# Capítulo 1

# Acústica Física

## 1.1. Introducción

La **Acústica** es la disciplina que se ocupa de estudiar el sonido en sus diversos aspectos. Se puede dividir en una gran cantidad de subdisciplinas, algunas de las cuales se listan en la **Tabla 1.1**. Nosotros nos ocuparemos brevemente de sólo de las cuatro primeras de éstas, a saber: la acústica física, la psicoacústica, la acústica musical y la

**Tabla 1.1.** Algunas subdisciplinas 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 salas y su influencia sobre la escucha de la palabra y la música** |
| **Bioacústica** | **Estudio del efecto de los sonidos sobre los seres vivientes, y de los sonidos producidos por éstos** |
| **Acústica fisiológica** | **Estudio del funcionamiento del aparato auditivo, desde la oreja hasta la corteza cerebral** |
| **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 las 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** |
| **Mediciones acústicas** | **Técnicas de medición de diversos parámetros acústicos como frecuencia, intensidad, espectro, etc.** |

acústica arquitectónica. En este primer capítulo nos dedicaremos a los rudimentos de la acústica física, es decir el estudio de los fenómenos sonoros por medio de modelos físicos y matemáticos.

## 1.2. 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 1.1**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, pero con la particularidad de que están homogéneamente repartidas en el interior del tubo. 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**).

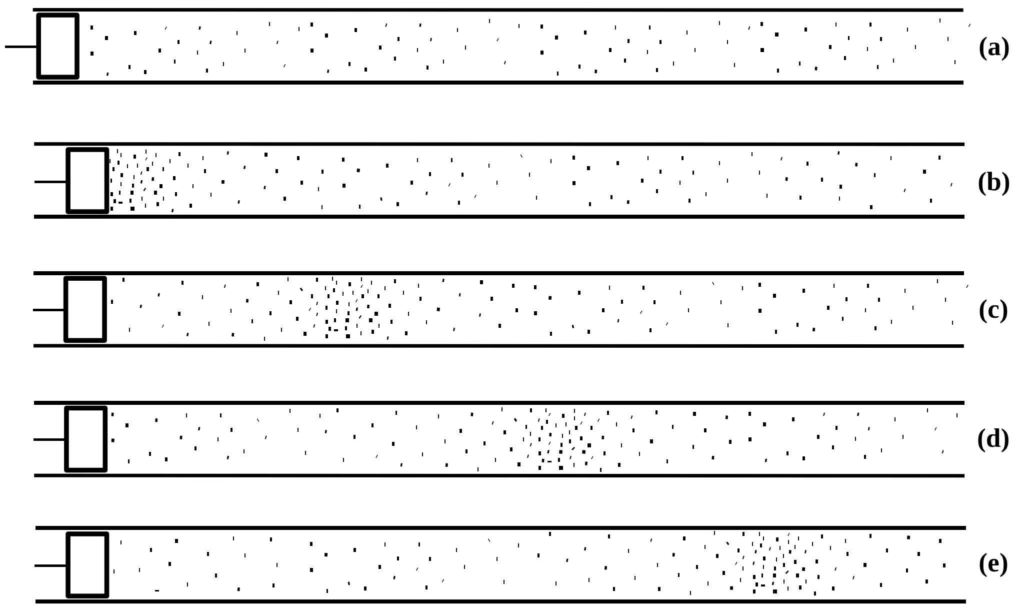
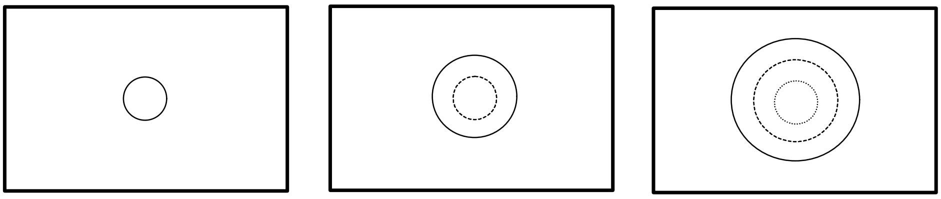



**Figura 1.1.** Propagación de una perturbación en un tubo. **(a)** El aire en reposo (moléculas repartidas uniformemente). **(b)** Ante una perturbación el aire se concentra cerca del pistón. **(c)**, **(d)**, **(e)** La perturbación se propaga alejándose de la fuente.

Supongamos ahora que se desplaza rápidamente el pistón hacia el interior del tubo (**Figura 1.1**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 comprimiendo a su vez el aire que se encuentra próximo a él (**Figura 1.1**c). Esta nueva compresión implica, otra vez, una tendencia a descomprimirse, que se efectiviza a costa de comprimir el aire contiguo (**Figura 1.1**d). El proceso se repite así en forma permanente, 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, como se aprecia en la **Figura 1.2**.



**(a)** **(b)** **(c)**

**Figura 1.2**. Una perturbación de la superficie del agua en una pileta inicialmente en calma se propaga como una circunferencia de radio cada vez mayor.

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.

## 1.3. Velocidad del sonido

Ahora nos preguntamos qué tan rápido se aleja la onda de la fuente. La respuesta es que el sonido se propaga con una velocidad **c** que en el aire a **23 ºC** vale

$$\mathbf{c = 345\ m/s}\ ,$$

o bien

$$\mathbf{c = 1242\ km/h}\ .$$

Esta velocidad varía algo con la temperatura (un **0,17 %/ºC**), por eso en diversos textos pueden encontrarse valores ligeramente diferentes. 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 m** de distancia de otra (aproximadamente una cuadra), un grito de la primera demorará, a causa de esta 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 apreciable en llegar a nosotros. Así, si cronómetro en mano comprobamos que el trueno se escucha **5 s** después de ver un relámpago, conociendo la velocidad del sonido podemos calcular que el relámpago se produjo a una distancia

$$\mathbf{d = 345\ m/s \times 5\ s = 1725\ m = 1{,}725\ km.}$$

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 tiempo en llegar a la superficie, se reflejará en ella, y volverá demorando otro tiempo adicional. El resultado será que se escucha, unos instantes después, que la pared “repite” el grito. Más adelante veremos ejemplos correspondientes a los sistemas de sonido, en los cuales a causa de la distancia entre los parlantes y el público se producen retardos que es preciso corregir.

## 1.4. Sonidos periódicos

El fenómeno sonoro que analizamos anteriormente (**Figura 1.1**) 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 1.3** 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 perturbación ha recorrido cierta distancia, el pistón se mueve nuevamente 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 (e), se agregan nuevas perturbaciones, las cuales a su vez se propagarán con idéntica velocidad, y así sigue 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 **campo sonoro** para referirse a la forma en que se distribuye el sonido en los diversos puntos de un determinado espacio, por ejemplo dentro de una sala o al aire libre.

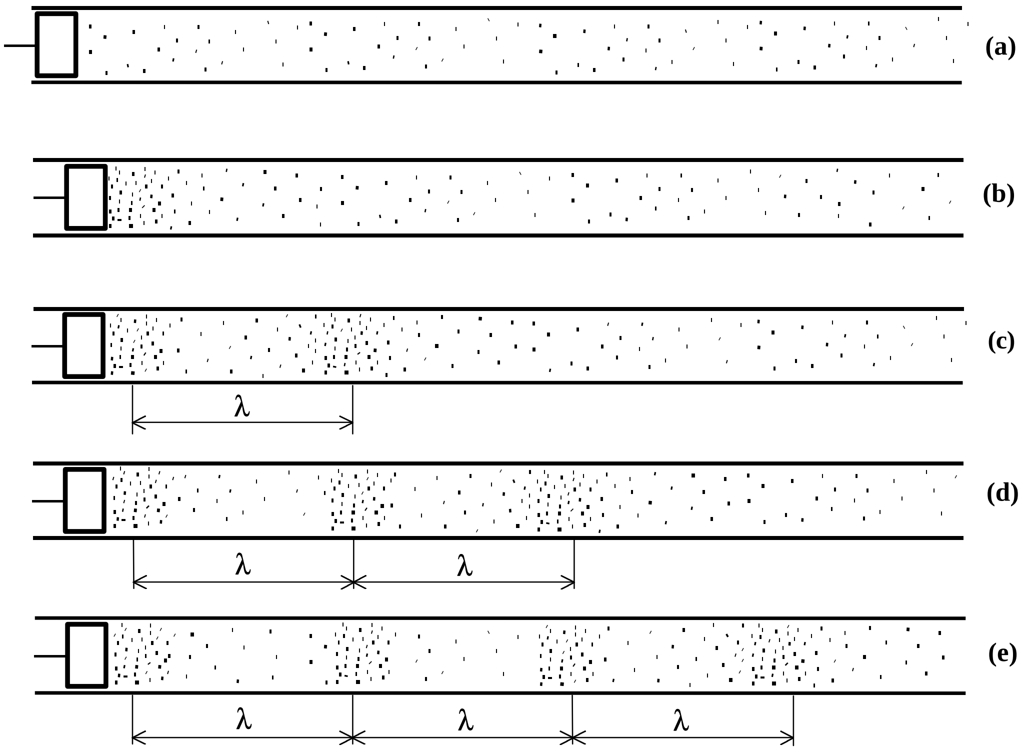



**Figura 1.3.** Un sonido consecuencia de una perturbación repetitiva, es decir, **periódica**. **(a)** El aire en reposo. **(b)** Primera perturbación. **(c)** Segunda perturbación, cuando la primera ha recorrido una distancia λ (longitud de onda). **(d)** Tercera perturbación, cuando la primera ha 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.

## 1.5. 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 1.3**). 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).

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 **cm**, se ven considerablemente atenuados.

Otra situación en la cual la longitud de onda juega un papel importante es en la eficiencia de los altavoces. Cuando la longitud de onda $\lambda$ 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 graves).

Por último, veremos más adelante que la respuesta de los micrófonos se altera para aquellos sonidos de longitud de onda $\lambda$ comparable con el tamaño del micrófono.

## 1.6. 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.

## 1.7. Frecuencia

El tercer parámetro, uno de los más fundamentales en Acústica, es la **frecuencia**, **f**. Se define como *la cantidad de ciclos por segundo*, o lo que es lo mismo, *la cantidad de perturbaciones 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** (kilohertz, es decir **1.000 Hz**).

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

$$\mathbf{f} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{T}}$$

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{f}}$$

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**. Si, en cambio 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:

$$\lambda = \frac{\mathbf{c}}{\mathbf{f}},$$

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

$$\lambda = \frac{\mathbf{345}}{\mathbf{500}} = \mathbf{0{,}69\ m} = \mathbf{69\ cm}.$$

Como segundo ejemplo, la voz masculina (al hablar normalmente) tiene una frecuencia de unos **120 Hz**, lo cual corresponde, según la fórmula anterior, a una longitud de onda de **2,88 m**.

## 1.8. 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 referiremos 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 que se perciben como tales (después de eso se perciben como dolor) implican un aumento de unos **20 Pa.** Para distinguir este incremento de la presión atmosférica en ausencia de sonido, se lo 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

$$\mathbf{p} = \mathbf{100.008\ Pa} - \mathbf{100.000\ Pa} = \mathbf{8\ Pa}.$$

El trabajar con la presión sonora en lugar de la presión total, nos ahorra tener que arrastrar 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**), se denomina **umbral auditivo**.

## 1.9. Representación gráfica del sonido

Hasta ahora no habíamos tenido 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 1.4**) en un par de ejes correspondientes al tiempo (eje horizontal) y a la presión sonora (eje vertical).

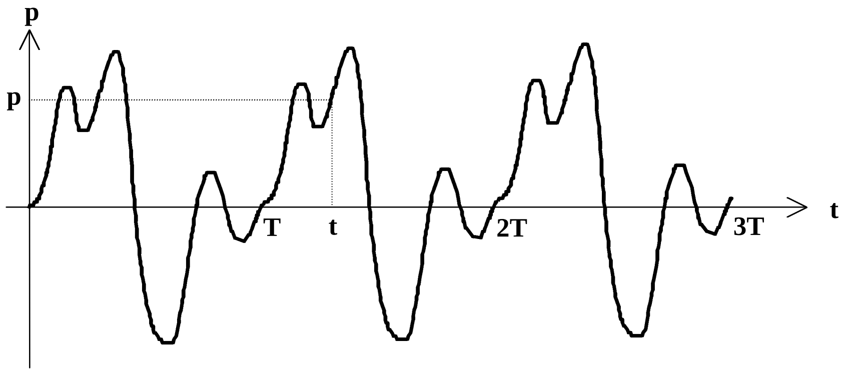



**Figura 1.4.** El oscilograma de un sonido, en el cual pueden apreciarse 3 ciclos o periodos completos del mismo. En el eje horizontal se representa el tiempo y en el eje vertical la presión sonora. Obsérvese que la forma de onda es en este caso relativamente compleja.

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 1.4** se puede apreciar que **T** es la duración de cada ciclo o porción repetitiva de la onda. En la **Figura 1.5**, se ha dibujado la onda durante un tiempo de **1 s** (en otra escala). Dado que hay **12** ciclos en dicho tiempo, la frecuencia es de **12 Hz**.

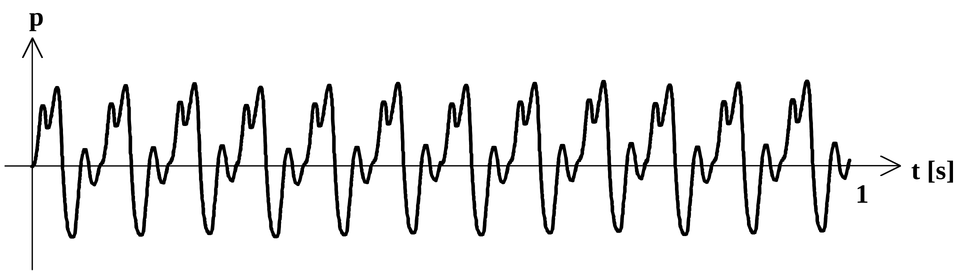
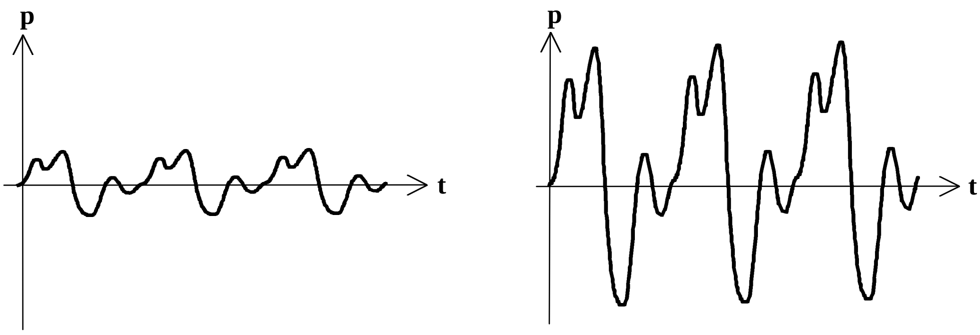



**Figura 1.5**. Significado de la frecuencia en un oscilograma. En la unidad de tiempo, es decir **1 s**, se cuentan **12** ciclos, por lo cual la frecuencia es de **12 Hz**.

## 1.10. Amplitud

El oscilograma nos permite interpretar fácilmente un parámetro del sonido vinculado a la *fuerza* o *intensidad* del mismo: la **amplitud**. La **amplitud** 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 1.6** vemos la misma forma de onda con dos amplitudes diferentes.




**(a)** **(b)**

**Figura 1.6.** Dos ondas con igual frecuencia y forma de onda, pero con diferente **amplitud. (a)** Pequeña amplitud. **(b)** Gran amplitud.

## 1.11. 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 l*a 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.

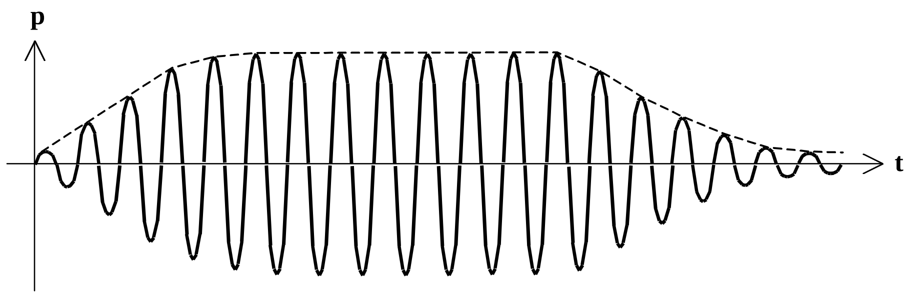



**Figura 1.7.** Una forma de onda con amplitud variable con el tiempo. En línea de trazos se ha dibujado la **envolvente**, curva que une los picos de cada ciclo.

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.

## 1.12. Nivel de presión sonora

Para el rango de los sonidos audibles, la presión sonora varía entre valores extremadamente pequeños (**0,00002 Pa** $=$ **$20 \times 10^{-6}$ 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**. Para expresar una presión sonora en decibeles, se define primero una presión de referencia $\mathbf{P_{ref}}$ que es la mínima presión sonora audible (correspondiente al sonido más suave que se puede escuchar):

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

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

$$\mathbf{NPS = 20\ \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} \qquad [dB]}\ ,$$

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

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

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

$$\mathbf{NPS = 20\ \log_{10} \frac{1000\ P_{ref}}{P_{ref}} = 20\ \log_{10} 1000 = 60\ dB}\ ,$$

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

$$\mathbf{NPS = 20\ \log_{10} \frac{P}{P_{ref}} = 20\ \log_{10} 1.000.000 = 120\ dB}\ .$$

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.

En la **Tabla 1.2** se indican algunos valores de conversión entre presión sonora y nivel de presión sonora.

**Tabla 1.2.** 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 |

## 1.13. Algunas formas de onda

Podemos afirmar que virtualmente cada sonido implica una forma de onda diferente. Existen sin embargo 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 1.8** se muestra un ejemplo. Esta onda es importante por su simplicidad geométrica. No existe en la Naturaleza, pero es muy fácil de sintetizar electrónicamente.

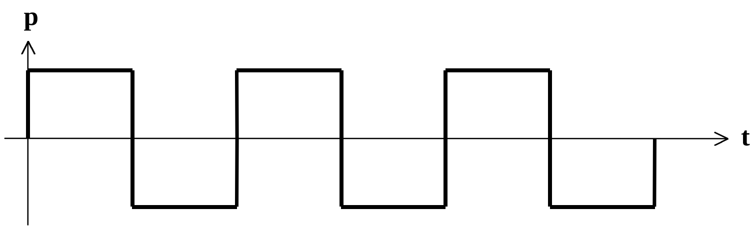



**Figura 1.8**. Tres ciclos de una onda cuadrada.

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 1.9** se muestra un tren de pulsos al **25%**.

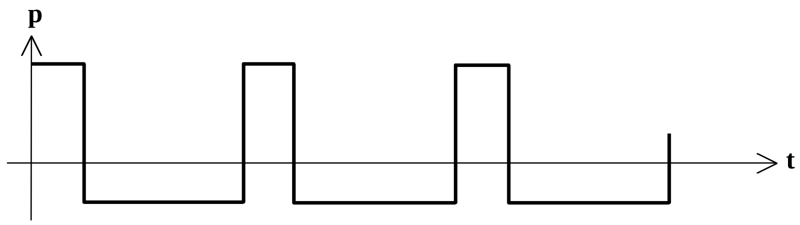



**Figura 1.9.** Tres ciclos de un tren de pulsos al **25%**.

Otra forma de onda interesante es la **onda triangular** (**Figura 1.10**). Está formada por rampas que suben y bajan alternadamente.

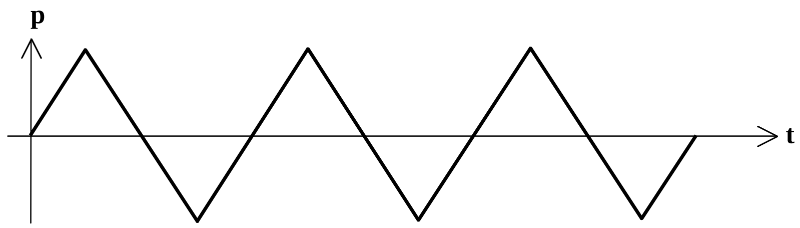



**Figura 1.10.** Tres ciclos de una onda triangular.

La onda **diente de sierra** (**Figura 1.11**) 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 la diente de sierra. También tienen

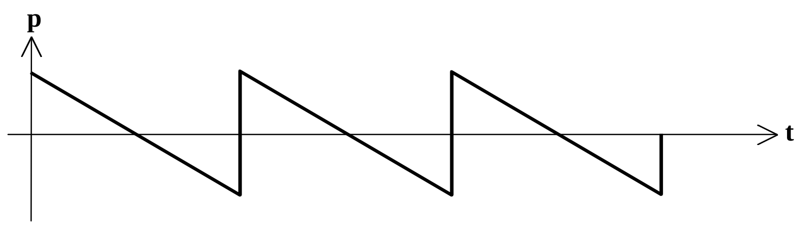



**Figura 1.11.** Tres ciclos de una onda diente de sierra

esta forma de onda los sonidos que se generan al rozar dos objetos, por ejemplo el chirrido cuando se frota rápidamente una tiza en una pizarra.

## 1.14. 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 1.12**), también denominada **senoide** o **sinusoide**. Si bien matemáticamente tiene cierta complicación (está representada por la función trigonométrica **seno**), físicamente esta forma de onda corresponde a las oscilaciones más sencillas posibles. Pocos sistemas son tan simples como 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 (no confundir con el corista o afinador de banda) produce un sonido casi 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.

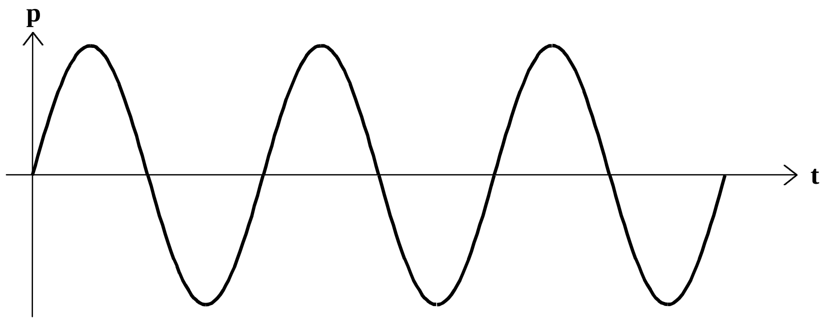



**Figura 1.12.** Tres ciclos de una onda senoidal o senoide.

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 (propiedad conocida como Teorema de Fourier). Dichas ondas se llaman **armónicos**. Esta superposición no se limita a ser un artificio de análisis del 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*.

## 1.15. 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 **f**, **2f**, **3f**, **4f**, **5f**, etc. Por ejemplo, el **LA** central del piano, cuya frecuencia es de **440 Hz**, contiene armónicos de frecuencias **440 Hz**, **880 Hz**, **1320 Hz**, **1760 Hz**, **2200 Hz**, etc. Cada uno de estos armónicos puede tener su propia amplitud. En la **Figura 1.13**a se muestran los primeros armónicos de una onda cuadrada, y en la **Figura 1.13**b se ha obtenido su suma, que según se aprecia se va aproximando a la onda cuadrada.

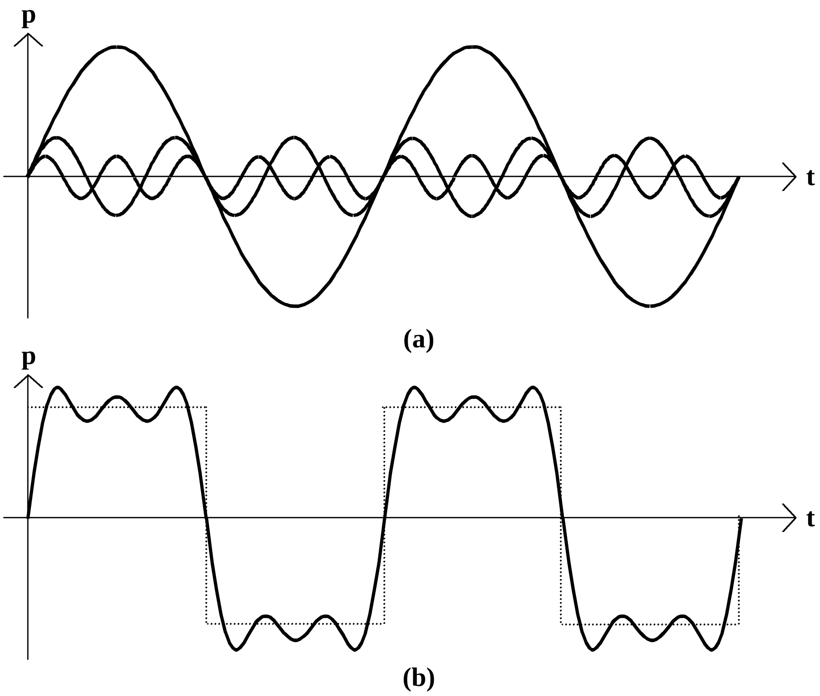



**Figura 1.13. (a)** Los tres primeros armónicos no nulos de una onda cuadrada de frecuencia $\mathbf{f_o}$, cuyas frecuencias son $\mathbf{f_o}$, $\mathbf{3f_o}$ y $\mathbf{5f_o}$. **(b)** El resultado de superponer los tres armónicos, comparado con la onda cuadrada. Si bien tres armónicos son poca cantidad, vemos que comienza a esbozarse la forma de la onda cuadrada.

La información sobre las frecuencias que contiene 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 1.3** se indican los primeros armónicos para las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra, suponiendo que la amplitud es, en

**Tabla 1.3.** Amplitud de los primeros 7 armónicos del espectro de las ondas cuadrada, triangular y diente de sierra.

| ARMÓNICO Nº | 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** | **0,25** | **0,032** | **0,13** |
| **6** | **0** | **0** | **0,11** |
| **7** | **0,18** | **0,017** | **0,091** |

los tres casos, **1**. En la **Figura 1.14** se ha representado el espectrograma para una onda cuadrada de amplitud **1** y frecuencia **100 Hz**, incluyendo hasta el armónico 7.

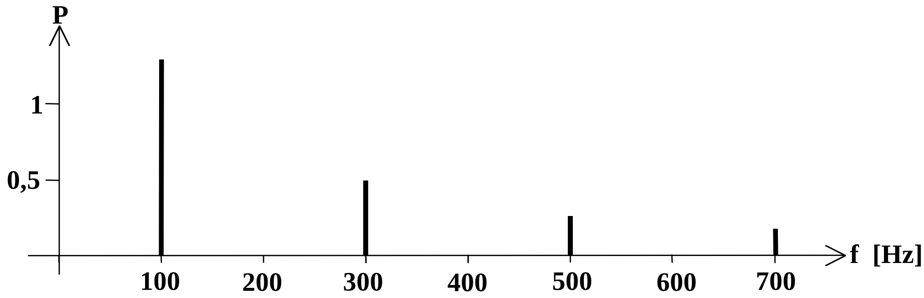



**Figura 1.14.** Espectro de una **onda cuadrada** de amplitud **1** y frecuencia **100 Hz**. Esta onda tiene únicamente armónicos impares.

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 al cabo 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 como 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.

Agregando un tercer eje para representar el tiempo (lo cual obliga a una representación tridimensional, a menudo hecha sobre el papel o la pantalla recurriendo a la perspectiva), es posible representar gráficamente la variación temporal de cada armónico, como se muestra en la **Figura 1.15**.

## 1.16. Espectros inarmónicos

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.

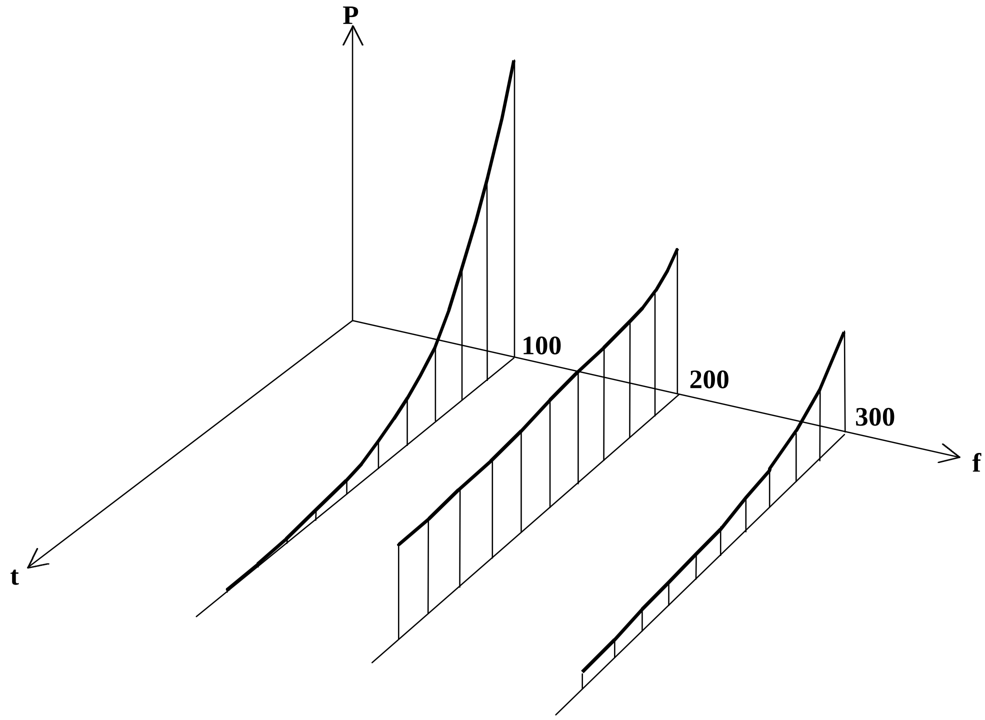



**Figura 1.15.** Espectrograma tridimensional en el cual se pone de manifiesto la evolución temporal de cada armónico. En este ejemplo se ha tomado una forma de onda de **100 Hz** con sólo 3 armónicos. El armónico 1 (**100 Hz**) se extingue rápidamente, el armónico 2 (**200 Hz**) se extingue muy lentamente, y el armónico 3 (**300 Hz**) se extingue moderadamente rápido. Al cabo de algún tiempo, por consiguiente, predomina ampliamente el segundo armónico.

En el caso de los espectros inarmónicos *también puede existir una variación en el tiempo*, pudiendo en este caso inclusive *variar no sólo la amplitud de los sonidos parciales sino también la frecuencia*. En los sonidos reales esta variación existe, aunque normalmente es pequeña. Se debe a que la frecuencia con que vibran algunos cuerpos físicos varía ligeramente con la amplitud de vibración, por lo cual al ir disminuyendo esta amplitud, su frecuencia varía con ella.

## 1.17. Espectros continuos

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 cassette 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**, $\mathbf{p^2}$.

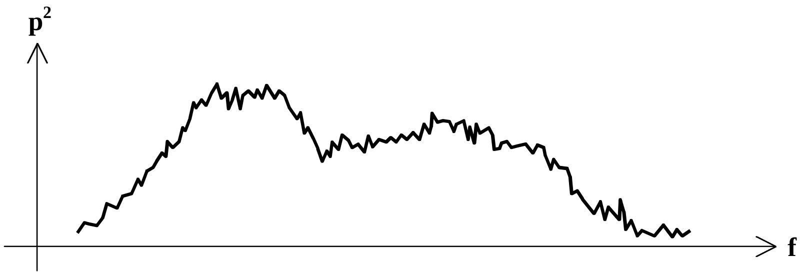



**Figura 1.16.** Ejemplo de espectro continuo de un ruido. En el eje horizontal se indica la frecuencia, y en el vertical la **densidad espectral**, que representa la energía en función de la frecuencia.

Existen dos tipos de ruido que tienen importancia específica en Acústica: el **ruido blanco** y el **ruido rosa**. También se menciona a veces el **ruido browniano**. El **ruido blanco** (**Figura 1.17**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 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** (**Figura 1.17**b) 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

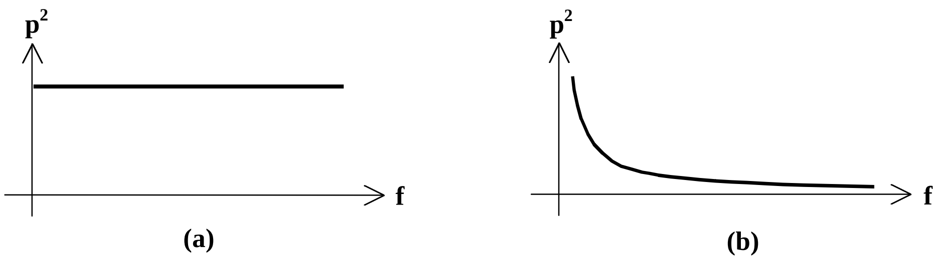



**Figura 1.17. (a)** Densidad espectral del **ruido blanco**. **(b)** Densidad espectral del **ruido rosa**.

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.