

Fundamentos de Acústica

I.1 Introducción

La Acústica es la disciplina que se ocupa de estudiar los sonidos en sus diversos aspectos. Se puede dividir en una gran cantidad de subdisciplinas, algunas de las cuales se listan en la Tabla

I.1.

Tabla 1.1 Algunas subdivisiones de la Acústica

Rama	Breve descripción
Acústica física	Análisis de los fenómenos sonoros mediante modelos físicos y matemáticos.
Psicoacústica	Estudio de las sensaciones evocadas por los sonidos y sus diversos parámetros.
Acústica musical	Estudio de los instrumentos musicales, las escalas, los acordes, la consonancia y la disonancia, etc.
Acústica arquitectónica	Estudio de la acústica de recintos y espacios y su influencia sobre la escucha de la palabra y la música.
Electroacústica	Estudia el procesamiento eléctrico-electrónico de señales acústicas.
Acústica vibratoria	Estudia los sistemas que poseen masa y elasticidad, estando en capacidad de ejecutar un movimiento oscilatorio.
Bioacústica	Estudio del efecto de los sonidos sobre los seres vivos, y de los sonidos producidos por éstos.
Acústica fisiológica	Estudio del funcionamiento del aparato auditivo, desde la oreja hasta el cerebro.

Tabla 1.1 Algunas subdivisiones de la Acústica (Continuación)

Rama	Breve descripción
Acústica ultrasónica	Estudio del ultrasonido, es decir el sonido

	inaudible de alta frecuencia, y sus aplicaciones.
Acústica subacuática	Estudio del comportamiento del sonido en el agua, y sus aplicaciones.
Macroacústica	Estudio de los sonidos extremadamente intensos, como el de explosiones, turborreactores, etc.
Acústica estructural	Estudio del sonido que se propaga por las estructuras en forma de vibraciones.
Acústica fonética	Análisis de las características acústicas del habla y sus aplicaciones.
Metrología acústica	Estudio de las técnicas de mediciones y de los diversos parámetros acústicos como: frecuencia, intensidad, espectro, etc.

I.2 El sonido: un fenómeno ondulatorio

El sonido consiste en la propagación de una perturbación en el aire. Para comprender mejor este concepto imaginemos un tubo muy largo lleno de aire, con un pistón en un extremo. El aire está formado por una cantidad muy grande de pequeñas partículas o moléculas. Inicialmente, el aire dentro del tubo está en reposo, o, más técnicamente en equilibrio (figura I.1 a). Este equilibrio es dinámico, lo cual significa que las moléculas no están quietas, sino que se mueven caóticamente en todas las direcciones debido a la agitación térmica. En otras palabras, en cada centímetro cúbico (cm^3) de aire, ya sea cerca del pistón o lejos de él, hay aproximadamente la misma cantidad de moléculas (una cantidad muy grande: unos 25 trillones).

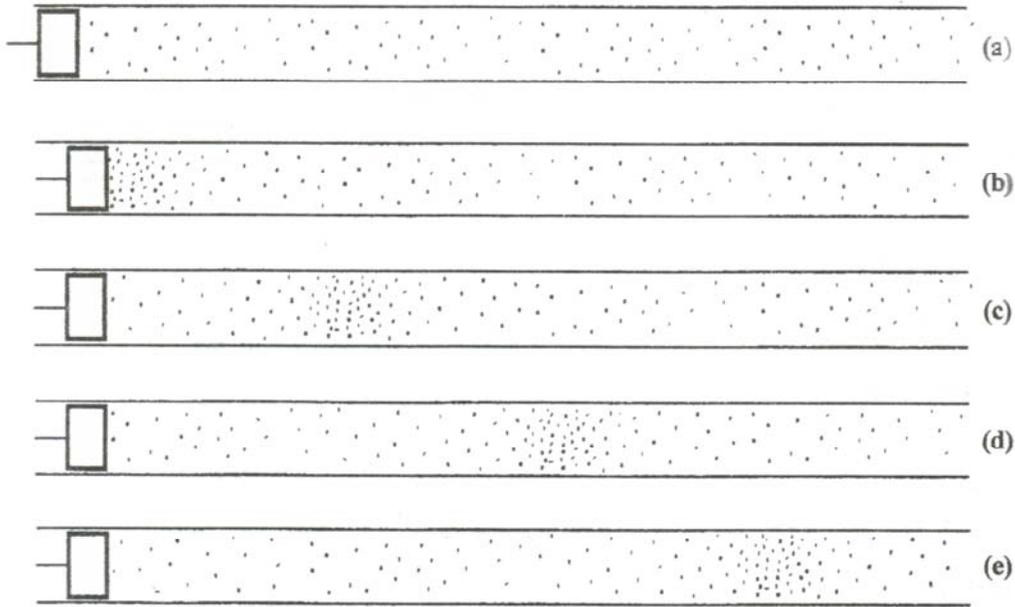


Figura 1.1 Propagación de una perturbación en un tubo. (a) El aire en reposo (moléculas repartidas uniformemente). (b) Ante una perturbación el aire se concentra cerca del pistón. (c), (d), (e) La perturbación se propaga alejándose de la fuente.

Supongamos ahora que el pistón se desplaza rápidamente hacia el interior del tubo (figura I.1 b). Las moléculas que se encuentran junto al pistón serán empujadas por éste, mientras que las que se encuentran muy alejadas no. Esto implica que en la zona del pistón el aire se encontrará más comprimido que lejos de él, es decir, que la misma cantidad de aire ahora ocupa menos espacio. En otras palabras, habrá ahora más moléculas por centímetro cúbico cerca del pistón que lejos de él. Al igual que lo que sucede cuando se abre la válvula de un neumático, el aire comprimido tiende a descomprimirse, desplazándose hacia la derecha, y a su vez comprimiéndose el aire que se encuentra próximo a él (figura I.1 c). Esta nueva compresión implica, otra vez, la tendencia a descomprimirse, que se efectúa a costa de comprimir el aire contiguo (figura I.1d). El proceso se repite de la misma manera permanentemente, con lo cual la perturbación original (la compresión del aire cercano al pistón) se propaga a lo largo del tubo alejándose de la fuente de la perturbación (el pistón).

Este proceso se denomina también propagación de una onda sonora, y es similar a lo que sucede cuando en una pileta en calma se deja caer una piedra. En el instante en que la piedra golpea el agua, se produce una perturbación, que se propaga en forma de una circunferencia cuyo radio va en aumento.

Al aire libre, es decir, sin la restricción de un tubo (y en ausencia de superficies que reflejen el sonido), la perturbación se propaga, similarmente, en forma de una onda esférica cuyo radio va aumentando a medida que transcurre el tiempo.

I.3 Velocidad del sonido

En cuanto a qué tan rápido se aleja la onda de la fuente, se define como la velocidad de propagación del sonido, la cual por ejemplo en el aire, a 23 °C, vale

$$c = 345 \text{ m/s} , \text{ o bien, } c = 1,242 \text{ km/hr} .$$

La temperatura es importante, ya que afecta la velocidad del sonido. En un medio frío, las moléculas se mueven con lentitud, y ello reduce la velocidad en que se transmite el sonido; si este medio es calentado, sus moléculas chocan entre sí con rapidez, y ésto aumenta la velocidad del sonido a razón de 0.17%/°C. Así, a 0° C, que es la temperatura de congelación del agua, el sonido viaja por el aire a 331.31 m/s, y a 100°C, que es su punto de ebullición, aumenta su velocidad a 385.87 m/s.

Una observación importante es que la velocidad del sonido es independiente de la intensidad de la perturbación.

Veamos algunos ejemplos. Si una persona se encuentra a 100 metros de distancia de otra (aproximadamente una cuadra), un grito de la primera demorará, a causa de ésta velocidad, 29 centésimas de segundo en llegar a donde se encuentra la segunda. Otro ejemplo es el de los relámpagos y los truenos. Un relámpago es una enorme chispa que se produce por una descarga eléctrica entre distintas capas de aire con cargas opuestas. Esta chispa produce a la vez luz y sonido. Sin embargo, la luz viaja a una velocidad mucho más alta y alcanza nuestra vista casi instantáneamente, mientras que el sonido demora un tiempo corto en llegar a nosotros. Así, sin cronómetro en mano comprobamos que el trueno se escucha 5 seg, después de ver un relámpago, conociendo la velocidad del sonido podemos calcular que el relámpago se produjo a una distancia

$$d = 345 \text{ m/s} \times 5 \text{ seg} = 1,725 \text{ m} = 1.725 \text{ km}$$

Otro ejemplo interesante es el eco. Si gritamos frente a una superficie vertical un tanto alejada (por ejemplo una barranca o un acantilado), el sonido tardará un breve tiempo en llegar a la superficie, se reflejará en ella, y volverá demorado otro tiempo adicional. El resultado será que se escucha unos instantes después, que la pared “repite” el grito.

I.4 Longitud de onda

Vamos ahora a definir algunos parámetros muy importantes relacionados con los sonidos periódicos. El primero es la longitud de onda, que se representa con la letra griega lambda, λ , y es la distancia entre dos perturbaciones sucesivas en el espacio (figura I.2). Se mide en metros (m) o en centímetros (cm), y para los sonidos audibles está comprendida entre los 2 cm (sonidos muy agudos) y los 17 m (sonidos muy graves).

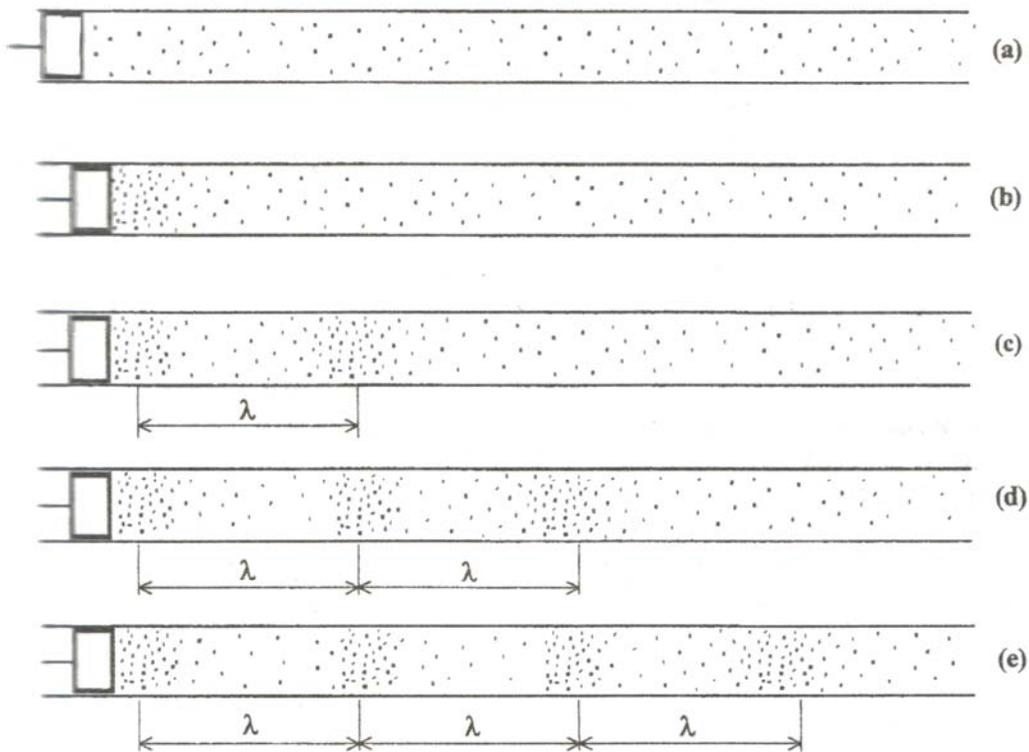


Figura I.2 Un sonido consecuencia de una perturbación repetitiva, es decir, periódica. (a) El aire en reposo. (b) Primera perturbación. (c) Segunda perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia λ (longitud de onda). (d) Tercera perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia 2λ y la segunda una distancia λ . (e) Cuarta perturbación, cuando las anteriores han recorrido las distancias 3λ , 2λ y λ respectivamente.

La longitud de onda es importante en varias situaciones. En primer lugar, un objeto grande comparado con la longitud de onda es capaz de alterar significativamente la propagación del sonido cuando se interpone entre la fuente sonora y el oyente. Así, por ejemplo, los sonidos graves pueden “doblar la esquina” fácilmente porque su longitud de onda es grande. Los agudos, en cambio, cuya longitud de onda puede ser de apenas algunos centímetros, se ven considerablemente atenuados.

Otra situación en el que la longitud de onda juega un papel importante es en la eficiencia de los altavoces. Cuando la longitud de onda λ , emitida por un parlante es mucho más pequeña que su propio tamaño, la potencia emitida se reduce considerablemente. Por esa razón los *tweeters* (altavoces de agudos) son mucho más pequeños que los *woofers* (altavoces de los graves).

I.5 Periodo

Un segundo parámetro es el periodo **T**, que se define como el tiempo transcurrido entre una perturbación y la siguiente. Se mide en segundos (s) o milisegundos (ms), es decir, la milésima parte de un segundo. El periodo de los sonidos audibles para el ser humano varía entre los 0.05 ms (sonidos muy agudos) y los 50 ms (sonidos muy graves). Cabe destacar que son tiempos muy cortos que impiden, en general, que los ciclos puedan percibirse como fenómenos separados. El cerebro tiende a integrarlos en una única sensación, la sensación sonora.

Sonidos periódicos

El fenómeno sonoro que analizamos anteriormente (figura I.1) consistía en una única perturbación del aire. La mayor parte de los sonidos de la naturaleza, son en realidad, el resultado no de una, sino de múltiples perturbaciones sucesivas. Estos sonidos se denominan periódicos, y pueden dividirse en ciclos, donde cada ciclo abarca todo lo que sucede entre dos perturbaciones sucesivas del aire. En la figura I.2 se muestra un ejemplo de un sonido de este tipo. En (a) todavía no se ha producido ninguna perturbación. En (b) se produce la primera perturbación, que se propaga con una velocidad c alejándose del pistón. En (c), después de que la primera perturbación ha recorrido cierta distancia, el pistón se mueve provocando una segunda perturbación. Mientras la primera perturbación sigue desplazándose con velocidad c , la segunda comienza a hacerlo también con velocidad c . En (d) y en (e), se agregan nuevas perturbaciones, las cuales a su vez se propagarán con idéntica velocidad, y así continúa el proceso hasta que en algún momento cesa el sonido.

Siguiendo con la analogía de la piedra que cae en la pileta, podemos pensar en una sucesión de guijarros que caen sobre la superficie del agua, lo cual dará lugar a una serie de círculos concéntricos que van agrandándose a medida que van surgiendo nuevos círculos. Análogamente, al aire libre, y lejos de toda superficie capaz de reflejar el sonido, las sucesivas perturbaciones se propagarán como esferas concéntricas crecientes que se alejan de la fuente. En presencia de superficies reflectoras, la onda deja de ser esférica para volverse sumamente compleja.

Muchas veces se habla de un campo sonoro para referirse a la manera en que se distribuye el sonido en los diversos puntos de un determinado espacio, por ejemplo dentro de una sala o al aire libre.

I.6 Frecuencia

El tercer parámetro, uno de los más importantes en Acústica, es la frecuencia, **f**. Se define como la cantidad de ciclos por segundo. Se expresa en Hertz (**Hz**), unidad llamada así en honor a Heinrich Hertz, científico del siglo XIX que descubrió las ondas de radio. Esta unidad es equivalente al ciclo por segundo (**cps**), aunque la unidad **Hz** se encuentra más frecuentemente en los textos y en las especificaciones técnicas de los diversos equipos. La frecuencia de los sonidos audibles está comprendida entre los 20 Hz (sonidos graves) y los 20,000 Hz (sonidos agudos) ó 20 kHz (kilo Hertz, es decir 1,000 Hz).

Existen algunas relaciones matemáticas importantes entre estos parámetros. Así, el periodo **T** y la frecuencia **f**, están relacionadas por las ecuaciones

$$f = 1 / T \quad (1.1)$$

$$T = 1 / f \quad (1.2)$$

en las cuales si **T** se expresa en s, entonces **f** se expresa en **Hz**, y si **T** se expresa en ms, **f** se expresa en **KHz**.

Por ejemplo, si sabemos que el periodo de cierto sonido es de 0.01 s, es decir, 1/100 s, entonces la frecuencia será, aplicando la primera relación, 100 Hz. En cambio, si conocemos que la frecuencia es de 1,000 Hz, aplicando la segunda relación se llega a que el periodo es de 0.001 s, es decir 1 ms.

La otra relación importante es la que vincula la longitud de onda con la frecuencia, y es la siguiente:

$$\lambda = c / f , \quad (1.3)$$

donde c es la velocidad del sonido. Así, un sonido de frecuencia 500 Hz, tiene una longitud de onda de

$$\lambda = 345 / 500 = 0.69 \text{ m} = 69 \text{ cm}$$

Como segundo ejemplo, una voz masculina (al hablar normalmente) que tiene una frecuencia de unos 120 Hz, según la fórmula anterior corresponde a una longitud de onda de 2.88 m.

I.7 Presión sonora

Según hemos visto, el sonido puede considerarse como una sucesión de ondas de compresión seguidas por ondas de descompresión que se propagan por el aire a una velocidad de 345 m/s. Sin embargo, si nos ubicamos en una posición fija, veremos que la presión atmosférica aumenta y

disminuye periódicamente, conforme pasan por el lugar las sucesivas perturbaciones. Dado que nos referimos bastante seguido a valores de presión, conviene aclarar que la unidad adoptada internacionalmente para la presión es el **Pascal**, abreviada **Pa**. Expresada en esta unidad, la presión atmosférica es del orden de 100,000 **Pa** (o, como se suele anunciar en los informes meteorológicos, alrededor de 1,000 **hPa**, donde **hPa** es la abreviatura de hectopascal, es decir **100 Pa**). Ahora bien, los aumentos y las disminuciones de presión debidas a las ondas sonoras son realmente muy pequeños comparados con este valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos se perciben como tales (después de eso se perciben como dolor) implican un aumento de 20 Pa. El incremento sobre la presión atmosférica en ausencia del sonido se denomina **presión sonora**, abreviada **p**. Así, la presión sonora es lo que se debe agregar a la presión atmosférica en reposo para obtener el valor real de presión atmosférica.

Por ejemplo, si la presión en reposo es de 100,000 Pa y la presión en presencia de un sonido es de 100,008 Pa, entonces la presión sonora es

$$p = 100,008 \text{ Pa} - 100,000 \text{ Pa} = 8 \text{ Pa} .$$

El trabajar con la presión sonora en lugar de la presión total, nos evita tener que utilizar números con gran cantidad de cifras.

Las presiones sonoras audibles varían entre 0.00002 Pa y 20 Pa. El valor más pequeño, también expresado como 20 μPa (donde μPa es la abreviatura de micropascal, es decir una millonésima de Pa).

I.8 Representación gráfica del sonido

Hasta ahora no habíamos tomado en cuenta la manera en que se aplican las perturbaciones sucesivas. Así, podría ocurrir que éstas fueran el resultado de un suave vaivén del pistón, o que por el contrario, cada perturbación consistiera en una brusca sacudida del mismo. La realidad es que aún manteniéndose la frecuencia, ambos sonidos sonarán muy diferentes, lo cual muestra la importancia de conocer la forma de la perturbación. Para ello se utiliza un tipo de representación gráfica denominada oscilograma, que consiste en mostrar la evolución en el tiempo de la perturbación (figura I.3) en un par de ejes correspondientes al tiempo (eje horizontal) y la presión sonora (eje vertical).

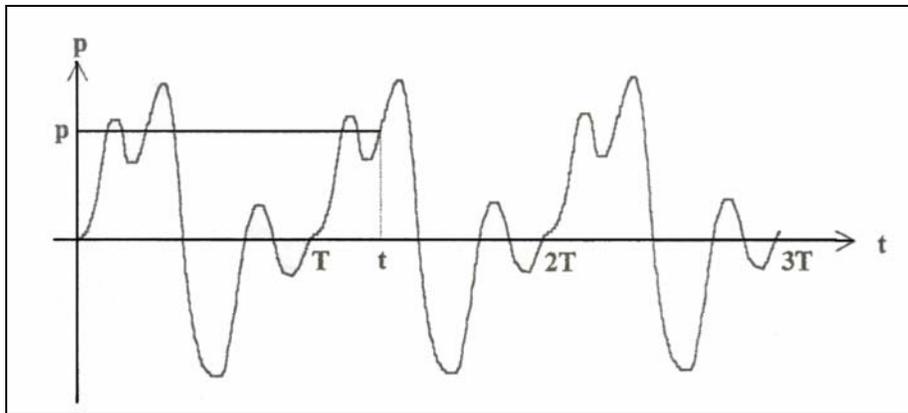


Figura I.3 El oscilograma de un sonido, en el cual pueden asociarse 3 ciclos o periodos completos del mismo. En el eje horizontal se representa el tiempo y el eje vertical la presión sonora. Obsérvese que la forma de onda es en este caso relativamente compleja.

El significado de este gráfico es que para cada instante t , representado como un punto o posición en el eje horizontal, corresponde una presión sonora p , representada por una altura medida en la escala del eje vertical. Los valores positivos (arriba del eje t) representan compresiones y los valores negativos (debajo del eje t), descompresiones.

Es interesante explorar el significado del periodo T y de la frecuencia f en un oscilograma. En la figura I.3 se puede apreciar que T es la duración de cada ciclo o porción repetitiva de la onda. En la figura I.4, se ha dibujado la onda durante un tiempo de 1 s (en otra escala). Dado que hay doce ciclos en dicho tiempo, la frecuencia es de 12 Hz.

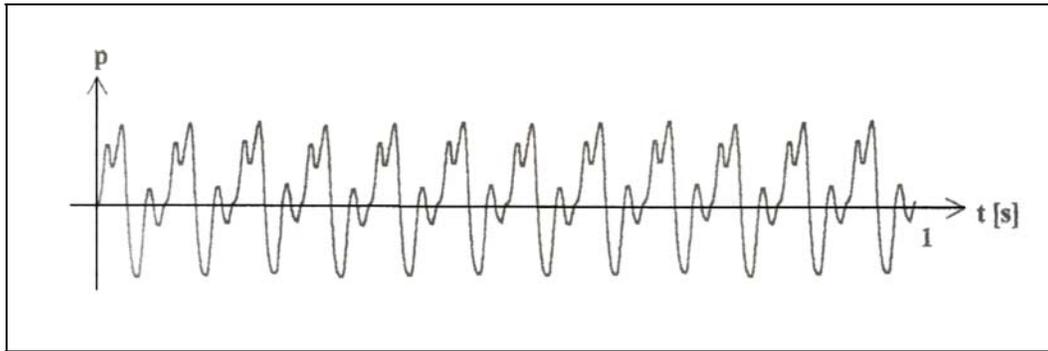


Figura I.4 Significado de la frecuencia en un oscilograma. En la unidad de tiempo, es decir 1s, se cuentan 12 ciclos, por lo cual la frecuencia es de 12 Hz.

I.9 Amplitud

El oscilograma nos permite interpretar fácilmente un parámetro del sonido vinculado a la fuerza o intensidad del mismo: la amplitud, la cual se define como el máximo valor que alcanza una oscilación en un ciclo. La amplitud se denomina también valor de pico o valor pico. En la figura I.5 se indica la amplitud máxima de una onda acústica.

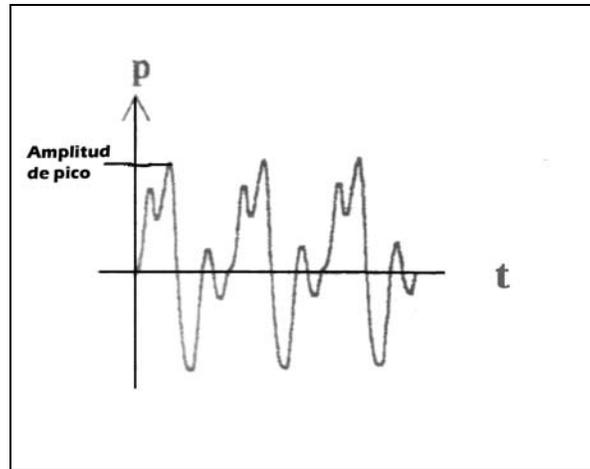


Figura I.5 Amplitud de pico (o amplitud máximo) de una onda acústica.

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 (máximas o mínimas) de los ciclos sucesivos. En la figura I.6 se puede apreciar una onda cuya amplitud varía en el tiempo. En línea de trazos se muestra la envolvente respectiva.

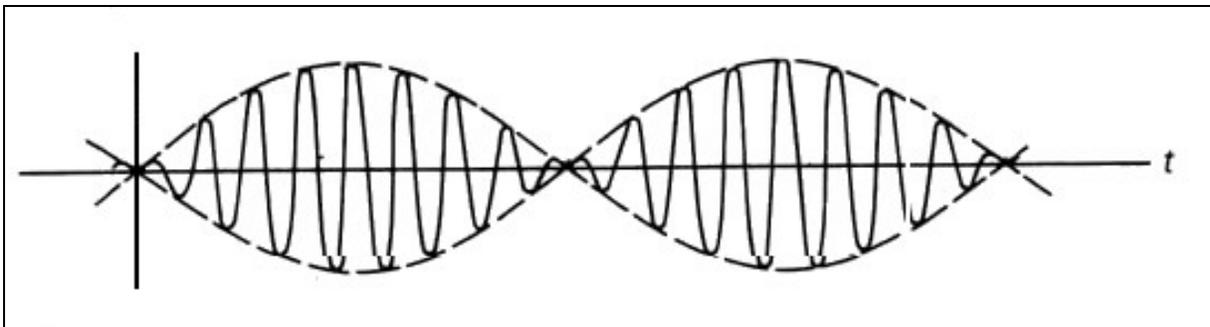


Figura I.6 Una forma de onda con amplitud variable con el tiempo. En línea de trazos se ha dibujado la envolvente, curva que une los picos de cada ciclo.

Veremos que la envolvente es uno de los factores decisivos en la determinación del timbre de una voz o instrumento. El otro factor es el espectro, que veremos también oportunamente.

I.10 Nivel de presión sonora

Para el rango de los sonidos audibles, la presión sonora varía entre los valores extremadamente pequeños (**0.00002 Pa = 20 x 10⁻⁶ Pa**) hasta valores que si bien todavía pequeños, son un millón de veces más grandes que los anteriores (**20 Pa**). Estas cifras son poco prácticas de manejar, por lo cual se ha introducido otra escala que comprime este rango: la escala de **decibeles** (décima parte de un Bell). Para expresar la presión sonora en decibeles, se define una presión de referencia, **P_{ref}**, que es la mínima presión sonora audible (correspondiente al sonido más suave que se pueda escuchar):

$$P_{ref} = 0.00002 \text{ Pa} = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$$

Entonces se define el **Nivel de Presión Sonora, NPS** en inglés se utiliza la sigla SPL (sound pressure level), mediante la siguiente fórmula:

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \quad [\text{dB}] \quad (1.4)$$

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

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{P_{ref}}{P_{ref}} = 20 \log_{10} 1 = 0 \text{ dB}$$

dado que el logaritmo de 1 es 0.

Como segundo ejemplo, consideremos un sonido que tiene una amplitud 1,000 veces mayor que el anterior. Entonces

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{1,000 P_{ref}}{P_{ref}} = 20 \log_{10} 1,000 = 60 \text{ dB}$$

por ser $\log_{10} 1,000 = 3$. Por último, para un sonido más intenso,

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{1,000,000 P_{ref}}{P_{ref}} = 20 \log_{10} 1,000,000 = 120 \text{ dB}$$

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 el **NPS**, es decir el **decibelímetro**, no está graduado en niveles de presión, sino precisamente en **dB**, por lo cual en la práctica no hace falta calcular el valor de NPS a partir de su presión sonora.

En la Tabla I.2 se indican algunos valores de conversión entre presión sonora y nivel de presión sonora.

Tabla I.2 Valor de la presión correspondiente a varios niveles de presión sonora.

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

I.11 Formas de onda

Podemos afirmar que virtualmente cada sonido implica una forma de onda diferente. Sin embargo, existen algunas formas de onda que reciben especial atención, ya sea por su simplicidad o por su utilidad práctica o teórica. La primera de ellas es la **onda cuadrada**, que consiste en dos niveles (generalmente uno positivo y el otro negativo) que se van alternando en el tiempo. Cada uno de ellos permanece un tiempo $T/2$, donde T es el periodo. En la figura I.7 se muestra un ejemplo. Esta onda es importante por su simplicidad geométrica. No existe en la Naturaleza, pero es muy fácil de sintetizar electrónicamente.

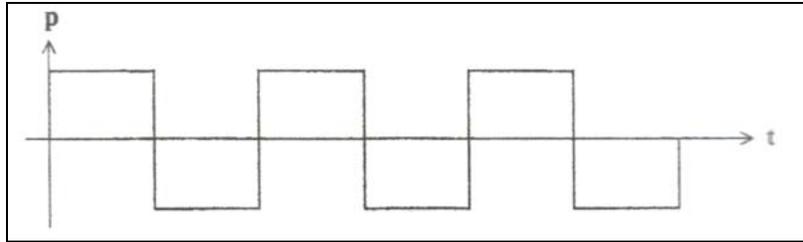


Figura I.7 Tres ciclos de una onda cuadrada.

Una variante de la onda cuadrada es el **tren de pulsos**, en el cual el tiempo de permanencia en cada uno de los dos niveles no es el mismo. Se suele especificar un porcentaje que corresponde a la proporción del periodo en el nivel alto. En la figura I.8 se muestra un tren de pulsos a 25 %.

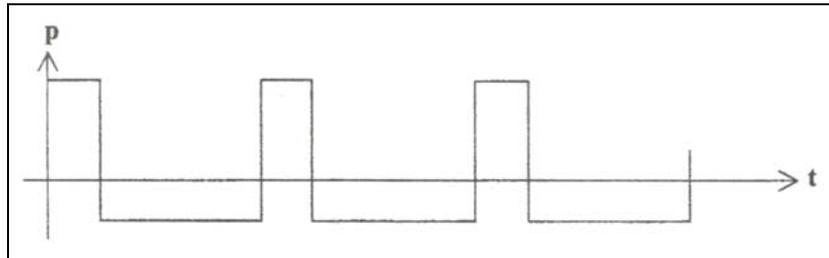


Figura I.8 Tres ciclos de un tren de pulsos al 25%.

Otra forma interesante es la **onda triangular** (figura I.9) está formada por rampas que suben y bajan alternadamente.

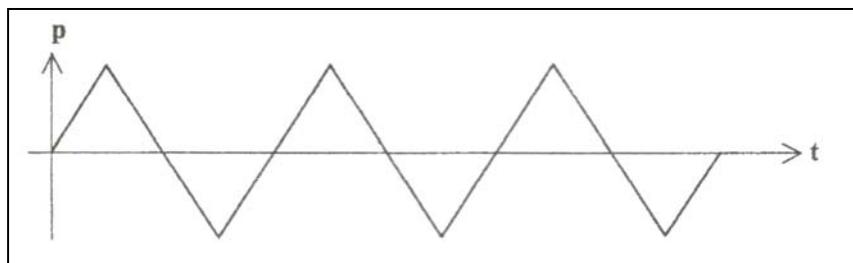


Figura I.9 Tres ciclos de una onda triangular.

La **onda diente de sierra** (figura I.10) tiene una subida rápida y una bajada en forma de rampa o viceversa. Si bien, tampoco es una forma de onda natural, la forma de onda del sonido del violín

guarda cierta similitud con el diente de sierra. Los sonidos también tienen esta forma de onda, que se generan al rozar dos objetos, por ejemplo, el chirrido cuando se frota rápidamente un gis en un pizarrón.

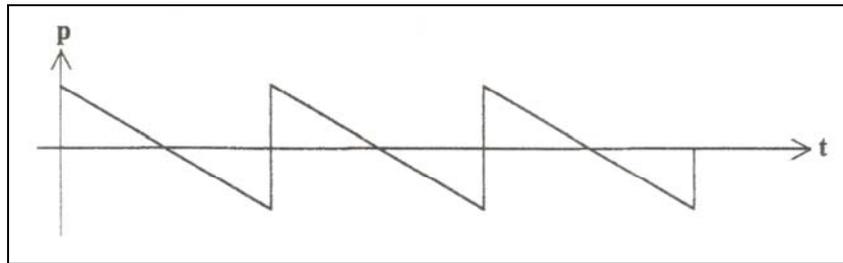


Figura I.10 Tres ciclos de una onda diente de sierra.

Onda Senoidal

Finalmente, tenemos la onda más importante, no sólo en Acústica sino en toda la Física y gran parte de la Matemática: la **onda senoidal** (figura I.11), también denominada **senoide** o **sinusoide**. Si bien, matemáticamente tiene cierta complicación (puede estar representada por la función trigonométrica **seno**), físicamente esta forma de onda corresponde a las oscilaciones más sencillas posibles. Pocos sistemas son tan simples para oscilar senoidalmente. El más conocido es el péndulo: la oscilación de un peso suspendido de un hilo sigue una ley senoidal. En el campo de la música, el diapasón de horquilla produce un sonido puramente senoidal. El silbido es también casi senoidal, y lo mismo ocurre con una flauta ejecutada *piano* (suave). Una cuerda de guitarra punteada muy suavemente en su punto medio también produce un sonido aproximadamente senoidal.

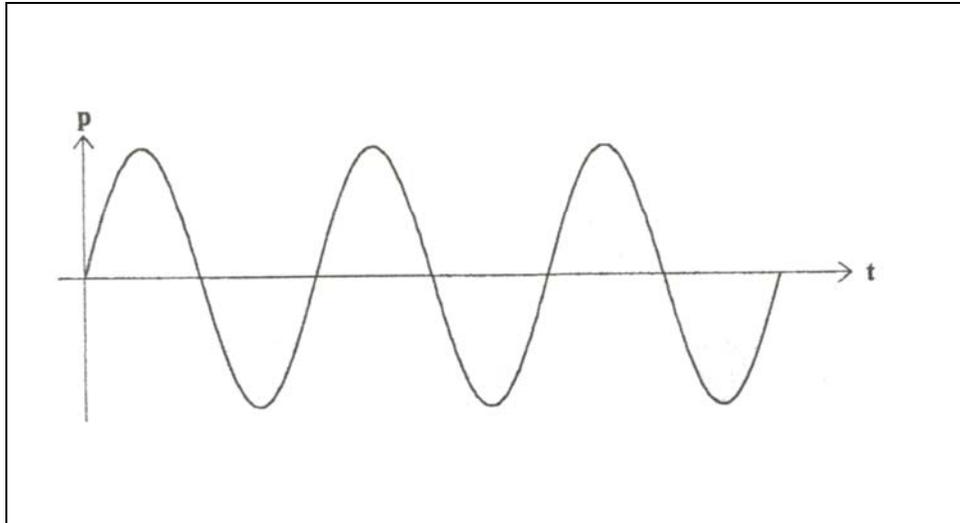


Figura I.11 Tres ciclos de una onda senoidal o senoide.

Pero lo que da mayor importancia todavía a esta forma de onda es el hecho de que cualquier onda periódica puede considerarse como una superposición (suma) de ondas senoidales de distintas frecuencias, todas ellas múltiplos de la frecuencia de la onda (esto es establecido por el Teorema de Fourier). Dichas ondas sinusoides se denominan **armónicos**. Esta superposición no se limita a ser un artificio de análisis de sonido, sino que si se escucha atentamente es perfectamente audible en muchos casos. La onda senoidal es la más simple precisamente porque consta de una sola frecuencia.

I.12 Espectro del sonido

Vimos que cualquier sonido periódico puede representarse como la suma de una serie de armónicos, es decir de sonidos senoidales cuyas frecuencias son de f , $2f$, $3f$, $4f$, $5f$, etc. Por ejemplo, el LA central del piano, cuya frecuencia es de 440 Hz, contiene armónicos de diferentes frecuencias 440 Hz, 880 Hz, 1,320 Hz, 1,760 Hz, 2,200 Hz, etc. Cada uno de éstos armónicos puede tener su propia amplitud. En la figura I.12 a se muestran los primeros armónicos de una

onda cuadrada, y en la figura I.12 b se ha obtenido su suma, que según se aprecia se va aproximando a una onda cuadrada.

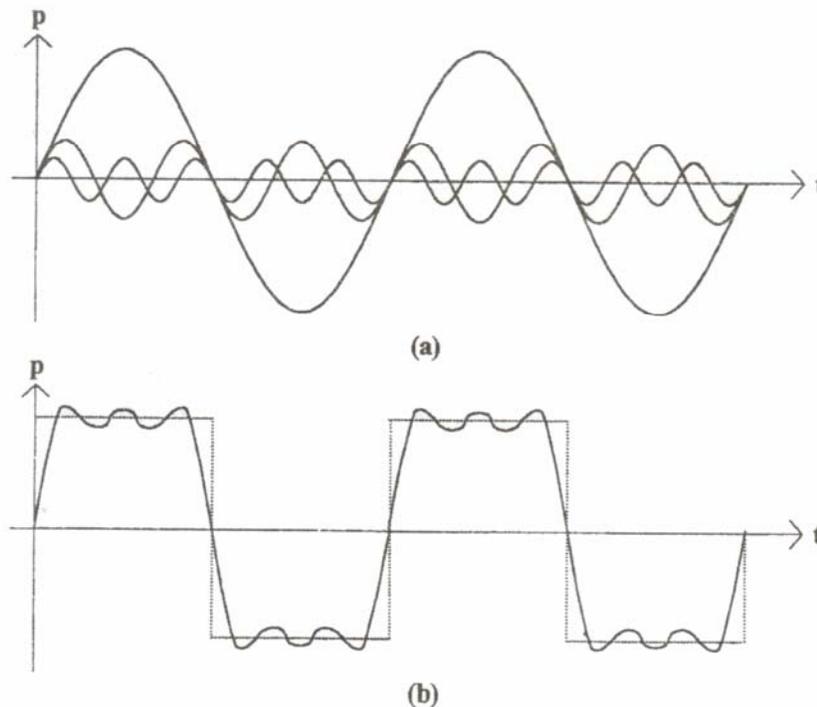


Figura 1.12 (a) Los tres primeros armónicos no nulos de una onda cuadrada de frecuencia f_0 , cuyas frecuencias son f_0 , $3f_0$ y $5f_0$. **(b)** El resultado de superponer tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

La información sobre las frecuencias que tiene un determinado sonido y sus respectivas amplitudes constituyen lo que se denomina el **espectro** del sonido. El espectro se puede especificar en forma de tabla, o se puede representar gráficamente mediante un **espectrograma**, que es un gráfico con dos ejes: el horizontal, graduado en frecuencia, y el vertical, en amplitud. En la Tabla I.3 se indican los primeros armónicos para las ondas cuadradas, triangular y diente de sierra, suponiendo que la amplitud de la onda es 1 en los tres casos. En la figura I.13 se ha

representado un espectrograma para una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz, incluyendo hasta el armónico 7.

Tabla I.3 Amplitud de los primero 7 armónicos del espectro de las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra.

ARMÓNICO N°	CUADRADA	TRIANGULAR	DIENTE DE SIERRA
1	1,27	0,81	0,64
2	0	0	0,32
3	0,42	0,09	0,21
4	0	0	0,16
5	0,025	0,32	0,13
6	0	0	0,11
7	0,18	0,17	0,091

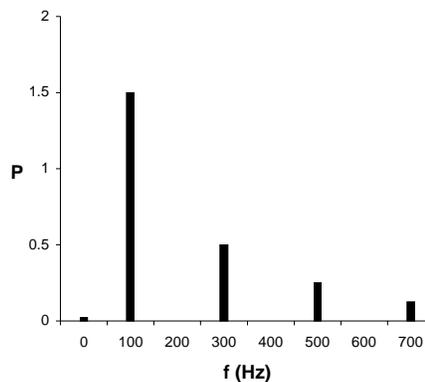


Figura I.13 Espectro de una onda cuadrada de amplitud 1 y frecuencia 100 Hz. Esta onda tiene únicamente armónicos impares

Así como la amplitud de un sonido puede variar en el tiempo de acuerdo con su envolvente, también es posible que los diversos armónicos que integran determinada forma de onda posean sus correspondientes envolventes, que no tienen por qué ser iguales. De hecho, esto es lo que sucede en la mayoría de los sonidos naturales. Un caso bastante común es que los armónicos superiores (los de frecuencias más altas) se extingan antes que los de menor frecuencia, quedando después de unos segundos un sonido prácticamente senoidal. Esto sucede por ejemplo en el

piano, cuyos sonidos comienzan con un gran contenido armónico (en cantidad y amplitud), lo cual se manifiesta con una sonoridad brillante e incisiva. A medida que transcurre el tiempo, los armónicos de mayor frecuencia van desapareciendo, y el sonido se vuelve más opaco.

I.12.1 Espectros inarmónicos

Hasta ahora hemos analizado el caso de **espectros armónicos**, es decir en los cuales las frecuencias eran múltiplos de cierta frecuencia, denominada **frecuencia fundamental**. No hay impedimento, sin embargo, para que los “armónicos” sean de cualesquier frecuencia, por ejemplo, 100 Hz, 235 Hz y 357 Hz. De hecho, muchos sonidos naturales son de ésta última clase, por ejemplo el sonido de las campanas, o el correspondiente a diversos 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 éstos sonidos. A diferencia de lo que ocurre en los espectros armónicos, las **líneas espectrales** no están equiespaciadas.

En el caso de los espectros inarmónicos también puede existir una variación en el tiempo, inclusive, en este caso, variar no solo la amplitud de los sonidos parciales sino también la frecuencia. En los sonidos reales esta variación existe, aunque normalmente es pequeña, esto se

debe a que la frecuencia con que vibran algunos cuerpos físicos varían ligeramente con la amplitud de vibración, por lo cual al ir disminuyendo esta amplitud, su frecuencia varía con ella.

I.12.2 Espectros continuos

Existe aún otro tipo de sonidos, formado por una cantidad muy grande de parciales o muy próximos entre sí, que se denominan genéricamente ruido. Algunos ejemplos de este, 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 presentes, 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 I.14) denominada densidad espectral, p^2 .

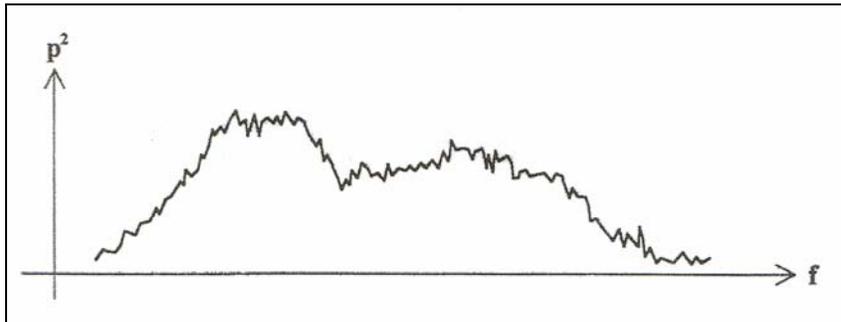


Figura I.14 Ejemplo de espectro continuo de un ruido. En el eje horizontal se indica la frecuencia, y en el eje vertical la densidad espectral, que representa la energía en función de la frecuencia.

Existen dos tipos de ruido que tienen importancia específica en Acústica: el **ruido blanco** y el **ruido rosa**. También se menciona a veces el **ruido browniano**. El **ruido blanco** (figura I.15 a) 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 del 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** (figura I.15 b) contiene mayor proporción de bajas frecuencias, es decir, es el que se mantiene constante en todo el rango de frecuencias audibles. Tiene la particularidad de que en cada **octava** (el intervalo de frecuencias desde un *do* al siguiente, o desde un *re* al siguiente, etc, es de 1:2 en frecuencia) tiene la misma **energía sonora**. El ruido rosa tiene aplicaciones 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.

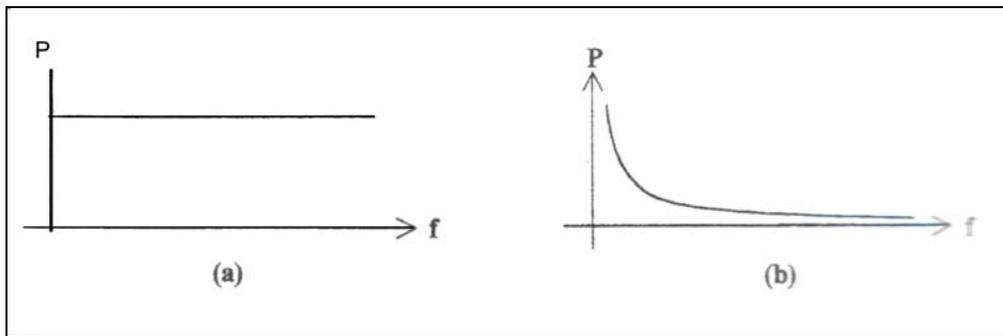


Figura I.15 (a) Densidad espectral del ruido blanco. (b) Densidad espectral del ruido rosa