

CAPITULO 1**GENERALIDADES SOBRE EL SONIDO**

Todo sonido tiene su origen en un cuerpo que vibra. Este cuerpo puede ser de índole muy diversa: las cuerdas vocales de la garganta, las cuerdas de un piano, la columna de aire de un clarinete, el cono de un altavoz, etc.

Ese cuerpo, al vibrar, produce variaciones de presión en el aire circundante, las cuales dan lugar al movimiento de ondas sonoras. Estas pueden incidir sobre nuestros órganos auditivos dándonos la sensación de oír, o ser recogidas por un micrófono que los convierte en variaciones de tensión, para luego difundirlas por radio o registrarlas.

Se ve, pues, que hay tres elementos esenciales en acústica: un cuerpo vibrante, un medio transmisor de las ondas sonoras y un receptor. Nótese que, a semejanza del cuerpo vibrante, el medio por el cual se mueven las ondas puede ser de índole muy variada. Se ha mencionado el aire de primera entrada por ser el más común, pero existen muchos más que en mayor o menor grado transmiten las ondas sonoras. Sean ejemplo de ello el agua, los metales y la madera.

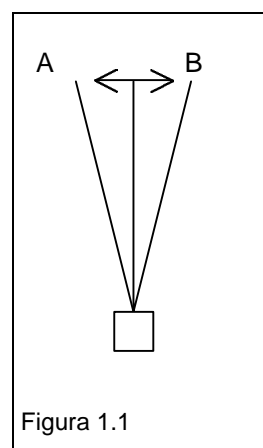
FORMACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Un medio puede transmitir ondas sonoras porque es elástico. Esta es la propiedad que poseen algunos materiales consistente en que se reintegran a su forma o volumen originales cuando quedan liberadas de la fuerza que las oprime. Un sencillo ejemplo, lo constituye la goma. Si se estira un trozo de goma y luego se suelta, volverá a su estado original. En cambio, el plomo muestra muy poca o ninguna elasticidad. El acero también posee elasticidad. Hasta cierto punto vuelve a su forma primitiva al dejar de actuar sobre él alguna fuerza.

Los gases también son elásticos, pero de modo diferente. Si una capa de gas, tal como el aire disminuye de volumen porque una fuerza ejerce presión sobre ella, al cesar dicha fuerza volverá a ocupar el mismo volumen que en un principio. A esta propiedad se debe que el aire transmita las vibraciones de un cuerpo sonoro en forma o movimiento ondulatorio.

Tomando como fuente sonora una lengüeta y veamos cómo se producen las ondas. La fig. 1.1 muestra cómo la lengüeta vibra a uno y otro lado de su posición de reposo. Primero se inclina hacia A, luego regresa pasando por la línea de reposo y llega a B, de donde vuelve otra vez hacia A. El ciclo se repite así una y otra vez.

Cuando la lengüeta se mueve hacia A, la masa de aire que rodea a aquélla experimenta una alteración. Las partículas de aire de enfrente de la lengüeta son empujadas contra las otras partículas que tienen delante y así se comprimen. Las partículas de detrás se dispersan hasta llenar mayor volumen, y de este modo el aire se enrarece. Debido a la elasticidad del aire, estos cambios que se producen en torno a la lengüeta irán afectando a más y más capas, de manera que por un lado de la lengüeta se propagará una compresión y del otro lado, una descompresión.



Cuando la lengüeta se desplaza de A a B, sucede lo contrario. En el lado B aparecerá una compresión y en el A una descompresión. Al vibrar continuamente la lengüeta se producen a ambos lados de ella compresiones y descompresiones alternadas. Estas variaciones de presión del aire es lo que constituye la onda sonora.

La fig. 1.2 presenta la forma en que las variaciones de presión están superpuestas a la presión atmosférica constante. En el diagrama aparece muy aumentada la magnitud de las mismas. La presión constante de la atmósfera viene a ser de 1.000.000 unidades por centímetro cuadrado, mientras que las variaciones de presión correspondientes a las ondas sonoras audibles van de 0,0002 a 1.000 unidades. (La unidad usada es la dina, o sea, la fuerza que acelera una masa de 1 gr. a 1 cm. por segundo cada segundo.)

Otro modo de considerar las ondas sonoras es imaginar que las partículas de aire son esferas que, en condiciones normales, están distribuidas regularmente en el espacio, como se ve en la fig. 1.3 (a).

Al producirse una onda sonora, las partículas vibrarán a uno y otro lado de su posición normal. Supóngase que se pudiese congelar el aire instantáneamente y estudiar el modo en que las partículas se han movido. En el instante mostrado en la fig. 1.3 (b), la partícula 1 se halla en su posición de reposo, la 2 se ha movido un poco hacia adelante, la 3 más todavía, la 4 es la más lejana de su punto de reposo, la 5 está a la misma distancia que la 3, la 6 a la misma que la 2, y la 7 está en su posición de reposo. Las partículas de la derecha, es decir, la 8, 9, 10, 11 y 12, también han variado su posición de reposo, pero en sentido inverso.

En tal caso, es decir, cuando las partículas vibran siguiendo la dirección en que se propaga la onda, se llama una *onda longitudinal*. En otro tipo de onda, las partículas del medio vibran en ángulo recto respecto a la dirección en que viaja la onda. Se dice entonces que el movimiento produce una *onda transversal*. Un ejemplo de ellas se tiene en las cuerdas vibrantes y en la superficie del agua.

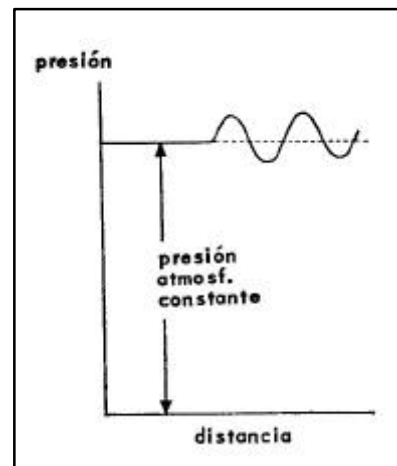


Figura 1.2

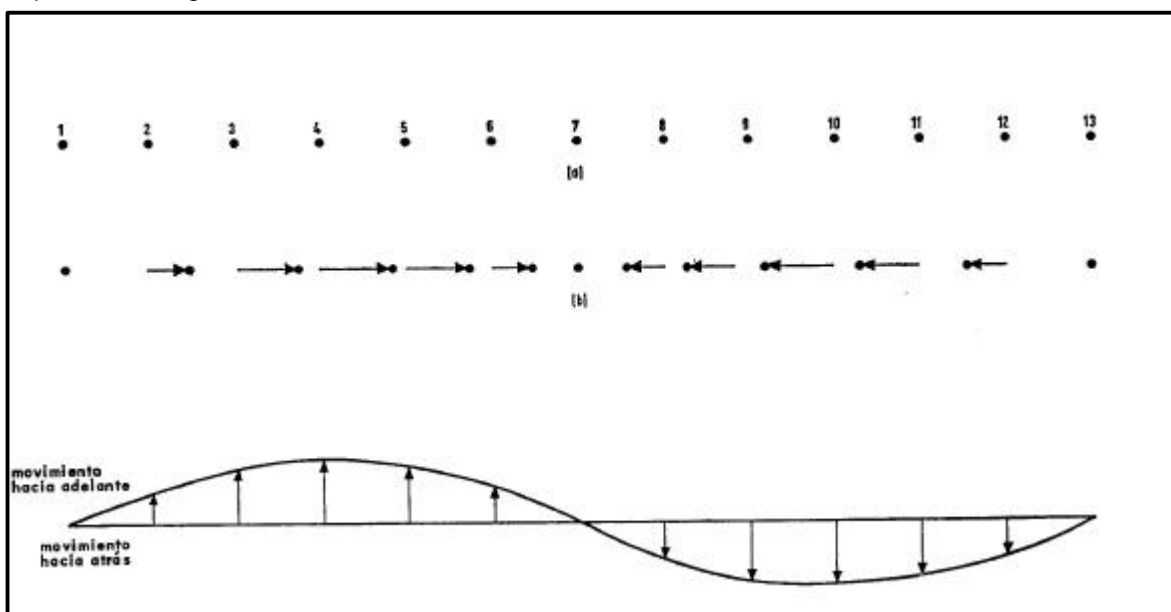


Figura 1.3. Las partículas de aire están representadas por los puntos 1 al 13. En (a) normalmente se pueden suponer espaciadas regularmente. En (b) por la influencia de las ondas sonoras emitidas por un cuerpo vibrante, las posiciones relativas de las partículas se alternan. En (c) Aparecen dibujados los desplazamientos, obteniéndose la típica "onda".

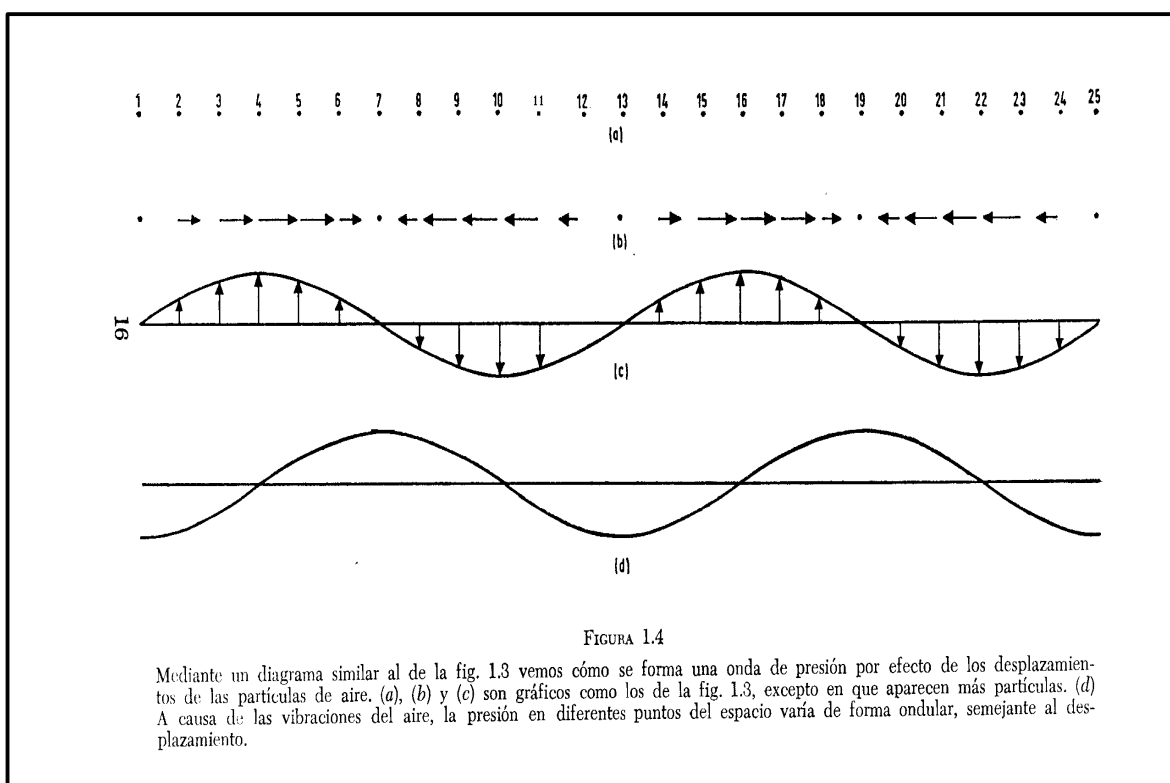
Hay dos puntos muy importantes que señalar respecto a cualquier tipo de movimiento ondulatorio:

1. Se propaga energía.
2. No se produce desplazamiento del medio transmisor tomado como conjunto.

El primer punto es evidente, ya que es imprescindible la existencia de una energía que produzca vibraciones en el receptor. El segundo se refiere a que las partículas del medio no hacen sino vibrar alrededor de su posición de reposo normal (fig. 1.3).

REPRESENTACIÓN DE LAS ONDAS SONORAS

Para representar las ondas en forma de diagrama, se suele dibujar una onda transversal, que es más fácil de visualizar. Por tanto, el movimiento ondulatorio longitudinal de una onda sonora puede mostrarse en un gráfico sencillo. La práctica convencional consiste en representar los movimientos hacia adelante por encima y los movimientos hacia atrás, por debajo de una línea de referencia que corresponde a la posición de reposo (fig. 1.3 c). Uniendo las puntas de las flechas mediante una línea, se obtiene el típico dibujo de una onda transversal.



La fig. 1.3 muestra el modo en que las partículas de aire se desplazan por efecto de una onda sonora. Con este gráfico puede obtenerse otro diagrama que muestra las variaciones de presión. Las figs. 1.4 a, b y c es la misma que la 1.3, salvo en que hay representadas más partículas. Si en la fig. 1.4 b se observa la partícula 7, puede verse que se halla en su posición de reposo, y que las adyacentes, es decir, la 6 y la 8, se han movido hacia ella. Exactamente las mismas condiciones son aplicables a la 19. Pero las partículas situadas a ambos lados de la 13 se han alejado, y otro tanto les sucede a las 1 y 25. Es evidente que la presión ha de ser alta alrededor de la 7 y de la 19, y baja alrededor de las 1, 13 y 25. Efectivamente, la 7 y la 19 constituyen los centros de *compresiones*, y las 1, 13 y 25 los de *expansiones*. La presión en las partículas 4, 10, 16 y 22 es la normal, puesto que las que están situadas a los lados de ellas se han movido la misma distancia a partir de sus posiciones de reposo. Si se traza una curva que represente las presiones en los diferentes puntos del espacio, se obtendrá la fig. 1.4 d. En ella se ve la onda de presión resultante de la onda de desplazamiento de la fig. 1.4 c.

Las figs. 1.3 y 1.4 muestran cómo varían el desplazamiento y la presión en el espacio, o más exactamente, cómo varían con la distancia desde la fuente sonora. Pero otro aspecto es el modo de variar con el tiempo. Una manera sencilla de distinguir los conceptos de distancia y tiempo es la de considerar que cuando se habla de distancia se concibe la onda sonora como un conjunto en un instante dado; y cuando considera el tiempo, se piensa en una partícula determinada. Como ejemplo, puede verse la partícula 4 de la fig. 1.4 b. En el momento elegido para examinar la onda como un conjunto, la partícula 4 se halla desplazada hasta el máximo en la dirección de avance. Una fracción de segundo más tarde tiene que invertir su dirección (recuérdese que el aire en conjunto no avanza). Después, la partícula alcanza su posición de reposo y, atravesándola, se traslada hasta el máximo en dirección de retroceso. Luego vuelve a invertir su marcha y avanza hacia adelante nuevamente, pasando una vez más por su posición de reposo hasta alcanzar el máximo desplazamiento en dirección de avance (que ha sido el punto de partida).

AMPLITUD

La amplitud es el valor máximo del movimiento de una onda. Así, por ejemplo, la distancia máxima a que una partícula se aleja de su posición de reposo es la amplitud de desplazamiento.

LONGITUD DE ONDA

Volviendo a considerar la onda en el espacio, la distancia entre dos compresiones o entre dos expansiones se denomina *longitud de onda* (λ); y si se imagina a la onda pasando por un punto dado en el espacio y se empieza a contar justamente cuando una compresión pasa por este punto, el tiempo que transcurre hasta producirse el paso de otra compresión se llama *período* (T).

FRECUENCIA

Se define la *frecuencia* como el número de cambios (de una compresión a otra, por ejemplo) que ocurren en un lugar dado en el transcurso de un segundo. Se mide en ciclos por segundo (Hz) y para expresarla nos servimos del símbolo *f*. La frecuencia y el período se relacionan como sigue:

$$\text{Frecuencia} = 1/\text{Período} \quad \text{o bien:} \quad f = 1/T$$

VELOCIDAD DEL SONIDO

Las ondas sonoras se propagan en el aire con una cierta velocidad, que guarda la siguiente relación con la longitud de onda y con el período:

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Distancia recorrida}}{\text{tiempo}}$$

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \times \frac{1}{T}$$

pero como: $f = 1/T$

resulta que: $v = \lambda f$

(Adviértase que *v* es la velocidad a que la onda se propaga por el aire, y no se confunda con la velocidad de las partículas).

En condiciones normales se acepta que la velocidad del sonido es de 344 metros por segundo.

Entre los factores que determinan la velocidad se cuenta la temperatura. A 0°C es de 331 metros por segundo. Al elevarse la temperatura, aumenta la velocidad.

He aquí ahora, a manera de comparación, las velocidades de las ondas sonoras en otros medios distintos del aire:

En el oxígeno:	317 metros por segundo;
En el hidrógeno:	1.270 metros por segundo.
En el agua salada:	1.504 metros por segundo.
En el acero:	5.000 metros por segundo.

Es interesante calcular las longitudes de onda de dos frecuencias, una baja y otra alta, que caen dentro de la gama de frecuencias audibles. A 50 Hz, la longitud de onda es de 6,98 metros, y a 15.000 Hz de 2,3 cm. Esta amplia gama de longitudes de onda complica el diseño de micrófonos y altavoces.

TONO

Hasta aquí hemos tratado de las propiedades físicas de las ondas sonoras. La frecuencia, la longitud de onda y la velocidad son los componentes objetivos de un sonido: pueden medirse. Ahora bien, el efecto del sonido en un oyente es subjetivo, y por eso consideramos en este epígrafe el tono.

Se define el tono como la cualidad subjetiva de una nota que hace posible situarla en una escala musical. Tono y frecuencia han de estar evidentemente en estrecha relación. La frecuencia de un sonido depende de las vibraciones de la fuente. Si el número de vibraciones se altera, cambia la frecuencia y con ella el tono. Aunque éste se halla determinado principalmente por aquélla, hay circunstancias en que el tono de una nota puede variarse cambiando su intensidad sin alterar la frecuencia. Tal dependencia del tono respecto a la intensidad la veremos más adelante.

El tono de un sonido puede también modificarse habiendo un movimiento relativo entre la fuente y el oyente. Este fenómeno es muy común y casi todo el mundo lo habrá observado en alguna ocasión. El ejemplo usual que se cita es el de un tren expreso sonando constantemente su silbato al entrar en la estación; pero hay otros, como es el de un automóvil al pasar delante de nosotros.

El hecho básico es que cuando la distancia entre una fuente sonora y un oyente disminuye, la distancia entre dos compresiones - o expansiones- se vaya reduciendo. Lo cual significa que la longitud de onda efectiva decrece, y con ello aumenta el tono aparente. De modo similar, al incrementarse la distancia entre la fuente y el oyente, la longitud de onda se hace mayor y el tono aparente disminuye. Así, pues, el tono de la nota que produce el silbato de un tren se reduce al pasar éste. Al alejarse, es más bajo que al aproximarse.

Este cambio de tono con la variación de distancia se le denomina efecto Doppler.

ONDAS ESFERICAS Y PLANAS

Hasta aquí se ha supuesto que una onda sonora se propague por una pequeña porción de aire, pero el caso es que el volumen de aire afectado por ella es mucho mayor. A título de ejemplo, empecemos imaginando una fuente sonora que irradia igualmente en todas direcciones. Se conoce con el nombre de fuente puntual. Si a corta distancia de la fuente pudiéramos ver cómo se propaga la energía sonora, observaríamos que la onda tiene un frente curvado. En efecto, la energía total se radia sobre la superficie de una esfera. De aquí el término de «ondas esféricas», puesto que el frente de las mismas toma la forma de una de dichas figuras geométricas en continua expansión. En la práctica, sin embargo, una verdadera fuente puntual es imposible, aunque si las dimensiones de la fuente son pequeñas comparadas con la longitud de onda, puede decirse que se radian ondas aproximadamente esféricas.

Tal curvatura se va aplanando a muy grandes distancias de la fuente. El frente de onda, considerado en una reducida área, puede considerarse como un plano perpendicular a la dirección en que la onda sonora se propaga. En este caso, se denomina «onda plana».

INTENSIDAD

Es la proporción de energía que se transfiere a través del medio, o la potencia que pasa por unidad de área - generalmente 1 cm^2 - del frente de onda. Una manera fácil de imaginarla es considerar de nuevo que la fuente puntual radia en todas direcciones y que su potencia se mide en vatios. A una distancia pequeña del manantial, esta potencia ha de estar distribuida sobre la superficie de una esfera. Puesto que dicha área es $4\pi r^2$ (siendo r la distancia desde el manantial, o más sencillamente, el radio de la esfera), tendremos:

$$\text{Intensidad} = \frac{\text{potencia de la fuente}}{4 \pi r^2} \quad \text{vatios/cm}^2$$

La intensidad y la potencia sonora se hallan en evidente relación: cuanta más energía, más potente es el sonido. Aunque sobre la potencia sonora trataremos con más detalle en el próximo capítulo, es interesante señalar ahora que la intensidad mínima necesaria para percibir una nota de 1.000 Hz es de 10^{-16} vatios/cm².

La fórmula expuesta más arriba nos permite apreciar una importante ley de física referente a cómo se distribuye la energía de una fuente. Si ésta es de potencia constante, resulta:

$$\text{Intensidad} = f (1/r^2)$$

Dicho en palabras: la intensidad disminuye inversamente al cuadrado de la distancia. Esta ley es general y se conoce como «Ley de las inversas de los cuadrados». No hace falta que la fuente sea sonora,

pues puede ser luminosa e indica que la iluminación se debilita al alejarnos del foco. La fig. 1.5 muestra gráficamente que al aumentar la distancia a la fuente se amplía el área sobre la que se distribuye la energía.

La intensidad y la presión de una onda sonora tienen que estar forzosamente relacionadas. Cabe demostrar que la primera es proporcional al cuadrado de la segunda. Expresado en términos matemáticos:

$$\text{Intensidad} = f (\text{presión}^2)$$

Sustituyendo ahora presión² por intensidad en la fórmula penúltima tenemos:

$$\text{presión}^2 = f (1/r^2)$$

o bien:

$$\text{presión} = f (1/r)$$

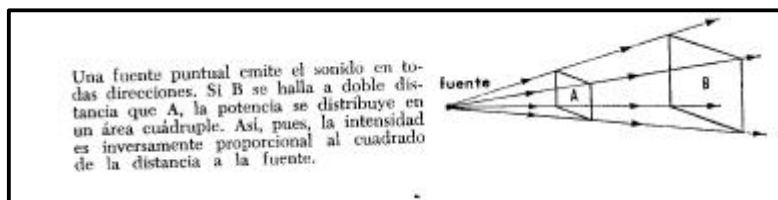


Figura 1.5

Si dibujamos un gráfico que relacione la presión y la distancia a la fuente (véase fig. 1.6) hallamos que, cerca de la fuente, un ligero aumento de la distancia desde A a B produce un gran descenso de presión. En cambio, aumentando la misma distancia, pero esta vez desde C hasta D, la variación de presión es mucho menor. Este fenómeno es importante al usar micrófonos, como hemos de ver ampliamente más adelante.

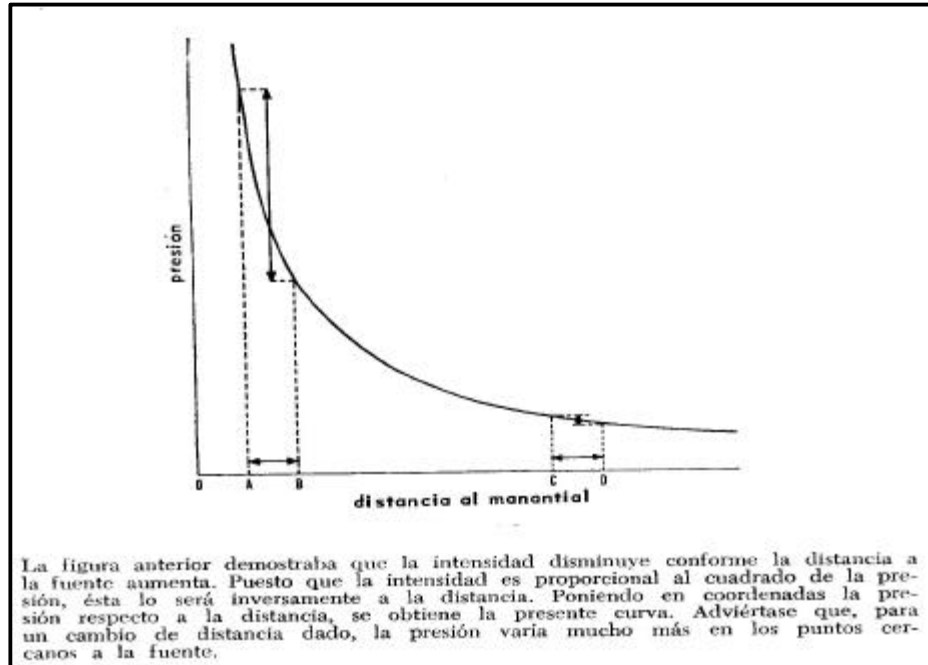


Figura 1.6

INTENSIDAD Y DECIBELIOS

Existe una enorme gama de intensidades de ondas sonoras, algo así como de 1 billón hasta 1. En la mayoría de los casos no es la intensidad real de una nota lo que es importante, sino su comparación con otras notas. Esta comparación ha sido definida por la ley de Weber-Fechner, según la cual el efecto sobre el oído de un cambio de intensidad depende de la intensidad que precede al cambio. Una forma simple de comprender esto es comenzar con una nota de determinada intensidad, digamos 10 unidades, incrementarla luego a 100 y después a 1.000 unidades. Estos dos cambios los interpretaría el oído como idénticos en potencia, puesto que la proporción de 100/10 es igual a 1000/100. Otro modo de expresar lo que decimos es escribir los valores de las intensidades en potencias de diez: 10^1 , 10^2 , 10^3 . Se ve que los cambios iguales en potencia vienen dados por cambios iguales al logaritmo de la intensidad. Se dice que el oído tiene una respuesta logarítmica y en mediciones de acústica se emplea una unidad llamada BELIO. Si la intensidad inicial I_1 se incrementa hasta un nuevo valor I_2 se tiene:

$$\text{Relación en BELIOS} = \log I_2/I_1$$

En la práctica, el belio es demasiado grande y por ello se emplea el DECIBELIO (dB). La relación en decibelios será entonces:

$$\text{dB} = 10 \text{ Log } I_2/I_1$$

Los logaritmos representan un recurso muy útil de cálculo, y a esto se debe que el decibelio se use universalmente en ingeniería electrónica para comparar dos potencias eléctricas. Así, por ejemplo, si la potencia de entrada de un amplificador es P_{ent} y la de salida P_{sal} , la amplificación en decibelios será:

$$A = 10 \log \frac{P_{\text{sal}}}{P_{\text{ent}}} \text{ dB}$$

En acústica se suele tratar con mayor frecuencia con presiones que con intensidades, y con dos presiones, la relación en decibelios sería:

$$20 \text{ Log Presión}_2/\text{Presión}_1 \text{ (dB)}$$

A esta relación se llega de la siguiente manera:

$$\text{dB} = 10 \log I_2/I_1$$

pero como intensidad = f (presión²)

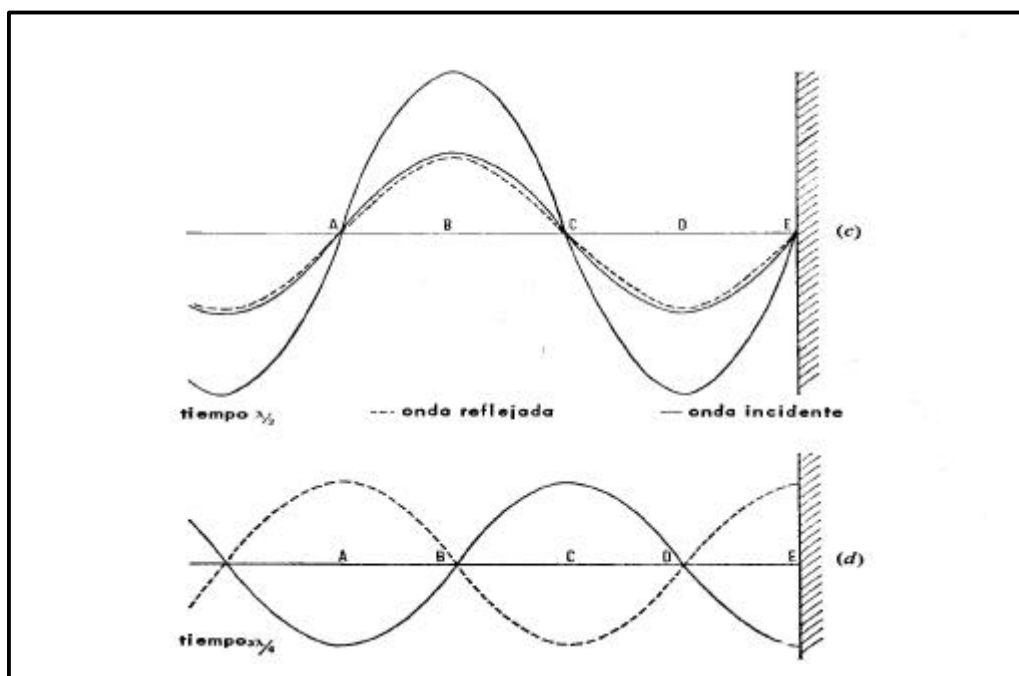
$$\text{decibelios} = 10 \log (\text{presión}_2)^2 / (\text{presión}_1)^2$$

$$= 20 \log \text{presión}_2/ \text{presión}_1$$

ONDAS VIAJERAS Y ESTACIONARIAS

Hasta este momento venimos considerando que las ondas se propagan libremente en el espacio sin encontrar obstáculos que perturben la regular distribución de la energía sonora. Pero esto no es lo que sucede en la práctica. En una habitación, por ejemplo, las paredes, el techo, el suelo, los muebles, etc., reflejan las ondas sonoras. Cuando una de éstas se refleja volviendo por su trayectoria original, interferirá a la onda incidente que llega de la fuente. El tipo de interferencia que se produce tiene gran efecto sobre la distribución de la energía sonora. Evidentemente, la intensidad y la distribución del sonido reflejado dependen del tamaño y la forma de la superficie u objeto reflectante, como ya veremos en páginas posteriores.

Para comprender este problema lo mejor es tomar como ejemplo una forma de onda del desplazamiento en una cuerda que tiene un extremo fijado rígidamente a una pared. Se hace vibrar el otro extremo libre para que una onda de desplazamiento se propague por la cuerda hacia la pared. Como ésta se supone completamente rígida, la energía en la cuerda debe ser reflejada completamente hacia atrás a lo largo de la cuerda. Veamos entonces qué sucede en ella en momentos diferentes y construyamos un gráfico cuando haya pasado el suficiente tiempo para que se establezcan condiciones estacionarias.



A lo largo del ciclo completo se puede ver que el punto B vibra alrededor de la posición de reposo de la cuerda. Lo mismo vale decir para D a una distancia de $\lambda/2$, pero en la dirección opuesta: cuando B se encuentra por encima de la posición de reposo, D se halla por debajo, y viceversa. No obstante, los puntos A, C y E nunca se mueven. El punto E, por supuesto, está sujeto rígidamente a la pared; pero es interesante advertir que a distancias múltiplo de media longitud de onda, tales como los puntos C, E y otros de la cuerda, no hay nunca movimiento.

Ahora ya se explica el por qué a ésta se la llama onda estacionaria, es decir, que no progresa por la cuerda. Ciertas partes del hilo vibran, y otras partes no se mueven. En una onda viajera todas las partes del medio vibran.

Los puntos donde no hay desplazamiento, por ejemplo, el C, se llaman nodos. Los puntos de máximo desplazamiento, como el D, se denominan antinodos.

Aplicando las mismas ideas a una onda sonora, se obtienen algunos resultados que servirán para entender el funcionamiento de los instrumentos musicales, acústica arquitectural y materiales absorbentes.