonoridad es el *son* y se define al mismo como *la sonoridad de un sonido cuyo nivel de sonoridad es de 40 fones*. Esta unidad está mejor correlacionada con la sensación subjetiva de sonoridad, y su procedimiento de medición está normalizado en la normas ISO e IRAM. Si nosotros tenemos una sonoridad de, por ejemplo 12 sones, ésta tiene el doble de sonoridad que una de 6 sones y el triple de sonoridad que una de 4 sones.
Existen varias fórmulas empíricas que relacionan a los fones con los sones. Nosotros podemos tomar la que figura en la norma IRAM 4064:

$$N = 2^{0,1(L_N - 40)}$$

siendo N la sonoridad expresada en sones, y L_H el nivel de sonoridad expresado en fones. Otra forma de expresar esta relación aproximada es:

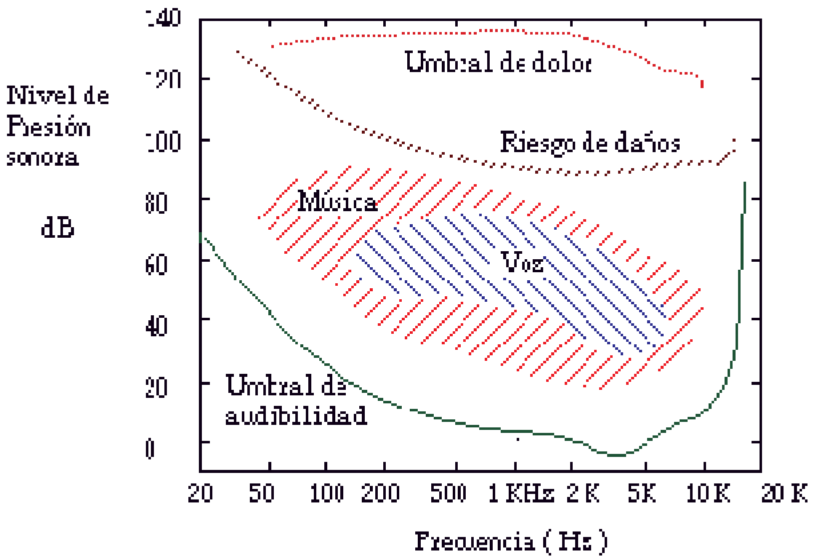
$$\log N = 0,03(L_N - 40)$$

La misma norma ofrece una tabla que relaciona fones y sones:

fones	sones	fones	sones
40	1	75	11,3
45	1,41	80	16
50	2	85	22,6
55	2,83	90	32
60	4	95	45,3
65	5,66	100	64
70	8	105	90,5

Area de audición

Los oídos de los seres vivos están diseñados para detectar solamente una proción de sonidos que se encuentren dentro de una determinada franja de intensidades y frecuencias. En el caso del oído de los seres humanos se adopta como convención que el rango de frecuencias posibles de detectar va desde los 20 Hz hasta los 20 KHz, mientras que su sensibilidad a las diferentes intensidades es de definición algo más compleja ya que la misma no es independiente de la frecuencia. Para el análisis de esta sensibilidad se define el *rango dinámico* del oído, que es la relación entre la máxima intensidad que el oído puede manejar, y la mínima que puede detectar. En el siguiente gráfico se detallan todos estos valores correlacionados para el oído humano.



El *umbral de dolor* marca las presiones sonoras máximas instantáneas que el oído puede soportar sin daño. *Riesgo de daños* es la línea que indica el límite de presión sonora que no debe sobrepasarse más de un cierto período de tiempo (normalmente establecido en ocho horas por jornada de trabajo). El *umbral de audibilidad* indica la sensibilidad del oído a las intensidades sonoras en sus diferentes frecuencias. Esta sensibilidad va disminuyendo con la edad, particularmente en las zonas de las altas frecuencias.

Enmascaramiento sonoro

El enmascaramiento sonoro consiste en el fenómeno por el cual el umbral de audibilidad correspondiente a un determinado sonido, se eleva debido a la presencia de otro sonido. Expliquémoslo con un ejemplo, si nos encontramos dentro de un vehículo estacionado y estamos escuchando un programa periodístico en la radio, al mismo lo escuchamos con cierto volumen; si ponemos en marcha el vehículo y conducimos por una ruta a velocidad relativamente alta, no vamos a escuchar y entender las voces de los periodistas pues las mismas quedaron enmascaradas por el ruido del motor y el viento, tendremos entonces que subir el volumen de la radio para poder seguir escuchando. Este fenómeno está ligado con la inteligibilidad de la señal acústica que percibimos; se establece que para tener una buena inteligibilidad (esto es, recuperar la mayor parte de la información acústica recibida) la relación de intensidades entre la señal acústica y el ruido ambiental o de fondo debe ser no menor a 12 dB. Analicemos otra situación, el rango dinámico musical de una orquesta sinfónica está en el orden de los 100 dB, el de una banda de rock o de pop en el orden de los 70 dB; si consideramos que el ruido ambiental en una discoteca concurrida tiene un nivel de intensidad de alrededor de 90 dB y sabemos que el umbral de dolor está en 120 dB, el rango dinámico máximo sin enmascaramiento que disponemos es de 30 dB (120 dB – 90 dB) entonces perdemos mucha información acústica ya que quedaría un rango de 40 dB (70 dB – 30 dB) enmascarada por el ruido ambiental. Para disminuir este efecto se suele colocar en los sistemas de audio un *compresor de audio* que disminuya el rango dinámico de la música y se evite perder tanta información.

Efecto Haas

Se denomina *efecto Haas* a un fenómeno psicoacústico que consiste en la fusión de los sonidos que llegan al oído en un lapso de tiempo de hasta 50 ms y la dirección percibida del sonido es la que proviene del sonido inicial. Este efecto es aprovechado en instalaciones sonoras de gran extensión como por ejemplo el Estadio Córdoba; el mismo posee una sistema de parlantes centrales ubicados encima del Cartel Electrónico que emiten sonido hacia todas las direcciones del estadio. Existen además otros sistemas de parlantes de refuerzo ubicados debajo del techo de la platea cubierta; el sonido que sale de estos últimos está retrasado electrónicamente respecto del que llega de los parlantes centrales (retraso menor a 50 ms). De esta forma, cuando nuestros oídos captan la suma de sonidos de todos los parlantes, “identifican” como origen del mismo al sistema de parlantes centrales y no se percatan de la existencia de los parlantes auxiliares.

Fatiga, daño, adaptación

Todos los sistemas sensitivos orgánicos desminuyen su respuesta si son sometidos a estímulos suficientemente largos e intensos. a continuación enumeraremos algunos de las consecuencias más comunes debidas a estímulos intensos.

Fatiga

La fatiga auditiva es consecuencia de la exposición a un estímulo que excede ampliamente lo necesario para obtener una respuesta psicológica normal del sistema. Se mide luego de retirar el estímulo. Lo que se produce es un desplazamiento temporal del umbral que puede provocar una pérdida temporal de la audición. Esto se puede observar cuando se sale de un sitio ruidoso, la persona queda momentáneamente ensordecida hasta que al cabo de un tiempo recupera su sensibilidad normal. Fisiológicamente se explica como una *fatiga* de las células ciliares, que necesitan reponerse químicamente para volver a su estado natural. A este fenómeno también se lo denomina *pérdida temporal de la audición*.

Daño

La exposición a estímulos con magnitudes excesivas pueden producir daños permanentes en nuestro sistema auditivo. Existe una relación entre la intensidad que podemos soportar y el tiempo al cual estemos expuestos a esa intensidad. Es seguro estar expuesto a niveles de intensidad de 90 dB durante 8 horas al día. Pero si se duplica la intensidad (aumento de 3 dB) se debe llevar a la mitad el tiempo permitido de exposición. La siguiente tabla indica los valores máximos de exposición admitidos en Europa, Canadá y Rusia; nótese que por cada incremento de 3 dB, el tiempo de exposición se debe reducir a la mitad.

Nivel de intensidad [*dB*]	Tiempo máximo de exposición [*horas*]
87	16
90	8
93	4
96	2
99	1
102	0,5

En consecuencia, niveles de presión sonora mayores a 105 dB pueden producir daños permanentes muy rápidamente. Experimentos han mostrado que existen evidencias que los sonidos "agradables" (por ejemplo, música) producen daños menos permanentes o que se necesitan mayores niveles de presión para producir el daño que cuando los sonidos no son "agradables" (por ejemplo, algún tipo de ruido).

Adaptación

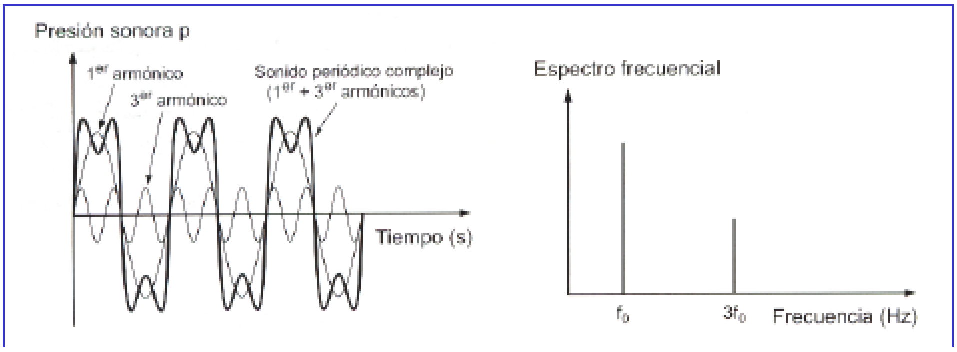
La adaptación auditiva tiene que ver con la disminución de la respuesta del sistema ante un estímulo de carácter estacionario. Esta alcanzaría finalmente también un valor estacionario. Por ejemplo, la sonoridad de un sonido estacionario disminuye a medida que transcurre el tiempo. (De hecho el estímulo puede dejar de percibirse.)
La adaptación parece producirse reducidamente para sonidos con niveles de intensidad altos (50 - 90 dB) y aparece más claramente en sonidos de altas frecuencias. No obstante, existen diferencias significativas en los resultados obtenidos en los experimentos con diversos sujetos, como para extraer conclusiones definitivas.

V Espectro Sonoro

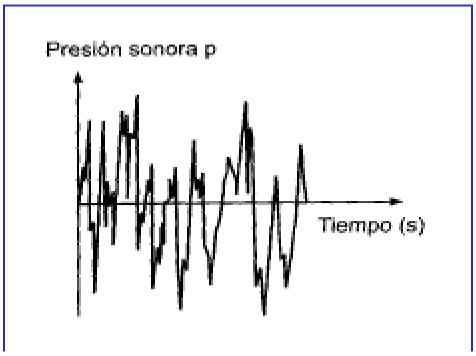
I.d Espectro de las Ondas Sonoras. Sonido

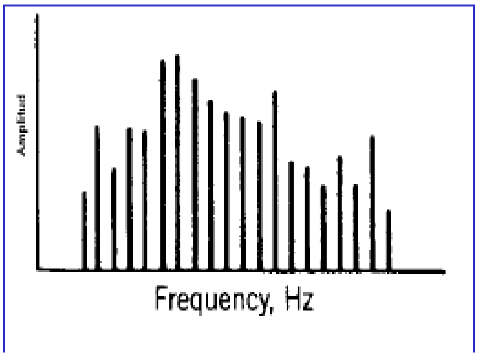
Como hemos dicho, a las ondas sonoras en las definimos como onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico. Ésta es una definición general, que no tiene restricciones de frecuencia.
Nos interesan particularmente aquellas ondas sonoras que excitan al sentido del oído humano. Estas ondas son las que se encuentran en el rango de los 20 Hz a los 20 000 Hz; este rango recibe particularmente el nombre de *sonido* o *intervalo audible*. Si bien el intervalo audible varía en las diferentes personas, y muy particularmente con la edad (a cierta edad comienza a “recortarse” el intervalo tanto en las bajas como en las altas frecuencias) ya se ha adoptado como norma este intervalo.
El intervalo audible podemos a su vez, subdividirlo en función de los *tonos* de la señal. Tenemos entonces los tonos *graves* que corresponden a las *frecuencias bajas* que van desde los 16 Hz a los 256 Hz. Tenemos los tonos *medios* correspondientes a las frecuencias medias que van desde los 256 Hz a los 2 KHz. Tenemos los tonos *agudos* correspondientes a las frecuencias agudas que van desde los 2 KHz a los 16 KHz.
Musicalmente, al intervalo audible se lo divide en *octavas*, este nombre aparece de la escala musical y representa el intervalo de frecuencias cuyos valores tienen relación 1:2; por ejemplo en los tonos graves tenemos 4 octavas, la que va desde 16 a 32 Hz, la octava de 32 a 64 Hz, de 64 a 128 Hz y la de 128 a 256 Hz. Igualmente para los tonos medios tenemos las octavas quinta, sexta y séptima. Para los agudos las octavas octava, novena y décima.
En cada octava tenemos ocho notas de la escala musical: Do, Re, Mi, Fa, Sol, La, Si, Do.
Las ondas sonoras que se encuentran por debajo de los 20 Hz se denominan *ondas infrasónicas* o *infrasonido*.
Las ondas sonoras que se encuentran por encima de los 20 000 Hz se denominan *ondas ultrasónicas* o *ultrasonido*.
Hemos visto que una onda periódica cualquiera puede descomponerse (teorema de Fourier) en una serie de ondas sinusoidales (armónicas) de frecuencias que son múltiplos enteros de la fundamental. Estas ondas se denominan *armónicos* del tono fundamental. Si nosotros representamos en un gráfico los valores de las frecuencias de los diferentes armónicos en el eje de las abcisas, y la amplitud de las mismas en ordenadas, y en este mismo gráfico

indicamos estos valores para cada una de las componentes de la serie de Fourier, estamos representando el *espectro sonoro* de esta onda periódica.

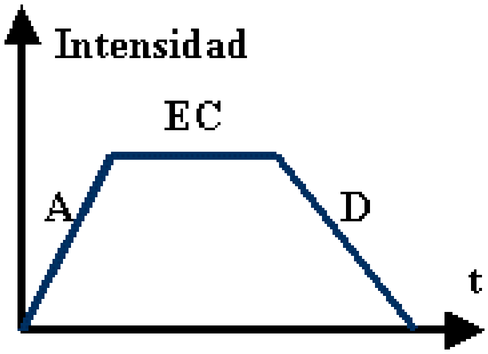


En el gráfico de la izquierda tenemos por ejemplo, una onda periódica compuesta por el 1º armónico (o componente fundamental) y el 3º armónico. En el gráfico de la derecha tenemos el espectro sonoro correspondiente a dicha onda, en este caso los términos de la serie de Fourier son solo dos.



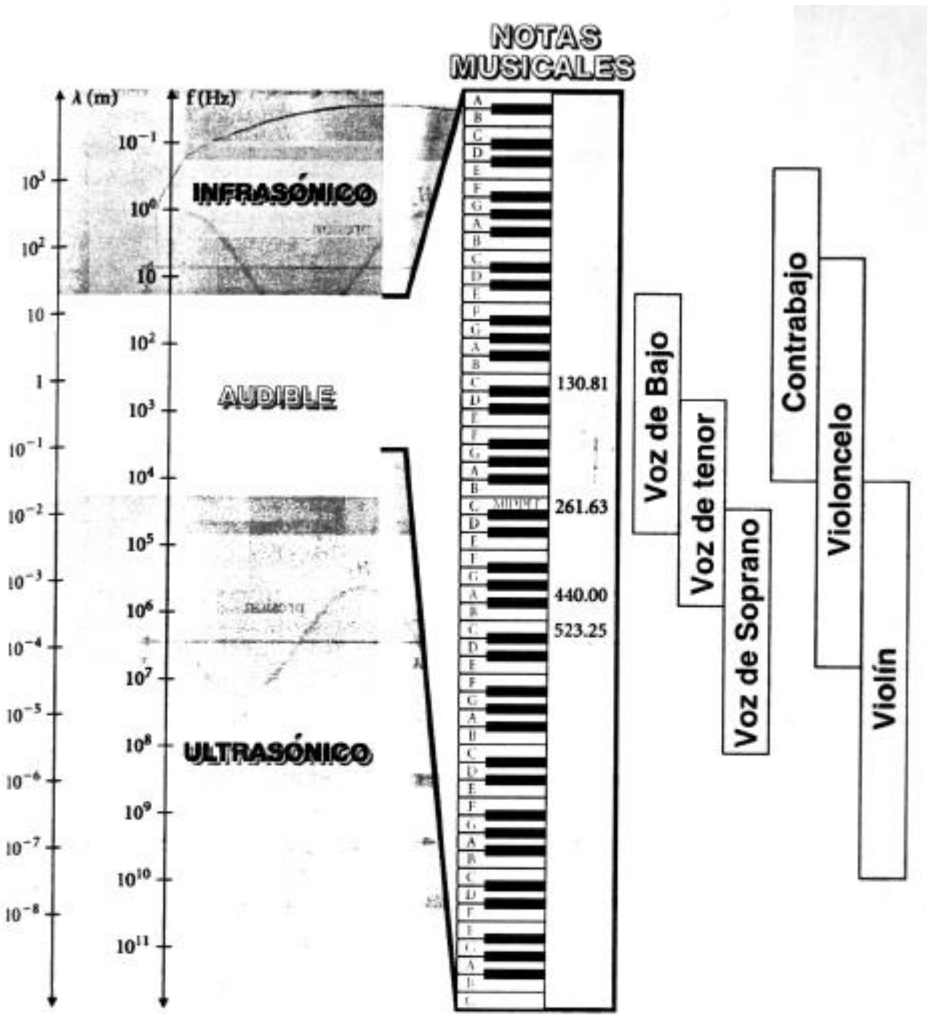


En este segundo ejemplo tenemos representada una onda mucho más compleja, y vemos al lado que su espectro sonoro es bastante más complejo.
En general, los sonidos tienen una cierta duración en el tiempo y también una forma de variación. Si en el diagrama Intensidad-tiempo de un sonido cualquiera unimos con una línea las crestas de la onda periódica, vamos a obtener una curva que se denomina *envolvente* de la onda. Un ejemplo de representación:



En la envolvente de la onda distinguimos fácilmente 3 partes, la parte A denominada *ataque*, la parte EC denominada *sostenimiento* y la parte D denominada *decaimiento* de la señal.
En las ondas sonoras, el espectro sonoro y la envolvente recién mencionada, conforman lo que se conoce como timbre de la señal, y es lo que permite diferenciar una señal de otra de características muy similares como por ejemplo si emitimos la misma nota en un piano y en una guitarra

Los espectros sonoros representados en los ejemplos anteriores, tienen componentes discretas, o sea tienen perfectamente definido lo valores de cada uno de los armónicos. En el caso de los ruidos aleatorios, en lugar de ocupar cada componente del espectro un lugar específico correspondiente a una frecuencia dada, se observa un espectro continuo en donde el ruido posee *todas* las componentes de frecuencia dentro de una banda de frecuencias.



VI Efecto Döppler. Análisis de algunos casos

Cuando la fuente de ondas y el receptor están en movimiento relativo con respecto al medio material en el cual la onda se propaga, la frecuencia de las ondas observadas es diferente de la frecuencia de las ondas emitidas por la fuente. Este fenómeno recibe el nombre de efecto Doppler en honor a su descubridor.

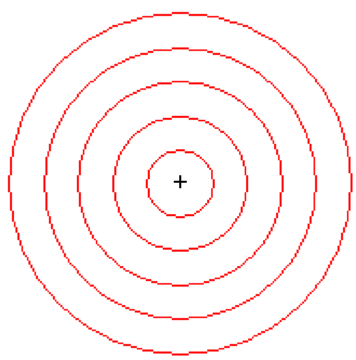
En primer lugar, vamos a observar el fenómeno, y después obtendremos la fórmula que relaciona la frecuencia de las ondas observadas con la frecuencia de las ondas emitidas, la velocidad de propagación de las ondas v_s, la velocidad del emisor v_E y la velocidad del receptor v_R.

Consideraremos que el emisor produce ondas de forma continua, pero solamente representaremos los sucesivos frentes de ondas, circunferencias centradas en el emisor, separados por un periodo, de un modo semejante a lo que se puede observar en la experiencia en el laboratorio con la cubeta de ondas. En la simulación más abajo, fijaremos la velocidad de propagación del sonido en una unidad $c = 1$, y el periodo de las ondas sea también la unidad, $\tau = 1$, de modo que los sucesivos frentes de onda se desplazan una unidad de longitud en el tiempo de un periodo, es decir, la longitud de las ondas emitidas es una unidad, $\lambda = c\tau$.

El receptor en reposo

Empezamos por el caso más sencillo, en el que el receptor está en reposo, a la izquierda o a la derecha del emisor de ondas. Vamos a estudiar diversas situaciones dependiendo de la velocidad del emisor.

Recordaremos que en el estudio de las del movimiento ondulatorio armónico, se estableció la relación entre longitud de onda y periodo, $\lambda = c\tau$.



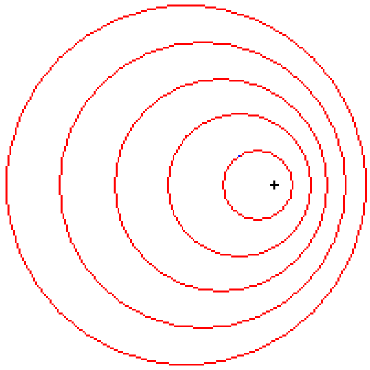
El emisor está en reposo ($v_E = 0$)

Se dibujan los sucesivos frentes de ondas que son circunferencias separadas una longitud de onda, centradas en el emisor. El radio de cada circunferencia es igual al producto de la velocidad de propagación por el tiempo transcurrido desde que fue emitido. La separación entre dos frentes de onda es una longitud de onda $\lambda = c\tau$, siendo τ el periodo o tiempo que tarda en pasar dos frentes de onda consecutivos por la posición del receptor.

- La longitud de onda medida por el emisor y por el receptor es la misma, una unidad, $\lambda_E = \lambda_R = 1$.

Cuando el emisor está en movimiento ($v_E < c$)

Consideramos primero el caso de que la velocidad del emisor v_E sea menor que la velocidad de propagación de las ondas en el medio c ($v_E < 1$).

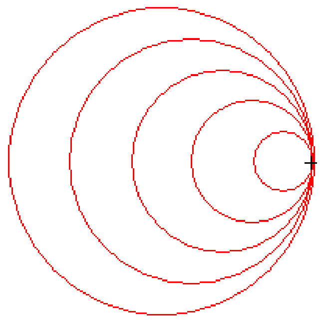


Si el movimiento del emisor va de izquierda a derecha (velocidades positivas), la longitud de onda medida por el receptor situado a la derecha es más pequeña que la unidad, y la longitud de onda medida por el receptor situado a la izquierda del emisor es mayor que la unidad.

- Receptor situado a la derecha del emisor $\lambda_R < \lambda_E$
- Receptor situado a la izquierda del emisor $\lambda_R > \lambda_E$

Como $\lambda = c\tau$, o bien $\lambda = v/f$, hay una relación inversa entre longitud de onda λ y la frecuencia f.

- Receptor situado a la derecha del emisor $f_R > f_E$
- Receptor situado a la izquierda del emisor $f_R < f_E$



Si el emisor emite ondas sonoras, el sonido escuchado por el receptor situado a la derecha del emisor, será más agudo y el sonido escuchado por el receptor situado a la izquierda será más grave. En otras palabras, cuando el emisor se acerca al receptor, éste escucha un sonido más agudo, cuando el emisor se aleja del receptor, éste escucha un sonido más grave.

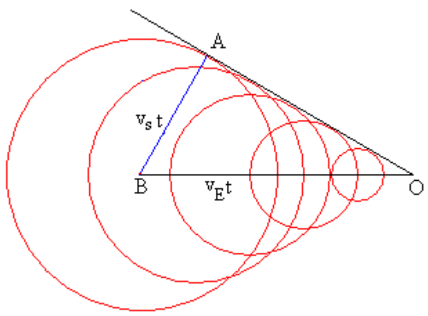
Cuando el emisor está en movimiento ($v_E = c$)

Cuando la velocidad del emisor v_E sea igual que la velocidad de propagación de las ondas en el medio c ($v_E = 1$), la longitud de onda medida por el receptor situado a la derecha del emisor es cero. Si el emisor es un avión que va a la velocidad del sonido, los sucesivos frentes de las ondas emitidas se agrupan en la punta o morro del avión.

Cuando el emisor está en movimiento ($v_E > c$)

Cuando la velocidad del emisor v_E sea mayor que la velocidad de propagación de las ondas en el medio c ($v_E > 1$), el movimiento ondulatorio resultante es entonces una onda cónica (la envolvente de los sucesivos frentes de onda es un cono con el vértice en el emisor), esta onda se llama onda de Mach u onda de choque, y no es más que el sonido repentino y violento que oímos cuando un avión supersónico pasa cerca de nosotros. Estas ondas se observan también en la estela que dejan los botes que se mueven con mayor velocidad que las ondas superficiales sobre el agua.

La envolvente, es la recta tangente común a todas las circunferencias. En el espacio, los frentes de onda son esferas y la envolvente es una superficie cónica.

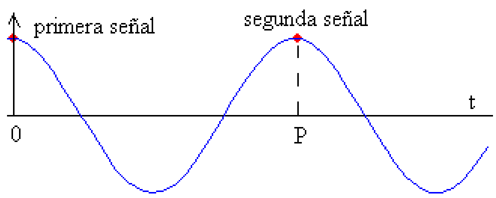


En el instante $t = 0$, el emisor se encuentra en B, emite una onda que se propaga por el espacio con velocidad c. En el instante t el emisor se encuentra en O, y se ha desplazado $v_E \cdot t$, En este instante, el frente de onda centrado en B tiene un radio $c \cdot t$.

En el triángulo rectángulo OAB el ángulo del vértice es $sen\ \theta = v_E / c$. Este cociente se denomina número de Mach.

El receptor está en movimiento ($v_E < c$ y $v_R < c$)

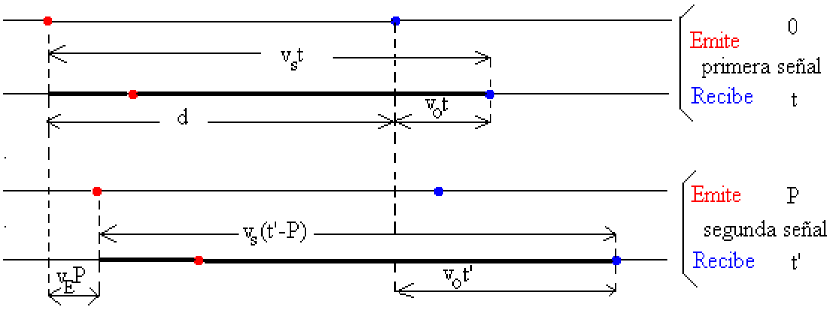
Consideramos solamente el caso en el que la velocidad del emisor y la velocidad del receptor es menor que la velocidad de propagación de las ondas en el medio.



Deducción de la fórmula del efecto Doppler

A partir de la observación del movimiento del emisor, del receptor y de los sucesivos frentes de onda, vamos a obtener la ecuación que describe el efecto Doppler. Para tal fin vamos a considerar que el emisor y el receptor se mueven ambos con velocidades propias, independientes, y orientadas en el sentido positivo del eje de las x.

En la parte superior de la figura, tenemos dos señales, que pueden corresponder a dos picos consecutivos de una onda armónica, separados un periodo τ (*P* en el dibujo). En la parte inferior, los dos puntos coloreados representan las posiciones del emisor *E* (en rojo) y del receptor *R* (en azul). En el instante inicial $t = 0$ en el que se emite la primera señal, el emisor y el receptor están separados una distancia *d* desconocida, que no afecta al fenómeno en cuestión.
La primera señal es recibida por el receptor en el instante *t*. La señal se desplaza el camino marcado en trazo grueso negro en la parte superior de la figura, desde que se emite hasta que se recibe, podemos por tanto, escribir la ecuación



$$c.t = d + v_R.t$$

(en el dibujo, la velocidad de propagación *c* aparece como v_S , y la velocidad del receptor v_R aparece como v_O).
La segunda señal se emite en el instante τ, y se recibe en el instante t'. En el intervalo de tiempo entre la primera y la segunda señal, el emisor se desplaza $v_E\tau$. La segunda señal recorre desde que se emite hasta que se recibe, el camino señalado en trazo grueso negro en la parte inferior de la figura. Por tanto, podemos escribir la ecuación

$$d - v_E.\tau + v_R.t' = c.(t' - \tau)$$

Eliminando la cantidad desconocida *d* entre las dos ecuaciones

$$\begin{cases} d = ct - v_R t \\ d = c(t' - \tau) + v_E \tau - v_R t' \end{cases}$$

$$ct - v_R t = ct' - c\tau + v_E \tau - v_R t'$$

$$(c - v_R).t = (c - v_R).t' - (c - v_E).\tau$$
$$(c - v_E).\tau = (c - v_R).(t' - t)$$

podemos verificar que la diferencia $(t'-t)$ representa el periodo $\tau' = t'-t$, de las ondas recibidas, entonces lo relacionamos con el periodo τ de las ondas emitidas.

$$\tau' = t' - t = \frac{c - v_E}{c - v_R}\tau$$

Teniendo en cuenta que la frecuencia es la inversa del periodo, obtenemos la relación entre frecuencias, o fórmula del efecto Doppler.

$$\boxed{f' = \frac{c - v_R}{c - v_E} f}$$

Esta expresión, permite calcular la frecuencia percibida por el receptor, cuando ambos, emisor y receptor están en movimiento con velocidades positivas respecto del eje *x* .
Si las velocidades de emisor y receptor son iguales, la frecuencia recibida es igual a la frecuencia emitida.
En caso que el receptor esté en reposo y el emisor en movimiento, el cálculo de la frecuencia percibida se reduce a:

$$f' = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} f$$

Mientras que si el receptor está en movimiento y el emisor en reposo, la frecuencia percibida es:

$$f' = \left(1 - \frac{v_R}{c}\right) f$$

Si en algún caso la velocidad del emisor o la del receptor se invierten, se cambiará el signo de esa velocidad en el cálculo de la frecuencia.

Número Mach

El **Número Mach**, conocido en el uso coloquial como **mach** se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio en que se mueve dicho objeto. Dicha relación puede expresarse según la ecuación:

$$Ma = \frac{v}{c}$$

Es una magnitud adimensional, típicamente usada para describir la velocidad de los aviones. Mach 1 equivale a la velocidad del sonido, Mach 2 es dos veces la velocidad del sonido, etc.
Este número fue propuesto por el físico y filósofo austríaco Ernst Mach (1838-1916), uno de los más grandes teóricos de la física de los siglos XIX-XX, como una manera sencilla de expresar la velocidad de un objeto con respecto a la velocidad del sonido.
La utilidad del número de mach reside en que permite expresar la velocidad de un objeto no de forma absoluta en km/h o m/s, sino tomando como referencia la velocidad del sonido, algo interesante desde el momento en que la velocidad del sonido cambia dependiendo de las condiciones de la atmósfera. Por ejemplo, cuanto mayor sea la altura sobre el nivel del mar o la temperatura de la atmósfera, menor es la velocidad del sonido. De esta manera, no es necesario saber la velocidad del sonido para saber si un avión que vuela a una velocidad dada la ha superado: basta con saber su número de mach.
Normalmente, las velocidades de vuelo se clasifican según su número de Mach en:

- Subsónico $M < 0,7$
- Transónico $0,7 < M < 1,2$
- Supersónico $1,2 < M < 5$
- Hipersónico $M > 5$

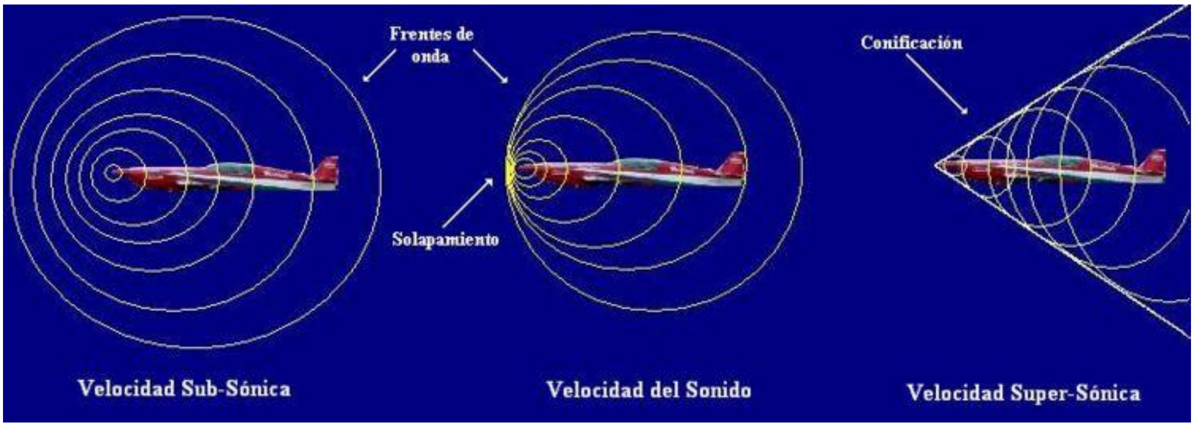
Desde el punto de vista de la mecánica de fluidos, la importancia del número de Mach reside en que compara la velocidad del móvil con la velocidad del sonido, la cual coincide con la velocidad máxima de las perturbaciones mecánicas en el fluido.

Explosión sónica

Se denomina **explosión sónica** o **boom sónico** al componente audible de la onda de choque provocada por un avión cuando sobrepasa Mach 1. Se observa con frecuencia en aviones militares, aunque también lo pueden provocar aviones civiles, como el ya retirado de servicio Concorde, capaz de alcanzar Mach 2,03, o la Lanzadera espacial, que llega a Mach 27.
El fenómeno se relaciona con el efecto Doppler, el cual describe los cambios en la frecuencia percibida por un observador cuando éste o la fuente emisora de sonido se encuentra en movimiento. Al leer y comprender este efecto en las ondas sonoras, surge la pregunta sobre qué pasará con la frecuencia percibida cuando la velocidad de la fuente se acerque, viaje y sobrepase la velocidad del sonido.

Causas del fenómeno

La explosión sónica sucede porque, al ser la velocidad de la fuente próxima a Mach 1, los frentes de onda que genera comienzan a solaparse el uno contra el otro. Si la velocidad de la fuente supera la velocidad del sonido se producirá una "conificación" de las ondas detrás de ella. En el caso del avión caza, el piloto no puede oír esa explosión ni el ruido del motor viajando por el aire, ya que este es dejado atrás por el avión. La siguiente imagen ilustra las 3 situaciones.



Situaciones según la velocidad de la nave.

Los estampidos sónicos disipan enormes cantidades de energía, lo que produce un ruido muy semejante al de una explosión. Típicamente el frente de choque puede alcanzar los 167 megavatios por metro cuadrado (MW/m^2), y pueden incluso exceder los 200 decibeles.

Interpretación matemática

La frecuencia percibida por un observador en reposo:

$$f' = \frac{1}{1 - \frac{v_E}{c}} f$$

donde v_s es la velocidad de la fuente y v la velocidad del sonido en el aire. Cuando el avión se aproxime a la velocidad del sonido (valores muy próximos), debe interpretarse como un límite.

$$f' = \lim_{v_E \to c} \frac{1}{1 \mp \frac{v_E}{c}} f$$

Cuando c sea igual a v, el denominador será 0, lo que implica una división por 0, es decir, una inconsistencia o singularidad matemática. Justamente en este punto se producirá la explosión sónica. En símbolos:

$$Si \;\; v = c \;\Rightarrow\; \frac{v_E}{c} = 1 \;\Rightarrow\; f' = \left(\frac{1}{0}\right) f$$

La ecuación resultante se la conoce como *incompatible*, es decir que no tiene solución. Por tanto, cuando la velocidad de la fuente sea mayor que la del sonido, la frecuencia aparente será menor que 0, es decir será una frecuencia negativa. Esta inconsistencia se conoce como Singularidad de Prandtl-Glauert: debido a la formación de la onda de choque se produce un súbito descenso de la presión en la vecindad del ápice motriz, lo que deviene en una igualmente abrupta disminución de la temperatura en toda el área circundante. En condiciones de elevada humedad ambiental el vapor de agua atmosférico se condensa repentinamente en minúsculas gotas de agua, lo que forma una nube de inusuales características.
Este concepto resulta muy confuso, ya que se supone que una frecuencia debe ser un valor mayor o igual a 0. La manera más fácil de comprender la idea de una frecuencia negativa es comparándola con las raíces imaginarias que puede tener una ecuación como, por ejemplo, $\sqrt{-4}$.

Ocurrencia del fenómeno en la vida cotidiana

No es necesario subirse a un avión caza para producir un boom sónico. Si se toma una toalla y se sacude rápidamente una de sus puntas, podrá producir un mini estruendo sónico, aunque una toalla en reposo no sea un generador natural de sonidos. Es la "explosión" sónica que produce el latigazo de la misma a alta velocidad, lo que producirá una onda de choque. La onda de choque se expande alrededor del objeto que lo produce, pero en direcciones contrarias de donde se produjo.
En un circo, el domador de animales puede utilizar un látigo, cuyo movimiento puede ser más rápido (casi siempre) que la velocidad del sonido. Esto también produce un estruendo sónico en miniatura. Las ondas de aire de alta velocidad resultantes, producen ese estruendo de sonido o estallido. Si el latigazo se produce sobre una superficie sucia o polvorienta, la onda de choque provocará un levantamiento del polvo que está alrededor del origen de la onda. Estos estallidos sónicos "hechos en casa", producen un fenómeno conocido como ondas de choques.