

Acústica Física

• Física del Sonido

La audición es, junto con la visión, uno de los sentidos que brinda al ser humano mayor cantidad de información sobre el medio circundante. Para que se produzca las sensaciones es necesario la presencia de tres elementos:

- a. La fuente sonora
- b. El medio transmisor
- c. El receptor de sonido

El cuerpo de un violín, el diafragma de un parlante, una corriente de aire intermitente (la VOZ), una trompeta, la explosión de una mezcla inflamable, el impacto entre dos cuerpos, son ejemplos de **fuentes sonoras**. El sonido es transmitido, con mayor o menor eficacia, por los sólidos, los líquidos y los gases. El aire, medio transmisor más usual, se encuentra entre estos últimos. El receptor natural del sonido es el oído; el artificial, el micrófono.

Para que una fuente sonora actúe sobre el medio es preciso suministrarle una determinada cantidad de energía. Por ejemplo, si golpeamos una tabla o panel, éste **vibrará** con una fuerza proporcional al impacto, produciendo un sonido. Como él aire posee cierta elasticidad, sus moléculas próximas a la fuente sonora **vibrarán**. Esta vibración se **transmitirá** a las moléculas vecinas, y así de éstas a las siguientes, sucesivamente, hasta que se agote la energía. Debe aclararse que las moléculas **no se mueven** en el espacio, sino que vibran alrededor de su posición de equilibrio transmitiendo a las vecinas su energía, tal como lo hacen las ondas del agua cuando una ondulación se transmite sobre ella. Si una vibración semejante se transmitiera en el aire y tomáramos una foto de ella, podríamos observar zonas en donde las moléculas se hallan **comprimadas, estables y expandidas**. Esto equivale a decir que a lo largo de la trayectoria de la vibración sonora se producen aumentos y disminuciones de **presión** en el aire.

• Velocidad de Propagación

La velocidad de propagación de la onda depende de las características mecánicas del medio portador. Por eso, la velocidad del sonido es mayor en los sólidos que en los líquidos y mayor en los líquidos que en los gases. En el caso de la propagación en el aire (gas), la velocidad del sonido depende de la **temperatura**.

A cero grados (0°C), la velocidad del sonido es de **331 m/seg**. Por cada grado de aumento en la temperatura, la velocidad aumenta aproximadamente 0,6 m/seg, como se indica en la siguiente ecuación:

$$C = 331 + 0,6 T^{\circ}$$

Donde: **c** = Velocidad del sonido en m/seg = 331 m/seg = Velocidad a 0°C
T° = Temperatura en grados Centígrados

Ej.: A 20°C la velocidad es: $C = 331 + 0,6 (20)$ $C = 331 + 12$ $C = \mathbf{342 \text{ m/seg}}$

Es decir, a 20°C, una onda sonora dura un segundo en recorrer 342 m. Esto da lugar a diferentes fenómenos vinculados con la percepción y el registro del sonido, que describiremos más adelante.

Cuando la ondulación sonora o variación de presión avanza en el espacio, se puede observar en cualquier punto una oscilación de la presión atmosférica relativa. Se entiende por "relativa" ya que la P. atmosférica (1013HPa) se mantiene "prácticamente" constante y el sonido significa una pequeñísima variación de esta. Esta oscilación de la presión del aire se conoce como *presión acústica*. Si en la trayectoria de esta ondulación se interpone el oído humano, las variaciones de presión harán vibrar la membrana del tímpano. Como esta vibración es una «imagen sonora» de la fuente, nuestro analizador auditivo decodificará el tipo de sonido: «Golpe en una tabla».

Como vimos en nuestro ejemplo, la vibración de la fuente da lugar a una oscilación de la presión acústica. Esta variación de presión se superpone a la presión atmosférica del aire y su valor es directamente proporcional a la energía de la vibración de la fuente: a mayor presión acústica en un punto del espacio, mayor intensidad del sonido percibido.

Las variaciones de presión que una onda sonora produce en un punto del espacio, pueden representarse con respecto al tiempo, en un gráfico en el que aparecerán los diferentes valores que toma la onda en cada instante. El valor máximo positivo o negativo de la oscilación se denomina *amplitud de onda*.

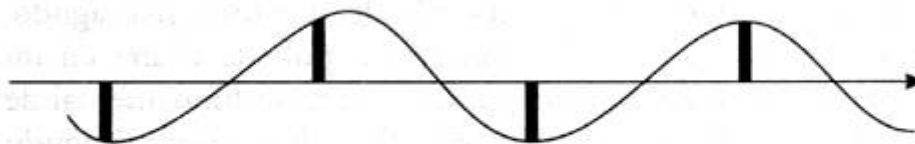
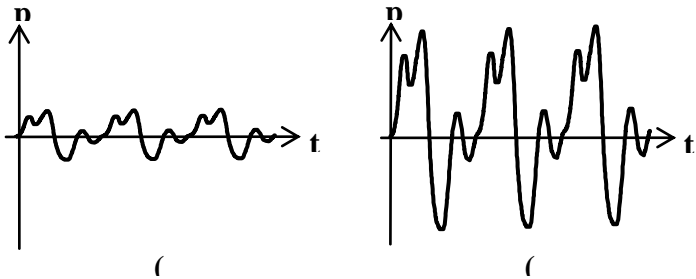


Fig. 1,2 Representación gráfica de las variaciones de la amplitud de la onda con respecto al tiempo.

La presión acústica se mide en unidades de presión, denominadas internacionalmente **Pascal** (en el sistema MKS), es decir:
1 Newton/m² = 1 Pascal (milésima parte de un milibar)

La presión acústica se mide con un instrumento llamado **sonómetro**. Por ejemplo, la voz de una persona hablando, medida a 10 cm de la boca, genera una presión acústica de 0,1 Pascales, mientras que el sonido de una trompeta, medido a un metro de distancia, genera 10 Pascales.



Dos sonidos idénticos de diferente amplitud

- **Intensidad:**

La intensidad sonora es una medida de la **energía acústica** que porta una onda.

En la práctica, podría decirse que la intensidad del sonido es la "cantidad de sonido" o el "volumen" de éste; siempre hablando desde el dominio acústico.

Por consiguiente, si sabemos que las variaciones de intensidad sonora se manifiestan en el aire como variaciones de **presión atmosférica**, comenzaremos utilizando entonces medidas de presión como el Pascal (Pa).

Debemos saber que el incremento exponencial (al cuadrado) de la presión sonora es percibido como un incremento lineal de la intensidad sonora: **$I \sim Pa^2$**

Para el rango de los sonidos audibles, la presión sonora varía entre valores extremadamente pequeños (0,00002 Pa = 20×10^{-6} Pa) hasta valores que si bien todavía pequeños, son *un millón* de veces más grandes que los anteriores (20 Pa). Dicho de otra manera, el nivel de sonido mínimo perceptible, generaría una variación de 20 μ Pa, denominado **umbral de audibilidad**; y el umbral máximo de escucha, denominado **umbral del dolor**, sería 20 Pa.

Vale recordar que en la tierra, la presión atmosférica se mantiene relativamente constante, y es equivalente 1 atm (atmósfera) o 1013 HPa. (101300Pa).

Si entonces decimos que el oído humano escucha la intensidad sonora con un patrón cuasi logarítmico (o exponencial que es lo inverso) se introdujo una escala logarítmica para expresar las variaciones de intensidad.

Por consiguiente Bel propuso que un Bel sería igual al **$\text{Log}_{10} I$** (Intensidad)

Como la escala resultante era de gran magnitud, se propuso reducirla 10 veces para obtener una escala de uso práctico; es así que un decibel, es **$10 \times \text{Log}_{10} I$**

Como ya dijimos, la intensidad sonora se relaciona en forma cuadrática con la presión; teniendo entonces: **$10 \times \text{Log}_{10} Pa^2$** . Y por propiedad del logaritmo podemos sacar el exponente como **$2 \times 10 \times \text{Log}_{10} Pa$** o **$20 \times \text{Log}_{10} Pa$**

Para expresar una presión sonora en decibeles, se define primero una presión de referencia P_{ref} que es la mínima presión sonora audible (correspondiente al sonido más suave que se puede escuchar):

$$P_{ref} = 0,00002 \text{ Pa} = 20 \mu\text{Pa}.$$

Entonces se define el nivel de presión sonora, NPS, o en inglés, SPL, (sound pressure level), mediante la siguiente fórmula:

$$dB_{SPL} = 20 \log \frac{P}{P_{ref}}$$

donde P es la presión sonora, y \log_{10} el logaritmo en base 10. El resultado está expresado en decibeles, abreviado dB . Así, para un sonido apenas audible, para el cual $P = P_{ref}$, resulta:

$$dB_{SPL} = 20 \log \frac{0.00002P_a}{0.00002P_a} = 0 \text{ dB}$$

dado que el logaritmo de 1 es 0. Como segundo ejemplo, consideremos un sonido que tiene una amplitud 1000 veces mayor que el anterior. Entonces:

$$dB_{SPL} = 20 \log \frac{0.02P_a}{0.00002P_a} = 60 \text{ dB}$$

por ser $\log_{10} 1000 = 3$. Por último, para el sonido más intenso:

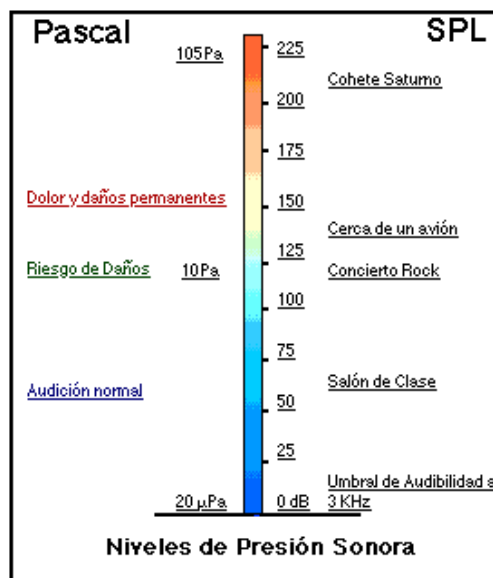
$$dB_{SPL} = 20 \log \frac{20P_a}{0.00002P_a} = 120 \text{ dB}$$

La expresión matemática mediante la cual se calcula el nivel de presión sonora no es en realidad importante desde el punto de vista práctico, ya que el instrumento con el que se mide NPS , es decir el decibelímetro, no está graduado en valores de presión, sino precisamente en dB , por lo cual en la práctica no hace falta calcular el valor de NPS a partir del correspondiente valor de presión.

Ahora veamos como podemos utilizar el dB pero para relacionar otros valores, por ejemplo Tensión (V), en la cual el dB será la misma ecuación pero respecto a valores eléctricos y no acústicos como antes:

NPS [dB]	P [Pa]
120	20,0
110	6,3
105	3,6
100	2,0
95	1,1
90	0,63
85	0,36
80	0,20
75	0,11
70	0,063
60	0,020
50	0,0063
40	0,0020
30	0,00063
20	0,00020
10	0,000063
0	0,000020

Cuadro comparativo de valores de presión sonora en dB con su equivalente en Pa (pascal)



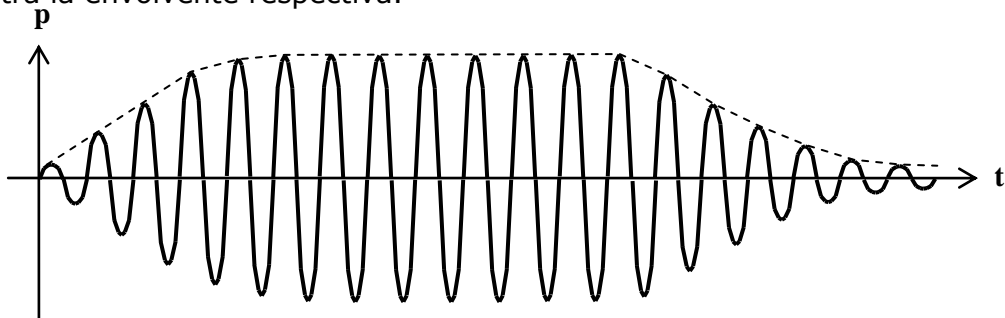
Niveles de presión sonora

Debido a que el decibel es una ecuación logarítmica de una relación X . Quiere decir esto que a **cualquier** magnitud, es factible de transformarse en decibeles siempre multiplicando $10 \times \log$ de un valor sobre otro de referencia (en la misma unidad, claro está).

Cuando la presión acústica ha pasado por todos los valores posibles y retomado un valor inicial arbitrario, se dice que la oscilación ha completado **un ciclo** de vibración.

- **Envolvente**

La amplitud de un sonido no es necesariamente constante, sino que puede variar en el tiempo. De hecho, la mayor parte de los sonidos reales tienen amplitud variable. Se define la **envolvente** de un sonido como la *forma que se obtiene uniendo las amplitudes de los ciclos sucesivos*. En la **Figura 1.7** se puede apreciar una onda cuya amplitud varía en el tiempo. En línea de trazos se muestra la envolvente respectiva.



Una forma de onda con amplitud variable con el tiempo. En línea de trazos se ha dibujado la envolvente, curva que une los picos de cada ciclo.

Decimos entonces que la envolvente no es una señal sino una curva descrita por la variación de intensidad de una señal con respecto al tiempo.

Toda envolvente se la puede descomponer en cuatro parámetros, los cuales definen parte de la misma y nos indican una o varias características de un sonido.

Estos parámetros se conocen como **ATAQUE** (A), **CAÍDA** (B), **MANTENIMIENTO** (C), y el **REESTABLECIMIENTO** (D).

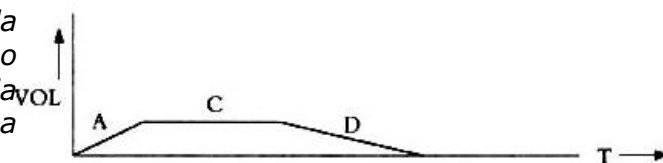


Fig. 1,12 Envolvente del sonido de un clarinete.



Fig. 1,13 Envolvente del sonido de la caja de la batería.

-El **ataque** muestra el tiempo que tarda una señal en alcanzar su valor máximo (pico).

-La **caída** muestra un intervalo en el cual la señal abandona este valor pico, hasta el próximo intervalo donde se estabiliza.

-El **mantenimiento** es un tiempo en el cual la señal, si bien va perdiendo intensidad, lo hace de manera muy lenta, lo cual le da una cierta noción de permanencia.

-El **restablecimiento** es el intervalo entre el mantenimiento y la desaparición de la misma donde se "restablece" su valor inicial.

• Frecuencia de la onda

Todas las fuentes sonoras no hacen variar la presión con la misma velocidad. Las vibraciones de un contrabajo son más lentas que las que genera un violín. Es decir: las vibraciones del violín cumplen ciclos completos en menor tiempo que las del contrabajo.

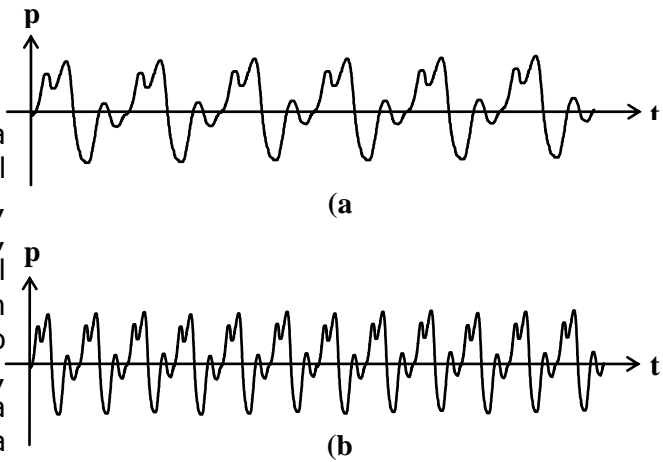
La cantidad de veces que una onda cumple un ciclo completo durante un segundo se conoce como **frecuencia de la onda**.

Así: $f = \text{ciclos/segundo} = c/\text{seg}$

La unidad de frecuencia, el **ciclo por segundo**, es denominada también **Hertz (Hz)**.

$$1 \text{ c/seg} = 1 \text{ Hz}$$

La frecuencia está asociada auditivamente con la **tonalidad** del sonido. A una frecuencia más **alta**, un tono más **agudo**. Por ejemplo, una cuerda equivalente, pulsada al aire en un violín y en un contrabajo, produce un tono fundamental de 659 Hz y 97 Hz, respectivamente. El violín suena más **agudo** porque genera frecuencias de un valor **mayor**.



Dos sonidos periódicos: (a) De baja frecuencia (grave); (b) De alta frecuencia (agudo).

Cuando seguimos la propagación de la onda en un sentido determinado, una partícula comienza a vibrar, la vecina lo hace un tiempo después y así sucesivamente; el retraso va aumentando hasta que llega un momento (cuando se cumple un ciclo completo) en el que se encuentra una partícula cuya oscilación **coincide** con la primera. La distancia que existe entre partículas que vibran de forma igual se denomina **longitud de la onda**.

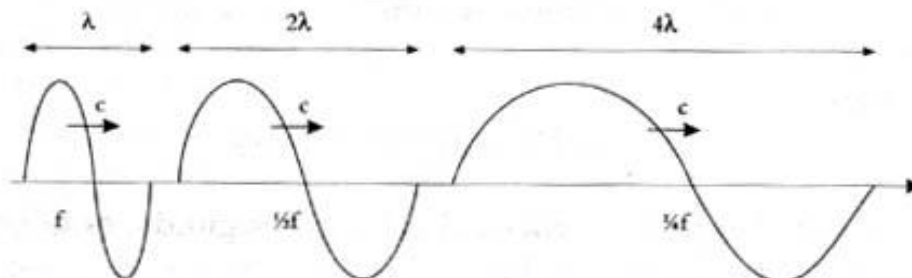


Fig. 1,3 Diferentes longitudes de onda, cuando la frecuencia se disminuye para una misma velocidad de propagación.

Existe una relación matemática entre la **velocidad** con que se desplaza la onda, la **frecuencia** de la oscilación y la **longitud de onda**. $\lambda = C/f$

Donde: λ (Lambda) = Longitud de la onda en metros
C = Velocidad de propagación de la onda sonora en m/seg.
F = Frecuencia de la oscilación en hertz (Hz)

De acuerdo con esto, para una velocidad de propagación constante, a medida que **aumenta** la frecuencia de la oscilación **disminuye** la longitud de onda, o lo que es igual, un mismo espacio contiene mayor cantidad de ciclos.

20	25	31.5	40	50	60	80	100	125	160
1722cm	1376cm	1069cm	861cm	688cm	558cm	431cm	345cm	274cm	215cm

200	250	315	400	500	630	800	1K	1.25K	1.6K
172cm	137cm	111cm	83cm	68cm	55cm	43cm	35cm	27cm	21cm

2K	2.5K	3.15K	4K	5K	6.3K	8K	10K	12.5K	16K
17cm	13cm	11cm	8.6cm	6.8cm	5.5cm	4.3cm	3.5cm	2.8cm	2cm

$$\text{Longitud de onda} = \frac{\text{Velocidad del sonido}}{\text{Frecuencia}}$$

340 metros por segundo
59° Fahrenheit o 15° Celsius

Así mismo, el tiempo que dura un ciclo se denomina Período (t) y se relaciona con la frecuencia por la siguiente formula: $t = 1/F$

• SUMATORIA DE ONDAS

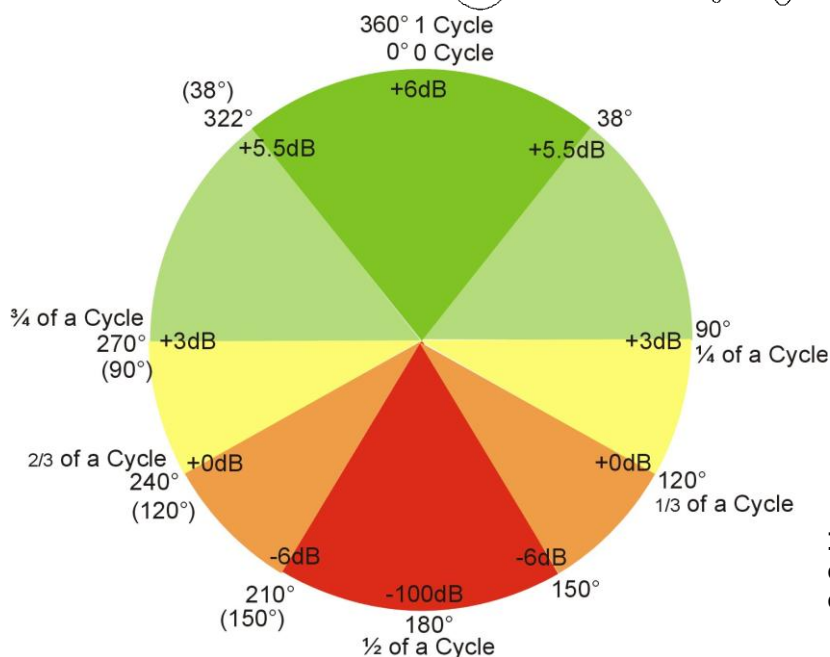
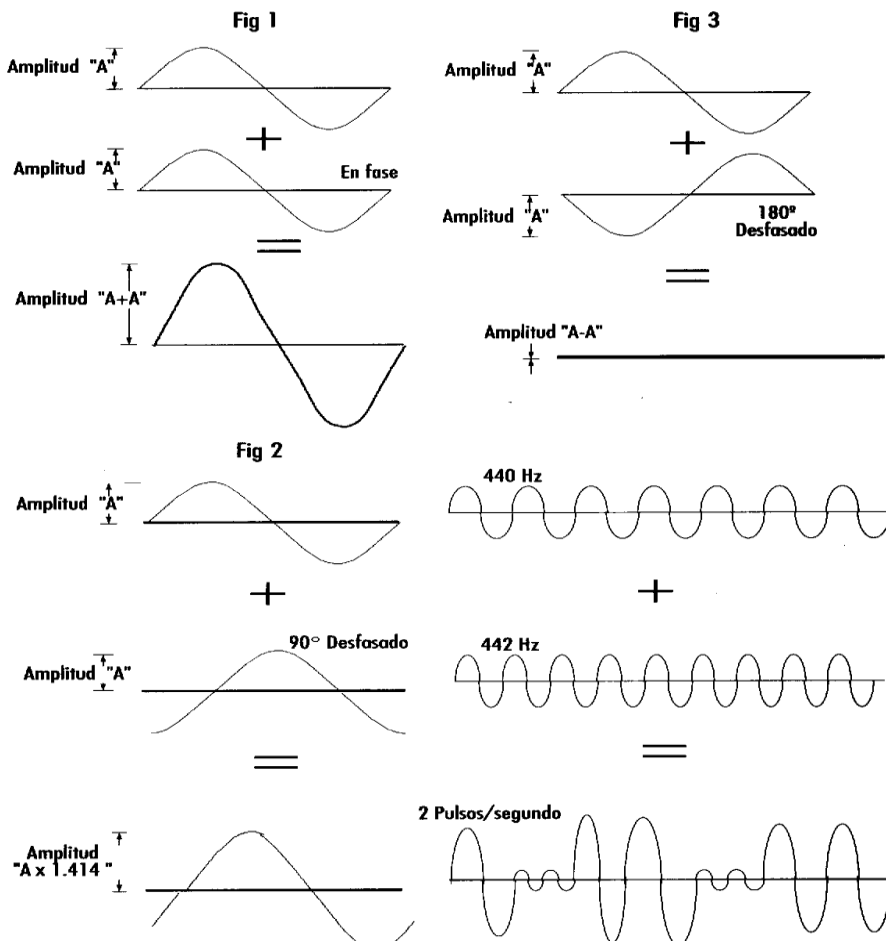
Cuando en el espacio se producen simultáneamente dos ondas sonoras del mismo tipo, cuyos aumentos y disminuciones de presión ocurren al mismo tiempo, se dice que ambas señales están **en fase**; cuando las oscilaciones no son simultáneas, se dice que están **fuera de fase**.

Bajo determinadas circunstancias puede ocurrir que la diferencia de fase sea tal que cuando una onda tiene la máxima presión en **un sentido**, la otra la tiene en **sentido inverso**; en este caso se dice que ambas ondas están **en contrafase**.

Cuando esto ocurre en un mismo punto del espacio actúan presiones de signo contrario, cuya suma puede llegar a ser cero, produciéndose la llamada **cancelación de fase**.

Un caso crítico de este fenómeno ocurre cuando se capta una misma señal sonora con dos micrófonos que ocupan diferentes lugares en el espacio, pues al registrar la señal con diferentes fases la señal original se **deforma**.

La relación entre dos señales con respecto a la fase se expresa en **tiempo** o en **grados**; así, se dice que cuando dos ondas están en fase, el valor de desfase es de 0 grados, y cuando están opuestas en fase este valor es de 180 grados.



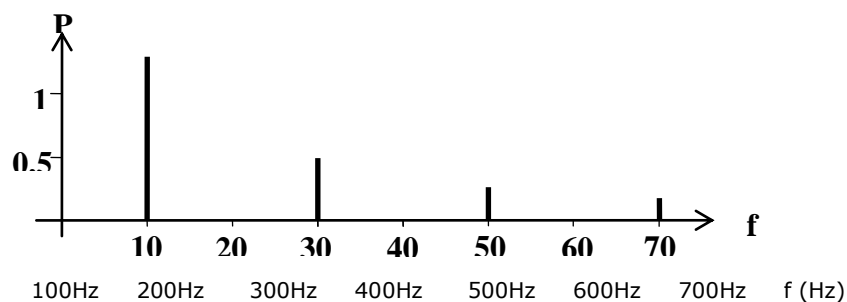
Intensidad resultante de suma de ondas de diferentes fases

• SONIDOS COMPLEJOS

Definiremos para comenzar que existen básicamente dos tipos de sonido: sonidos primarios y sonidos complejos. El sonido primario está compuesto por una frecuencia determinada llamada onda fundamental. También se la conoce como tono puro.

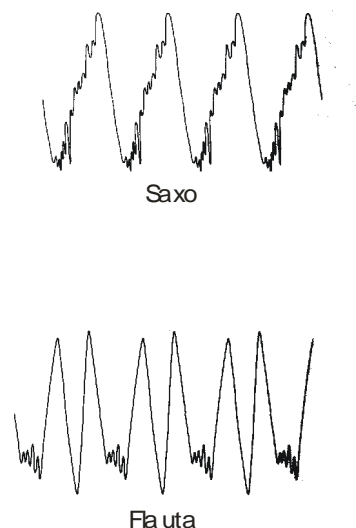
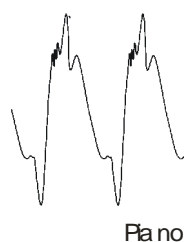
El sonido complejo está constituido por la sumatoria de la onda fundamental y sus armónicos.

Quiere decir esto que, cuando se produce un sonido, el mismo viene determinado por una onda pura (fundamental), que dictamina la frecuencia del mismo, y por un conjunto de señales que se agregan al mismo (se suman) llamado contenido armónico, logrando que esta onda tenga una sonoridad determinada.



Espectro de una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz.

2x440=880
3x440=1320
4x440=1760
5x440=2200
etc.



Forma de onda de tres instrumentos diferentes

El contenido armónico entonces constituye un conjunto de señales periódicas, múltiplos de la fundamental, que se suman a esta conformando un sonido complejo. Se desarrollan en el siguiente orden: f (fundamental), $2xf$ (1° armónico), $3xf$ (2° armónico), $4xf$ (4° armónico), ..., nx (n° armónico).

En números, para una fundamental de 500Hz, sus primeros 4 armónicos serán 1000Hz, 1500Hz, 2000Hz, 2500Hz.

Tomemos un ejemplo: El LA central de un piano, o LA de afinación corresponde a una nota de 440Hz. Si tocamos el mismo LA de una guitarra, en 440Hz, oiremos que la nota es la misma pero que suena distinto; suena a guitarra. La diferencia entre un LA de piano y un LA de guitarra la hace el timbre, que es el contenido armónico de esa señal; ya que la fundamental (la nota) es la misma en ambos instrumentos.

Puntualmente la diferencia se manifiesta en la amplitud de cada armónico, siendo en muchos casos algunos de ellos superior a la amplitud de la frecuencia fundamental.

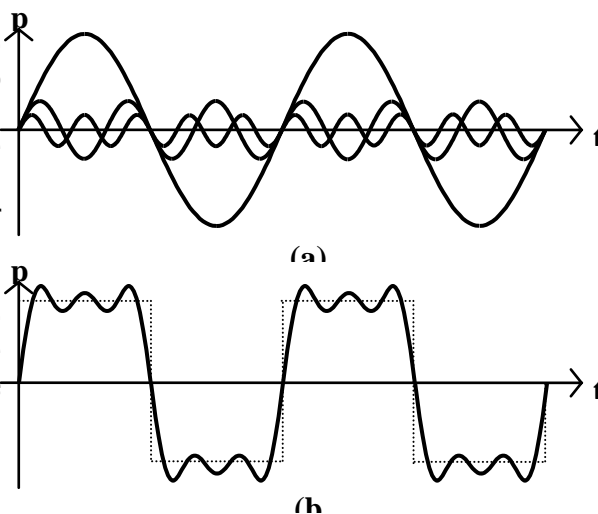
Este es el principio de la generación de sonidos sintetizados en el cual se utiliza un teclado que siempre reproduce las mismas notas pero permite variar el tipo de sonido o instrumento o sea su contenido armónico.

• Señales de Fourier

Si tomamos a una señal **senoidal** para analizar, encontraremos recursos matemáticos que nos permitan analizarla, como las funciones trigonométricas (seno, coseno y tangente) o las integrales, para cálculos de área, etc.

Pero **no existe** a simple vista la posibilidad matemática de analizar las características de una onda compleja, justamente por la complejidad de su forma.

Fue entonces donde el matemático J. Fourier (1768-1830) demostró que toda onda compleja esta formada por la sumatorias de señales puras. O lo que es lo mismo, que se puede descomponer a toda señal periódica en una onda senoidal pura llamada fundamental y a sus armónicos también como ondas senoidales múltiplos de esta.; a través del Teorema de Fourier.



(a) Los tres primeros armónicos no nulos de una onda cuadrada de frecuencia f_0 , cuyas frecuencias son f_0 , $3f_0$ y $5f_0$. (b) El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

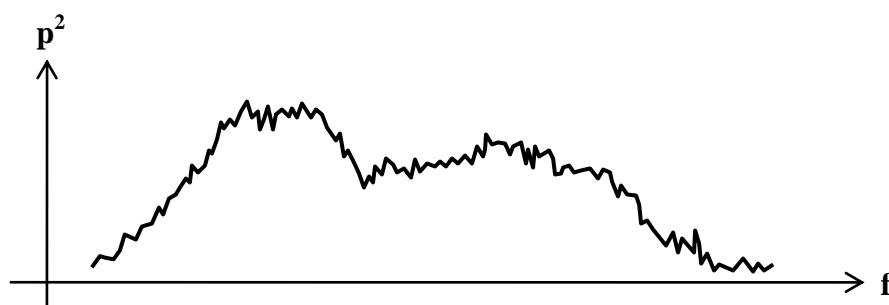
• **Relaciones no armónicas**

Hasta ahora hemos analizado el caso de espectros armónicos, es decir en los cuales las frecuencias presentes eran múltiplos de cierta frecuencia, denominada frecuencia fundamental. No hay impedimento, sin embargo, para que los "armónicos" sean de frecuencias **cualesquiera**, por ejemplo **100 Hz, 235 Hz y 357 Hz**. De hecho, muchos sonidos naturales son de esta última clase, por ejemplo el sonido de las campanas, o el correspondiente a los diversos tipos de tambores. En estos casos las ondas senoidales que constituyen el sonido en cuestión se denominan **sonidos parciales** en lugar de armónicos. Este tipo de sonidos **no es periódico**, a pesar de lo cual también pueden representarse gráficamente en un oscilograma. Sin embargo, lógicamente, *no podrá identificarse una frecuencia ni un periodo*. El espectro correspondiente a estos sonidos se denomina **espectro inarmónico**.

También puede representarse un espectrograma de estos sonidos. A diferencia de lo que ocurre en los espectros armónicos, las líneas espectrales no están equiespaciadas.

• Ruido

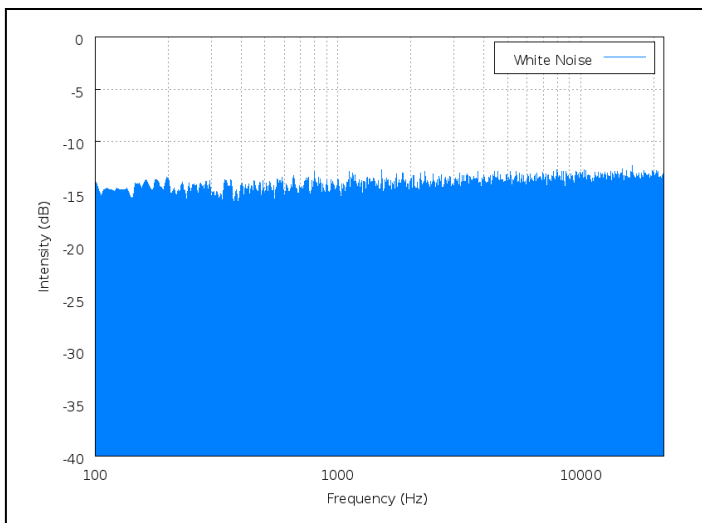
Existe aún otro tipo de sonidos, formados por una cantidad muy grande de parciales muy próximos entre sí, que se denominan genéricamente ruido. Algunos ejemplos de esto son el sonido del mar, el ruido de fondo de un casete y el sonido que se emite al pronunciar las consonantes f, j, s, z o simplemente al soplar. Debido a la gran cantidad de parciales, y al hecho de que cada uno es de amplitud muy pequeña, lo más conveniente es representar el espectro no mediante líneas espectrales individuales, sino como una curva continua (Figura 1.16) denominada **densidad espectral**.



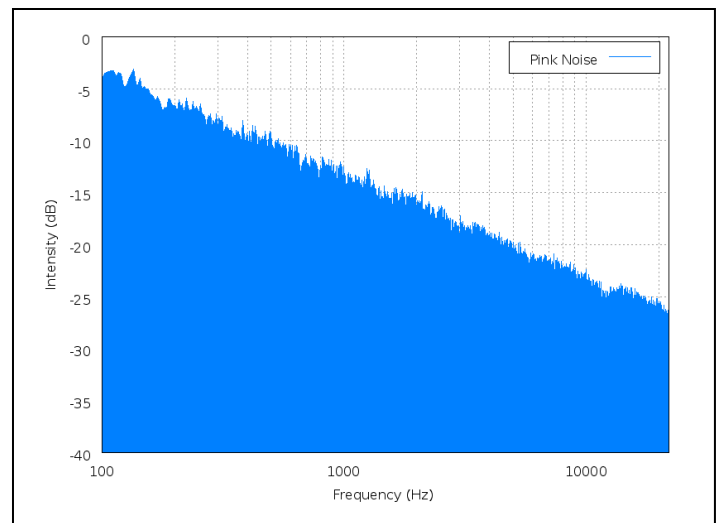
Ejemplo de espectro continuo de un ruido. En el eje horizontal se indica la frecuencia, y en el vertical la densidad espectral, que representa la energía en función de la frecuencia.

Existen **dos** tipos de ruido que tienen importancia específica en acústica: el **ruido blanco** y el **ruido rosa**. El ruido blanco se caracteriza por tener una densidad espectral constante, es decir *igual para todas las frecuencias*. Esto significa que contiene parciales de todas las frecuencias con **igual amplitud**. El nombre de ruido "blanco" proviene de realizar una analogía con la luz blanca,

que contiene todos los *colores* del espectro con la misma intensidad. El ruido rosa contiene mayor proporción de bajas frecuencias (de allí el nombre de "rosa", ya que contiene todas las frecuencias pero más las bajas frecuencias, que en la luz corresponderían al color rojo). Tiene la particularidad de que en cada octava (es decir el intervalo de frecuencias desde un **do** al siguiente, o desde un **re** al siguiente, etc.) tiene la misma **energía sonora**. El ruido rosa tiene aplicación en la ecualización de sistemas de sonido mediante ecualizadores por octavas o por tercios de octava. Es también una señal útil para la prueba de equipos de sonido, ya que es un tipo de ruido que suena natural al oído.



Densidad espectral del ruido blanco.



Densidad espectral del ruido rosa.