



# 1.

## Nociones de acústica

---

### 1.1. Las ondas sonoras

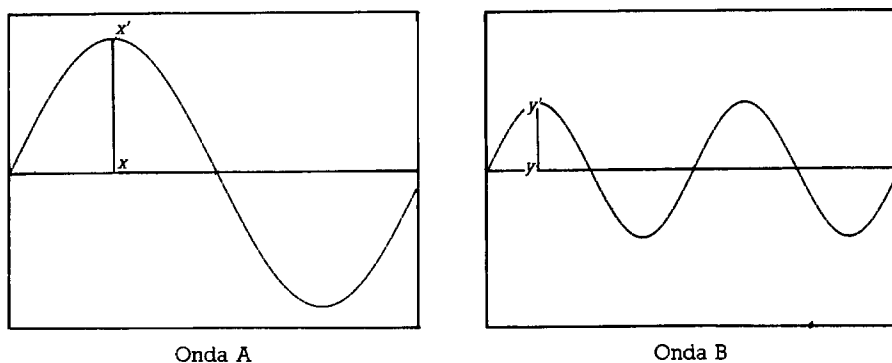
**1.1.1.** Los sonidos del habla no son más que un pequeño grupo dentro del conjunto enorme de sonidos que el oído humano es capaz de percibir. Todos ellos tienen una causa última común: el movimiento. Evidentemente, este movimiento puede ser de muchos tipos según sea producido por una *fente* de sonido o por otra. Cuando hacemos sonar las cuerdas de una guitarra, por ejemplo, su movimiento produce un resultado muy diferente al que se obtiene moviendo un diapasón o dejando caer un jarrón al suelo. En todos los casos, sin embargo, el impulso motriz que hemos transmitido a la *fente del sonido* (las cuerdas de la guitarra, el diapasón o el jarrón) ha causado una perturbación considerable en la masa de aire circundante. Esta alteración se irá propagando desde las zonas más cercanas a la fuente hasta la más lejanas, para alcanzar finalmente nuestro tímpano. Así pues, desde el momento en que se ha producido el movimiento original hasta que nosotros percibimos el sonido a que da lugar, transcurre un cierto periodo de tiempo, en la mayor parte de las ocasiones tan breve que nos resulta imperceptible.

La velocidad de transmisión de esta perturbación es, en efecto, muy elevada y depende del medio a través del cual se produzca. Es sabido que el agua es, por ejemplo, mejor transmisor que el aire: la velocidad de propagación llega, en la primera, a los 1.500 m/seg., en tanto que, a través del aire, es de 348 m/seg., aproximadamente.



Esta onda reproduce el movimiento ondulatorio más simple y es exactamente del mismo tipo que la que obtendría un matemático al trazar el gráfico de los valores del seno de un ángulo indefinidamente en aumento a partir de  $0^\circ$  (v. Brosnahan y Malmberg: 1970, 12). Por ello, es conocida con el nombre de *onda sinusoidal* o *periódica simple* (véase más adelante, apartado 1.1.4). Por supuesto, en la práctica es difícil constatar la realización de ondas tan simples como la que aquí presentamos: los sonidos con los que estamos más familiarizados, y particularmente los lingüísticos, responden a movimientos ondulatorios mucho más complejos que el de nuestro diagrama, como posteriormente veremos. No obstante, sobre este esquema, hasta cierto punto teórico, podemos estudiar los principales rasgos que caracterizan a una vibración.

**1.1.4.** Consideremos otra vez la onda de la Fig. 1.2, pero comparándola ahora con otra un poco diferente, tal como se hace en la Fig. 1.3.



**Figura 1.3.**

Es, en primer lugar, evidente que nuestras dos ondas, a las que hemos llamado *A* y *B*, son dos *sinusoides*, es decir, dos movimientos oscilatorios sumamente simples. En ambas, a un aumento de presión le sucede un descenso de ésta, esto es, a la fase de compresión le sucede la de rarefacción. La suma de estos dos momentos es lo que denominamos *ciclo*. En otras palabras, un ciclo es una vibración completa o, si se prefiere, la variación completa desde la *cresta* de la onda (máxima compresión) hasta el *valle* de la onda (máxima rarefacción) y nuevamente a la cresta (Borzzone de Manrique: 1980, 20).

El ciclo de la onda *A* tarda en realizarse 0,01 seg., en tanto que en

ese lapso la onda *B* ha realizado dos vibraciones completas. Decimos, entonces, que el *período* de la onda *A*, esto es, el tiempo que tarda en completar un ciclo, es el doble del de la onda *B*. Aquella realizará en la unidad de tiempo considerada —convencionalmente el segundo— la mitad de ciclos que ésta y por ello decimos que su *frecuencia* es menor. En efecto, la frecuencia es el número de ciclos completos que tienen lugar en un segundo y se mide en *Hertzios* (abreviado *c.p.s.* o *Hz*). Lógicamente, el período y la frecuencia guardan entre sí una relación inversamente proporcional: cuanto mayor sea el período, menor será la frecuencia y viceversa.

Cuando una onda presenta una frecuencia muy baja (como en el caso de los *infrasonidos*), el oído humano no puede percibirla. Al pasar las hojas de un libro, por ejemplo, producimos una perturbación en el aire que a veces incluso llegamos a sentir, pero que no oímos porque su frecuencia no es lo suficientemente alta. Nuestros oídos interpretarán como sonidos las frecuencias comprendidas entre los 16-20 *c.p.s.* y los 20.000 *c.p.s.* Por encima de este límite (*ultrasonidos*) tampoco percibiremos nada, quizá porque nuestro tímpano no puede vibrar a tales velocidades (véase Capítulo 4, apartado 4.1.2). La mayoría de las frecuencias importantes en el habla se sitúan entre los 50 y los 8.000 Hz.

Volviendo a nuestras dos ondas, *A* y *B*, comprobamos que mantienen entre sí todavía una diferencia más. La masa que está vibrando y describiendo con su movimiento el perfil de la onda *A* (pensemos que se trata de una de las nueve partículas de la Fig. 1.1) se separa más de su punto de reposo que aquella otra cuya vibración representa la onda *B*. La primera recorre, aproximadamente, el doble de la distancia que se aleja la segunda. Por ello se dice que la onda *A* tiene mayor *amplitud* que la onda *B*. La amplitud se define como el máximo desplazamiento o *elongación* de un cuerpo en vibración con respecto a su punto de reposo. En nuestro ejemplo, la amplitud de la onda *A* es la distancia  $x-x'$  y la de la onda *B* es  $y-y'$ .

A pesar de todos estos rasgos que las distinguen, las dos ondas tienen también, como sinusoides que son, una propiedad común: ambas son *periódicas* o *repetitivas*. Una onda periódica es aquella en la que el mismo perfil del ciclo se repite a intervalos de tiempo regulares. Lógicamente, todas las ondas sinusoidales son periódicas, pero existen otros muchos sonidos periódicos —como veremos en el siguiente apartado— que no presentan esta forma tan simple. Tenemos un ejemplo en la Fig. 1.4, donde hemos incluido, asimismo, el perfil de una onda *aperiódica* o *no repetitiva*, con sus alteraciones características, para que pueda apreciarse la diferencia entre ambos tipos de oscilaciones.

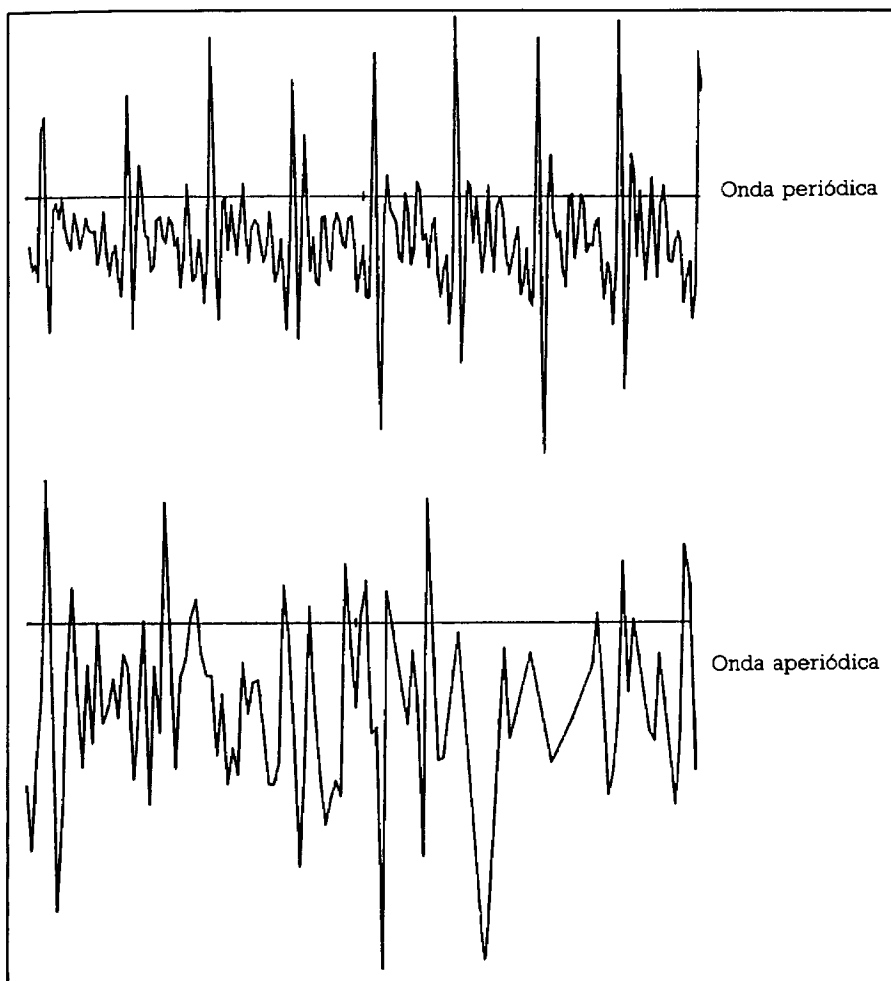


Figura 1.4.

Estrictamente hablando, cualquier sonido que consideremos posee una onda aperiódica, porque las variaciones de la presión del aire no se repiten exactamente igual de forma indefinida. A medida que los sonidos se van amortiguando, la amplitud disminuye y los ciclos no son ya idénticos. Sin embargo, la práctica habitual es desatender estos matices, puesto que no suponen errores importantes y, sin ellos, la descripción acústica resulta más simplificada. Así pues, seguiremos dividiendo las ondas en periódicas y aperiódicas (v. Ladefoged: 1962, 31 y 48).

1.1.5. En el apartado anterior ya señalábamos que existen ondas periódicas no sinusoidales. Estas últimas no son, en realidad, sino el tipo más sencillo de ondas repetitivas y, como también dijimos, no abundan entre los sonidos que nos resultan familiares. En concreto, las ondas sonoras que genera nuestro aparato vocal y que aquí nos interesan casi nunca son sinusoidales (la correspondiente a un silbido sería quizá la más similar en su forma acústica a una sinusoidal). No obstante, cualquier onda periódica que podamos imaginar, como la de la Fig. 1.4, por ejemplo, está formada por la combinación de dos o más ondas sinusoidales. En este sentido, se la denominará *onda compleja*.

Cuanto más compleja es una onda, más componentes sinusoidales o *armónicos* la conforman y más complicados son los movimientos de las partículas de aire que le han dado origen. Ello es así porque los cuerpos elásticos vibran simultáneamente de distinto modo a como lo haría, por ejemplo, un diapasón. Si pulsamos una cuerda de guitarra o de piano, vibrará como un todo, es decir, en su longitud total, a una velocidad o frecuencia determinada, pero cada una de sus partes lo hará también, a la vez y a frecuencias más altas. De esa forma, se generan varias ondas simples de diferentes valores frecuenciales, que, superpuestas, constituyen la compleja resultante. En la Fig. 1.5 tenemos un ejemplo.

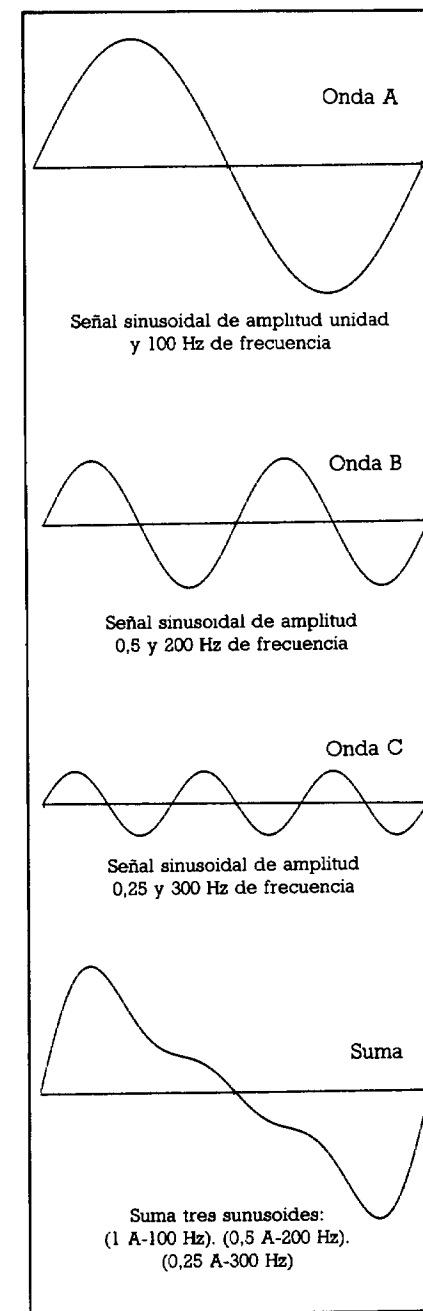
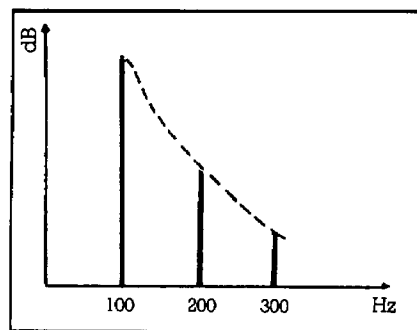


Figura 1.5.

La onda de más baja frecuencia, *A*, es la *frecuencia fundamental* ( $F_0$ ). Las otras, *B* y *C*, son los *armónicos, parciales* o *hipertonos*. Estos armónicos se numeran como si el fundamental fuera de hecho el armónico número 1: así, la onda *B* es el segundo armónico y la *C*, el tercero. Como se puede observar en el diagrama, la frecuencia de la onda compleja coincide siempre con su frecuencia fundamental, que, en nuestro supuesto, es de 100 Hz, o c.p.s. Las frecuencias de los armónicos, por su parte, son todas ellas múltiplos de la fundamental: el segundo armónico tiene dos veces la frecuencia del fundamental, el tercero tiene tres veces la frecuencia del fundamental, etc. Por consiguiente, la frecuencia fundamental es el máximo común divisor de las restantes frecuencias componentes.

Este método de descomposición de la onda compleja periódica se conoce con el nombre de *análisis de Fourier*, porque el teorema en el que se sustenta fue formulado por el matemático francés del siglo XIX Joseph Fourier. La *síntesis de Fourier*, por el contrario, permite el proceso inverso, es decir, la reconstrucción de una onda compleja a partir de todos sus componentes.

**1.1.6.** Una onda compleja periódica puede representarse mucho más fácilmente de como lo hicimos en la Fig. 1.5 si nos servimos de otro tipo de diagrama en el cual el eje de ordenadas registre la amplitud (esto es, la máxima elongación o desplazamiento) de cada componente, y el de abscisas, su frecuencia respectiva. La onda de la Fig. 1.5 sería, por tanto, la de la Fig. 1.6.

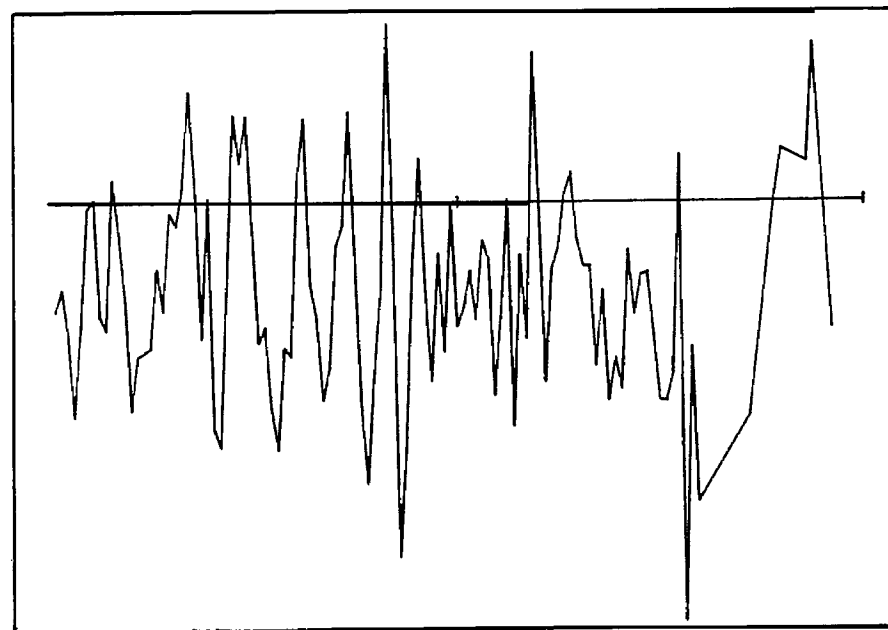


**Figura 1.6.**

Según vemos, las amplitudes relativas de los armónicos se corresponden con la longitud también relativa de las líneas verticales que los representan. No es preciso asignarles valores numéricos absolutos porque la forma de la onda compleja viene determinada por la fuerza relativa de todas sus ondas integrantes. A un diagrama como el que hemos logrado se le denomina *espectro del sonido*. En principio, es posible obtener el espectro de cualquier onda compleja, pero conviene señalar que, aunque esta práctica nos informa acerca de qué frecuencias la componen y con qué amplitudes se presentan, no nos especifica el modo en que se combinan para configurar la onda. Puede ocurrir, por ejemplo, que todas ellas se encuentren en el mismo mo-

mento de su ciclo vibratorio, o puede suceder, por el contrario, que mientras algunas estén en un determinado estadio del ciclo, otras no hayan llegado a él o lo hayan sobrepasado. En el primer caso, se dice que las ondas están *en fase*; en el segundo, que están *fuera de fase*. El perfil de la onda compleja varía en uno y otro caso. En la actualidad, existe cierta polémica sobre si la diferencia de fase afecta o no a la cualidad del sonido resultante. La mayoría de los autores consideran que el oído no capta el efecto de la discordancia de fase entre las frecuencias componentes de una onda compleja (v. Quilis: 1981, 50), así que éste es un factor que no se tiene en cuenta habitualmente en fonética.

Por lo que respecta a las ondas aperiódicas o no repetitivas, todas ellas son complejas, pero, a diferencia de las periódicas, poseen componentes de todas las frecuencias y de más o menos idéntica amplitud. Así pues, pese a que también pueden analizarse en forma de espectro, éste no estará formado por una serie de líneas verticales discretas representando al fundamental y a sus armónicos múltiplos, sino que constará de sólo una línea continua que, con su movimiento ascendente o descendente, indicará la amplitud de la vibración en cada frecuencia. En la Fig. 1.7 presentamos una onda compleja aperiódica y su correspondiente espectro. Obsérvese que en él la curva es lo que indica que



**Figura 1.7a.**

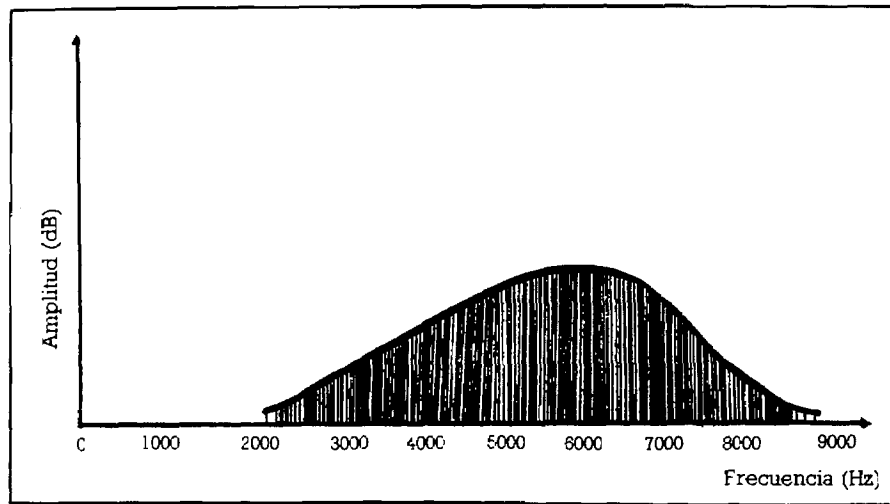


Figura 1.7b.

la energía del sonido está muy dividida entre toda la gama de frecuencias.

Existen, por consiguiente, dos tipos de espectros: los *de línea*, que describen generalmente a las ondas complejas periódicas, y los *continuos*, que caracterizan a las aperiódicas.

Para elaborar los espectros propios de cada sonido, en particular de los del habla, se utiliza un aparato de fácil manejo denominado *espectrógrafo* o *sonógrafo*, del que volveremos a hablar con detenimiento en próximos capítulos.

## 1.2. Propiedades de los sonidos

**1.2.1.** De todo lo explicado anteriormente podemos extraer una primera clasificación de los sonidos en sonidos *musicales* o armónicos y *ruidos*. Los primeros son el producto de ondas periódicas y, en consecuencia, son más regulares, más melódicos y más agradables al oído. Los segundos resultan de ondas aperiódicas y eso les confiere su carácter irregular y poco «musical». Adelantaremos que, por lo que se refiere a los sonidos del habla, las vocales, por ejemplo, son sonidos musicales, en tanto que algunas consonantes, como la [s], son ruidos.

Pero ésta no es la única diferenciación posible entre sonidos. Para cualquiera de nosotros es evidente que el sonido producido por la cuerda de una guitarra puede ser más bajo o más alto y más fuerte o

más débil dependiendo de varios factores que nosotros tendremos en cuenta para conseguir el efecto deseado. Sabemos, además, que este sonido posee una cualidad absolutamente diferente a la que caracteriza al producido por la cuerda de un violín, así que —aunque quizá sólo intuitivamente— somos conscientes de las tres principales formas en que los sonidos pueden diferir entre sí: en *tono*, en *intensidad* o *sonía* y en *timbre*.

**1.2.2.** El *tono* o la *tonía* es la impresión auditiva que nos produce la frecuencia de una onda sonora. Es, por tanto, una cualidad subjetiva dependiente de una propiedad física. Cuanto mayor sea la frecuencia de un movimiento oscilatorio, es decir, cuanto más deprisa se sucedan sus ciclos de vibración, más alto será el tono del sonido resultante. Así pues, una onda con 100 Hz de frecuencia producirá un sonido más bajo que otra de 200 Hz.

En una onda compleja periódica, el tono depende de su frecuencia fundamental ( $F_0$ ) que, como dijimos, es la frecuencia de repetición de la onda. En una vibración aperiódica, sin embargo, la altura tonal viene dada por el conjunto de frecuencias componentes predominantes.

Lógicamente, los objetos más pesados y de mayor tamaño vibran más despacio que los pequeños y ligeros, por lo que los sonidos que generan los primeros poseen un tono más bajo que los originados por los segundos: un contrabajo tiene cuerdas más gruesas y largas que un violín y ello explica la diferencia tonal de sus sonidos característicos.

Si queremos variar el tono de un determinado sonido, habremos de modificar su frecuencia, lo que puede lograrse de diversas maneras. Podremos cambiar las dimensiones de la fuente, que, como acabamos de señalar, son determinantes: cambiar, por ejemplo, la cuerda larga del contrabajo por la corta del violín o al revés. Podemos, también, aumentar o disminuir la tensión de esa misma fuente: si tensamos las cuerdas del violín, la frecuencia será mayor; si las aflojamos, la frecuencia disminuirá. Y, finalmente, podemos alterar la masa de la fuente y ello ha de afectar, asimismo, a la frecuencia: una cuerda más gruesa vibrará con menos rapidez que una más fina. Conviene recordar estos principios, porque se aplican al funcionamiento de las cuerdas vocales durante el proceso de producción del habla (véase Capítulo 2, apartado 2.2.2).

En los sonidos de frecuencias bajas —inferiores a 1.000 Hz—, un simple cambio de 2 o 3 c.p.s. entraña ya una variación en el tono. En las frecuencias altas, por el contrario, la modificación ha de ser más importante para que se interprete como una alteración de la tonía. Ello explica que las diferencias tonales entre sonidos de 400 y 600 Hz, por

ejemplo, sean más perceptibles que las existentes entre frecuencias de 4.400 y 4.600 c.p.s.

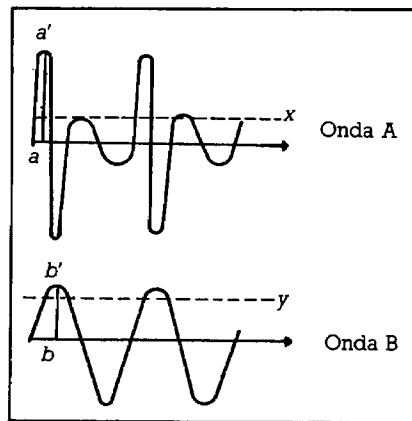
La unidad utilizada para medir el tono de los sonidos es el *mel*. Convencionalmente se acepta que a un sonido con una frecuencia de 1.000 Hz, le corresponde un tono de 1.000 meles. A partir de ahí pueden calcularse los valores tonales de cualquier sonido, de tal modo que los pares de sonidos separados por idénticas cantidades de meles mantendrán también entre sí las mismas diferencias de altura tonal.

**1.2.3.** Si, según hemos explicado, la frecuencia de una onda sonora condiciona el tono del sonido percibido, su amplitud, en cambio, determina la *intensidad* de ese sonido, o, hablando en términos psicológicos y subjetivos, su *sonía*.

Cuando pulsamos la cuerda de una guitarra con mucha energía, el resultado que obtenemos es un sonido más fuerte que el que conseguimos al tañer esa misma cuerda con mayor delicadeza. En el primer supuesto, hemos originado un movimiento más amplio de la fuente, que se traduce en un movimiento también más amplio de las partículas del aire, o lo que es igual, en una mayor fluctuación de la presión aérea. Los ciclos de la onda sonora correspondiente tendrán, en consecuencia, una amplitud considerablemente mayor que los de la onda provocada en el segundo supuesto, lo que explica el diferente grado de intensidad de los dos sonidos resultantes.

Supongamos que deseamos dilucidar cuál de los dos sonidos representados por las ondas *A* y *B* de la Fig. 1.8 posee más *sonía*, esto es, cuál sentiremos como más fuerte y cuál como más débil.

Si consideramos únicamente los máximos de amplitud alcanzados, entonces la onda *A* sería con claridad el sonido más fuerte, puesto que la distancia  $a-a'$  es superior a la  $b-b'$ . Pero es claro que ésta no sería una comparación válida. Habremos de hallar el valor medio de la amplitud para cada onda y comparar posteriormente los resultados alcanzados. El valor medio de la amplitud de una onda o *valor de eficacia* se calcula anotando en una escala de presiones los valores que



**Figura 1.8.**

presentan todos los puntos por los que pasa una línea como la *x* o la *y* de la Fig. 1.8. Después, esos valores se elevan al cuadrado, de forma que los negativos pasen a positivos, se suman los cuadrados, se divide el resultado entre el número de puntos considerado y se extrae la raíz cuadrada de la cantidad obtenida. Comprobamos así que la amplitud de ondas como la *B* de nuestro ejemplo es mayor que la de ondas como la *A*, a pesar de lo que pudiera pensarse a primera vista. Este procedimiento matemático simple se emplea también cuando las ondas objeto de análisis son sinusoidales.

Dado que la onda *B* posee mayor amplitud media que la onda *A*, según acabamos de explicar, la intensidad de la primera será igualmente mayor que la de la segunda. El término *intensidad*, utilizado en este contexto, no debe interpretarse en el sentido en que lo usamos habitualmente, esto es, como «fuerza, vehemencia o energía». Ésta sería, más bien, la definición de la impresión subjetiva que hemos denominado *sonía*. Por el contrario, la intensidad en acústica es una característica física inherente a la propia onda sonora, fácilmente mensurable en el laboratorio y definible como la potencia acústica que se transmite a través de una onda, medida en una superficie de un centímetro cuadrado perpendicular a la dirección de propagación de dicha onda. ¿Qué entendemos por potencia acústica? Se trata simplemente de la energía que posee cualquier partícula en movimiento y que se va transmitiendo de unas a otras a partir del lugar en que se encuentra la fuente de sonido.

La intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda sonora, de manera que un aumento en ésta de 10 dinas por centímetro cuadrado (la *dina* es la unidad de fuerza que se emplea para medir la presión del aire y se expresa siempre en relación a un centímetro cuadrado) supondría un aumento en la intensidad de 100 watios.

El *watio* por centímetro cuadrado es, en efecto, una de las unidades en las que puede calcularse la intensidad. Una intensidad de  $10^{-16}$  watios, esto es, de una diezmilésima de una millonésima de una millonésima de un watio/cm<sup>2</sup>, es ya suficiente para producir un sonido audible. Con todo, la intensidad o potencia acústica de una onda sonora suele medirse con mucha frecuencia en otra unidad distinta del watio y que, a diferencia de éste, no tiene un valor prefijado, sino que es una unidad relativa: nos estamos refiriendo al *decibelio* (abreviado *dB*). El hecho de adoptar esta unidad se debe a que, en la mayor parte de los casos, los fonetistas, o los físicos en general, no están interesados en conocer los valores absolutos de intensidad de un sonido, sino en saber cuál es su nivel de potencia con respecto a otro u otros. Consiguientemente, cuando decimos que la intensidad de un sonido es de *x* decibelios, queremos decir en realidad que ese sonido posee una intensi-

dad mayor en una proporción determinada que la de otro sonido. Lo que importa, entonces, es la *razón* o *ratio* —en el sentido matemático del vocablo, esto es, en una comparación, el exceso de un término sobre el otro— que mantienen entre sí los sonidos confrontados.

En principio, podemos valorar la intensidad de una onda sonora con respecto a cualquier otra con la que la relacionemos, pero, en la práctica, los especialistas han establecido como punto de referencia el sonido que posee una potencia de  $10^{-16}$  vatios, del que hablábamos antes y en torno al cual se ha elaborado toda la *escala de decibelios*. La diferencia en decibelios entre dos sonidos, de acuerdo con dicha escala, se define como diez veces el logaritmo de su razón de potencia acústica o intensidad. La explicación más simple puede darse sobre la tabla que presenta P. Ladefoged en sus *Elements of Acoustic Phonetics* (pág. 82):

Razón o relación de intensidad entre los sonidos	Logaritmo de la razón	Diferencia en decibelios
10 a 1	1	10
100 a 1	2	20
1.000 a 1	3	30
etc.	etc.	etc.

Para calcular el logaritmo, lo único que hay que hacer es contar el número de ceros que indican la proporción o razón de los dos sonidos. Después, multiplicamos esa cifra por diez y ya obtenemos la cantidad de decibelios que separan a los sonidos en cuestión.

Por lo que respecta, finalmente, al atributo psicológico de la sonía, se ha propuesto como unidad de medición conveniente el *sono*, haciéndolo corresponder con la sonía producida por una onda sonora de 1.000 Hz, con una intensidad de 40 dB. Los oyentes que hayan de juzgar sobre el grado de sonía de un sonido determinado utilizarán la escala numérica construida en virtud de esta unidad, según la cual una onda con una sonía de 2 sonos es dos veces más intensa, desde el punto de vista subjetivo, que una con sólo 1 sono, y ésta, por su parte, será también el doble de intensa que la onda que posea 1/2 sono.

**1.2.4.** En orden a entender correctamente la diferencia entre *frecuencia* y *amplitud* y sus propiedades derivadas, *tono* e *intensidad*, conviene aclarar que un cambio en la amplitud no implica un cambio en la frecuencia. Por ejemplo, un péndulo que describe un movimiento de poca amplitud, porque se le ha transmitido un impulso pequeño, efec-

túa, en un segundo o en un minuto, el mismo número de vibraciones que efectuaría si sus movimientos tuvieran una mayor amplitud como respuesta a un impulso inicial más fuerte. Ello es debido a que la frecuencia depende siempre de las características físicas del cuerpo en vibración. Así pues, si queremos cambiar la de nuestro péndulo, habremos de modificar sus dimensiones, haciéndole más largo (menor frecuencia) o más corto (mayor frecuencia).

Un cambio en la intensidad de un sonido tampoco debe conllevar, consecuentemente, una variación en su tono. Sin embargo, esto no es del todo cierto. En general, al aumentar la intensidad de un sonido cuya frecuencia sea superior a 1.500 Hz, se produce una elevación proporcional del tono. Por el contrario, si la frecuencia de la onda sonora considerada es inferior a los 1.500 Hz, el aumento de la intensidad provocará el descenso del tono. Estas modificaciones son, no obstante, muy poco importantes, por lo que podemos seguir manteniendo a efectos expositivos la asociación de la intensidad con la amplitud y del tono con la frecuencia.

**1.2.5.** La última propiedad que caracteriza a los sonidos y los diferencia entre sí es, como hemos dicho (véase apartado 1.2.1), el *timbre*, la cualidad acústica propia de cada uno de ellos. Así, la misma nota musical, tocada con idéntico tono e intensidad, no sonará igual en una guitarra que en un laúd; diferirá en timbre.

El timbre depende de la configuración particular que presente el espectro (véase el apartado 1.1.6) de la onda compleja, de modo que dos sonidos se percibirán con timbre diferente si el número y la amplitud relativa de los armónicos que componen sus ondas son, asimismo, distintos. En la Fig. 1.9 aparecen los espectros correspondientes a las vocales españolas [u] e [i].

Puede apreciarse fácilmente que la vocal [u] tiene los armónicos de mayor amplitud situados en la zona de frecuencias bajas, mientras que, en el caso de la [i], hay una gran cantidad de armónicos, algunos de ellos de considerable amplitud, en las frecuencias altas. La primera vocal, la [u], es, por tanto, un sonido *grave*; la [i], en cambio, es un sonido *agudo*.

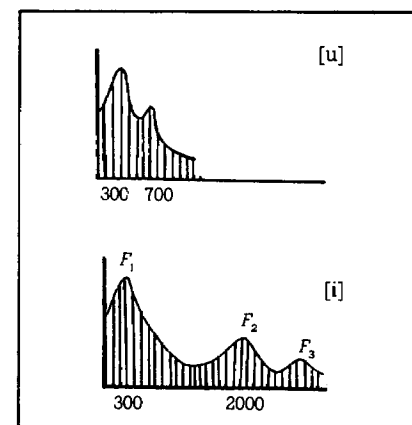


Figura 1.9.

Ahora bien, para explicar cómo es posible que dos ondas sonoras como las que aparecen en la Fig. 1.9, producidas por la misma fuente —la vibración de las cuerdas vocales—, tengan una composición tan diferente, es preciso entender un concepto fundamental en fonética acústica, el de *resonancia*, al que dedicaremos los próximos apartados.

### 1.3. La resonancia

**1.3.1.** Los cuerpos en general tienen dos modos distintos de vibrar. Pueden, en primer lugar, verse desplazados de su estado de reposo al recibir un impulso externo y continuar, a partir de ese momento, vibrando libremente a su *frecuencia natural*, es decir, a la frecuencia que le es propia de acuerdo con sus características físicas (véase nuestro apartado 1.2.4). Si movemos, por ejemplo, las puntas de un diapasón, éste vibrará exactamente en la forma que acabamos de describir. En segundo lugar, los cuerpos pueden también comenzar a vibrar al verse «contagiados» por la vibración de otro cuerpo. Las oscilaciones del diapasón anterior se transmitirán fácilmente a una mesa con tan sólo apoyar su base sobre ella. De igual manera, las vibraciones de las cuerdas de una guitarra provocarán perturbaciones en la masa de aire contenida en la caja del instrumento.

Pues bien, al fenómeno por el cual un cuerpo se pone en movimiento a causa de las vibraciones de otro cuerpo se le conoce con el nombre de *resonancia*. El cuerpo o volumen que se ve afectado se denomina *resonador*.

Para que la resonancia se produzca es preciso que la frecuencia natural de vibración del resonador se asemeje a la de la fuente de sonido. Así, si colocamos muy próximos entre sí a dos diapasones de la misma frecuencia y hacemos vibrar a uno de ellos, los movimientos de esta vibración original actuarán como pequeños «golpes» en el otro diapasón, al que pondrán también en movimiento. Pero esto sólo se producirá si los «golpes» de las moléculas llegan al segundo diapasón en el momento adecuado, esto es, si la frecuencia natural de ambos cuerpos coincide. Ladefoged (1962, 57) ejemplifica muy claramente esta idea, utilizando un símil que Borzone (1980, 34) traduce:

«Supongamos que un niño quiere hamacarse (*sic*). Comenzamos por dar un pequeño empujón a la hamaca, que se desplaza alejándose de nuestra posición. Luego, cuando la hamaca vuelve y se encuentra en el punto máximo de su desplazamiento hacia atrás, aplicamos otro empujón. Este aumentará la amplitud del vaivén y así, con golpes sucesivos, se alcanzará el máximo balanceo. (...) Supongamos que se aplica el segundo empujón a la hamaca cuando ésta está todavía volviendo hacia

nuestra posición. En lugar de aumentar la amplitud del balanceo, el vaivén disminuye, y si los golpes sucesivos se dan siempre antes de que se complete el vaivén, la hamaca se detiene.»

En otras palabras, la velocidad en que se suceden las compresiones y rarefacciones de la *onda incidente* (la onda que produce el primer diapasón) debe corresponderse con la frecuencia natural del resonador (nuestro segundo diapasón) y, entonces, no sólo el primero *resuena* en el segundo, es decir, le hace moverse, sino que las amplitudes de ambos movimientos se suman y el sonido que obtenemos se refuerza.

Estos objetos —los diapasones— producen, como hemos visto, ondas sinusoidales. Pensemos ahora qué sucede con las ondas complejas. Sabemos que la composición de dichas ondas se refleja con claridad en el diagrama que denominamos *espectro* (véase apartado 1.1.6), el cual, al indicarnos todas las frecuencias de vibración de un cuerpo, y sus amplitudes relativas, nos está informando también de cuáles son las frecuencias a las que ese cuerpo responderá mejor si actúa como resonador. Dado un espectro como el de la Fig. 1.6, por ejemplo, podremos deducir que la fuente que ha producido esta onda compleja entrará en vibración fácilmente si le llega una onda de alrededor de 100 Hz de frecuencia, puesto que ésta es su propia frecuencia natural de vibración. Por ello, y a pesar de que no coinciden estrictamente, la frecuencia natural de vibración de un cuerpo se considera también su *frecuencia de resonancia* y de ahí que la *curva de resonancia* de un cuerpo coincida con la *curva de su espectro*. En nuestro ejemplo de la Fig. 1.6, la curva nos indica que este cuerpo o volumen de aire resonaría algo a las frecuencias de 200 y 300 Hz, pero con menor efectividad a frecuencias mayores.

Así pues, una curva de resonancia no es sino la representación de la conducta potencial de un resonador (v. Brosnahan y Malmberg: 1970, 26).

**1.3.2.** Los sonidos que estimulan a un resonador y lo ponen en movimiento, es decir, las ondas incidentes que llegan a él, se denominan *entrada* del resonador. Las que resultan de la vibración del resonador en respuesta a esta entrada se conocen, en cambio, con el nombre de *salida*.

Si al cuerpo cuya curva de resonancia se corresponde con la de la Fig. 1.6 le hacemos llegar una entrada como la representada en la Fig. 1.10, la salida resultante tendrá la forma del diagrama de la Fig. 1.11: la vibración óptima estará situada en torno a los 100 Hz y será la que posee mayor amplitud. Los armónicos de 50 y 150 Hz presentarán ya una menor amplitud, que irá descendiendo cada vez más

a medida que nos acerquemos a las frecuencias más alejadas de la frecuencia natural de vibración o frecuencia de resonancia del cuerpo en cuestión.

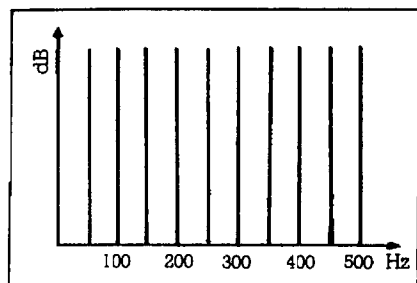


Figura 1.10.

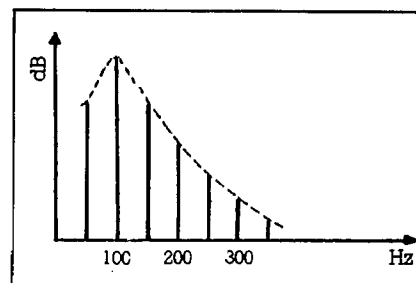


Figura 1.11.

La gama de frecuencias a la que un resonador responde con efectividad se llama *ancho de banda* y abarca todas aquellas frecuencias con una amplitud de por lo menos el 70,7 por 100 de la amplitud de su frecuencia de resonancia. En nuestro ejemplo anterior, el resonador sería realmente efectivo en el margen comprendido entre los 50 y los 150 Hz, porque cualquier frecuencia dentro de esos límites posee, al menos, el 70,7 por 100 de la amplitud de la frecuencia de 100 Hz. El efecto de un resonador puede describirse, por tanto, especificando su frecuencia de resonancia (en nuestro ejemplo, 100 Hz), y su ancho de banda (en este caso, 100 Hz).

Ya explicamos que la intensidad de un sonido dependía del cuadrado de la amplitud (véase apartado 1.2.3). Eso significa que si la intensidad de un determinado sonido es la mitad que la de otro, la amplitud de ese primer sonido ha de ser 0,707 veces la del segundo, puesto que el cuadrado de 0,707 es 0,5, es decir, la mitad. Por consiguiente, la cantidad de 70,7 por 100 que se marca como criterio para establecer el ancho de banda no es arbitraria: todas las frecuencias que poseen una amplitud de ese valor con respecto a la frecuencia de resonancia tienen por lo menos la mitad de su intensidad y no se diferencian de ella en más de 3 dB.

**1.3.3.** En algunos casos, un resonador puede actuar como *filtro*. De hecho, un filtro no es más que un resonador con capacidad selectiva respecto a las frecuencias, utilizado para transmitir o pasar un sonido.

Supongamos que tenemos una fuente de sonido que emite energía acústica en forma de ondas de 200, 400, 600 Hz, etc., hasta un máximo de 2.000 Hz, e imaginemos también que diseñamos un filtro de tal modo

que no deje pasar las frecuencias superiores a los 600 Hz. Como es lógico, nuestro filtro dejará pasar los armónicos de 200, 400 y 600 Hz y eliminará todos los restantes componentes de la onda compleja inicial. Se tratará, entonces, de un *filtro de paso bajo*, porque permite el paso a las señales comprendidas entre 0 y la *frecuencia de corte* (en nuestro ejemplo, 600 Hz). Si, por el contrario, este resonador fuera diseñado para transmitir las frecuencias superiores a la frecuencia de corte y eliminar las inferiores, sería un *filtro de paso alto*. Finalmente, un *filtro de pasa banda* dejaría pasar toda una banda de frecuencias cuyo ancho se determina previamente.

Según veremos en próximos capítulos, el tracto vocal humano es un tubo que actúa como resonador y cuya forma varía como resultado de los movimientos de los distintos órganos articulatorios. Estas modificaciones conllevan cambios en las frecuencias de resonancia de los volúmenes de aire contenidos en cada una de las cavidades que lo conforman y ello constituye, realmente, la base de las diferencias entre los sonidos del habla.