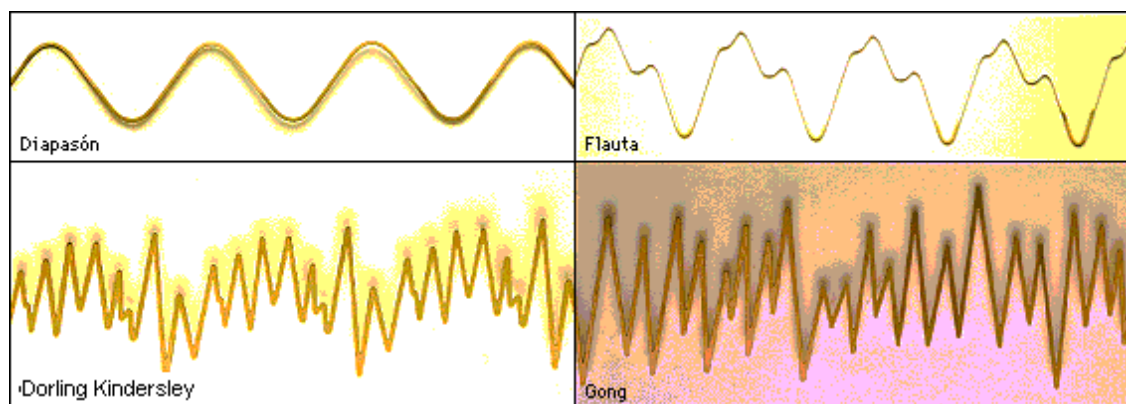


Ondas Sonoras. Introducción



Considerando un globo de caucho, conectado con un cilindro y un émbolo. Al mover el émbolo hacia abajo, se hace que el globo se dilate de forma que las paredes se mueven hacia afuera, comprimiendo el aire circundante. Entonces las moléculas de aire son empujadas hacia afuera, y empujan a las vecinas. Estas, a su vez, son aceleradas y avanzan en pulsos de compresión hacia afuera. Si se eleva el émbolo, se hace que el globo se contraiga. El aire circundante se precipita hacia adentro, formando una rarefacción. Entonces la perturbación avanza alejándose del globo lo mismo que lo hizo la compresión. Si se mueve el émbolo para arriba y para abajo, el globo se dilata y se contrae periódicamente, de modo que se establece un tren de compresiones y rarefacciones alternadas. La longitud de onda es la distancia entre dos puntos consecutivos de máxima compresión. La frecuencia de las ondas de compresión así producidas, es demasiado baja para que nuestros oídos la perciban. Sin embargo, son de la misma naturaleza que las ondas sonoras y tienen la misma velocidad.

Sonido

Fenómeno físico que estimula el sentido del oído. En los seres humanos, esto ocurre siempre que una vibración con frecuencia comprendida entre unos 15 y 20.000 hercios llega al oído interno. El hercio (Hz) es una unidad de frecuencia que corresponde a un ciclo por segundo. Estas vibraciones llegan al oído interno transmitidas a través del aire, y a veces se restringe el término 'sonido' a la transmisión en este medio. Sin embargo, en la física moderna se suele extender el término a vibraciones similares en medios líquidos o sólidos. Los sonidos con frecuencias superiores a unos 20.000 Hz se denominan ultrasonidos.

Este artículo se ocupa de este campo de la física en líneas generales. Para lo relativo a la ciencia arquitectónica del diseño de estancias y edificios con propiedades adecuadas de propagación y recepción del sonido. Para lo relativo a la naturaleza del proceso fisiológico de la audición de sonidos y la anatomía del mecanismo de audición en personas y animales. En cuanto a las propiedades generales de la producción y propagación de ondas vibracionales, entre ellas las ondas de sonido.

En general, las ondas pueden propagarse de forma transversal o longitudinal. En ambos casos, sólo la energía y la cantidad de movimiento del movimiento ondulatorio se propagan en el medio; ninguna parte del propio medio se mueve físicamente a una gran distancia. Por ejemplo, imaginemos que atamos firmemente una cuerda a un poste por un extremo, la estiramos sin tensarla del todo y sacudimos el otro extremo. Una onda se desplazará por la cuerda hacia el poste, donde se reflejará y volverá hacia la mano. En realidad, ninguna parte de la cuerda se mueve longitudinalmente hacia el poste, pero todas las partes de la cuerda se mueven transversalmente. Este tipo de movimiento ondulatorio se denomina onda transversal. Del mismo modo, si tiramos una piedra a un estanque, una serie de ondas transversales se propaga desde el punto de impacto. Un corcho que flote cerca de dicho punto se moverá hacia arriba y hacia abajo, es decir, de forma transversal a la dirección del movimiento ondulatorio, pero apenas mostrará movimiento longitudinal. En cambio, una onda

de sonido es una onda longitudinal. A medida que la energía del movimiento ondulatorio se propaga alejándose del centro de la perturbación, las moléculas de aire individuales que transmiten el sonido se mueven hacia delante y hacia atrás, de forma paralela a la dirección del movimiento ondulatorio. Por tanto, una onda de sonido es una serie de compresiones y enrarecimientos sucesivos del aire. Cada molécula individual transmite la energía a las moléculas vecinas, pero una vez que pasa la onda de sonido, las moléculas permanecen más o menos en la misma posición.

Características físicas

Cualquier sonido sencillo, como una nota musical, puede describirse en su totalidad especificando tres características de su percepción: el tono, la intensidad y el timbre. Estas características corresponden exactamente a tres características físicas: la frecuencia, la amplitud y la composición armónica o forma de onda. El ruido es un sonido complejo, una mezcla de diferentes frecuencias o notas sin relación armónica.

Frecuencia

Existen distintos métodos para producir sonido de una frecuencia deseada. Por ejemplo, un sonido de 440 Hz puede crearse alimentando un altavoz con un oscilador sintonizado a esa frecuencia. También puede interrumpirse un chorro de aire mediante una rueda dentada con 44 dientes que gire a 10 revoluciones por segundo; este método se emplea en las sirenas. Los sonidos de un altavoz y una sirena de la misma frecuencia tendrán un timbre muy diferente, pero su tono será el mismo, equivalente al la situado sobre el do central en un piano. El siguiente la del piano, la nota situada una octava por encima, tiene una frecuencia de 880 Hz. Las notas situadas una y dos octavas por debajo tienen frecuencias de 220 y 110 Hz respectivamente. Por definición, una octava es el intervalo entre dos notas cuyas frecuencias tienen una relación de uno a dos.

Una ley fundamental de la armonía afirma que dos notas separadas por una octava producen una combinación eufónica cuando suenan simultáneamente. Cuando el intervalo es de una quinta o de una tercera mayor, la combinación es progresivamente menos eufónica. En física, un intervalo de una quinta implica que la relación de las frecuencias de ambas notas es de tres a dos; en una tercera mayor, la relación es de cinco a cuatro. La ley de la armonía afirma que dos o más notas producen un sonido eufónico al sonar de forma simultánea si la relación entre sus frecuencias corresponde a números enteros pequeños; si las frecuencias no presentan dichas relaciones, se produce una disonancia. En un instrumento de tonos fijos, como un piano, no es posible establecer las notas de forma que todas estas relaciones sean exactas, por lo que al afinarlo es necesario un cierto compromiso de acuerdo con el sistema de tonos medios o escala temperada.

Amplitud

La amplitud de una onda de sonido es el grado de movimiento de las moléculas de aire en la onda, que corresponde a la intensidad del enrarecimiento y compresión que la acompañan. Cuanto mayor es la amplitud de la onda, más intensamente golpean las moléculas el tímpano y más fuerte es el sonido percibido. La amplitud de una onda de sonido puede expresarse en unidades absolutas midiendo la distancia de desplazamiento de las moléculas del aire, o la diferencia de presiones entre la compresión y el enrarecimiento, o la energía transportada. Por ejemplo, la voz normal presenta una potencia de sonido de aproximadamente una cienmilésima de vatio. Sin embargo, todas esas medidas son muy difíciles de realizar, y la intensidad de los sonidos suele expresarse comparándolos con un sonido patrón; en ese caso, la intensidad se expresa en decibelios.

Intensidad

La distancia a la que se puede oír un sonido depende de su intensidad, que es el flujo medio de energía por unidad de área perpendicular a la dirección de propagación. En el caso de ondas esféricas que se propagan desde una fuente puntual, la intensidad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, suponiendo

que no se produzca ninguna pérdida de energía debido a la viscosidad, la conducción térmica u otros efectos de absorción. Por ejemplo, en un medio perfectamente homogéneo, un sonido será nueve veces más intenso a una distancia de 100 metros que a una distancia de 300 metros. En la propagación real del sonido en la atmósfera, los cambios de propiedades físicas del aire como la temperatura, presión o humedad producen la amortiguación y dispersión de las ondas sonoras, por lo que generalmente la ley del inverso del cuadrado no se puede aplicar a las medidas directas de la intensidad del sonido.

Timbre

Si se toca el la situado sobre el do central en un violín, un piano y un diapasón, con la misma intensidad en los tres casos, los sonidos son idénticos en frecuencia y amplitud, pero muy diferentes en timbre. De las tres fuentes, el diapasón es el que produce el tono más sencillo, que en este caso está formado casi exclusivamente por vibraciones con frecuencias de 440 Hz. Debido a las propiedades acústicas del oído y las propiedades de resonancia de su membrana vibrante, es dudoso que un tono puro llegue al mecanismo interno del oído sin sufrir cambios. La componente principal de la nota producida por el piano o el violín también tiene una frecuencia de 440 Hz. Sin embargo, esas notas también contienen componentes con frecuencias que son múltiplos exactos de 440 Hz, los llamados tonos secundarios, como 880, 1.320 o 1.760 Hz. Las intensidades concretas de esas otras componentes, los llamados armónicos, determinan el timbre de la nota.

Velocidad del sonido

La frecuencia de una onda de sonido es una medida del número de vibraciones por segundo de un punto determinado. La distancia entre dos compresiones o dos enrarecimientos sucesivos de la onda se denomina longitud de onda. El producto de la longitud de onda y la frecuencia es igual a la velocidad de propagación de la onda, que es la misma para sonidos de cualquier frecuencia (cuando el sonido se propaga por el mismo medio a la misma temperatura). Por ejemplo, la longitud de onda del la situado sobre el do central es de unos 78,2 cm, y la del la situado por debajo del do central es de unos 156,4 centímetros.

La velocidad de propagación del sonido en aire seco a una temperatura de 0 °C es de 331,6 m/s. Al aumentar la temperatura aumenta la velocidad del sonido; por ejemplo, a 20 °C, la velocidad es de 344 m/s. Los cambios de presión a densidad constante no tienen prácticamente ningún efecto sobre la velocidad del sonido. En muchos otros gases, la velocidad sólo depende de su densidad. Si las moléculas son pesadas, se mueven con más dificultad, y el sonido avanza más despacio por el medio. Por ejemplo, el sonido avanza ligeramente más deprisa en aire húmedo que en aire seco, porque el primero contiene un número mayor de moléculas más ligeras. En la mayoría de los gases, la velocidad del sonido también depende de otro factor, el calor específico, que afecta a la propagación de las ondas de sonido.

Generalmente, el sonido se mueve a mayor velocidad en líquidos y sólidos que en gases. Tanto en los líquidos como en los sólidos, la densidad tiene el mismo efecto que en los gases; la velocidad del sonido varía de forma inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad. La velocidad también varía de forma proporcional a la raíz cuadrada de la elasticidad. Por ejemplo, la velocidad del sonido en agua es de unos 1.500 m/s a temperaturas ordinarias, pero aumenta mucho cuando sube la temperatura. La velocidad del sonido en el cobre es de unos 3.500 m/s a temperaturas normales y decrece a medida que aumenta la temperatura (debido a la disminución de la elasticidad). En el acero, más elástico, el sonido se desplaza a unos 5.000 m/s; su propagación es muy eficiente.

Refracción, reflexión e interferencias

El sonido avanza en línea recta cuando se desplaza en un medio de densidad uniforme. Sin embargo, igual que la luz, el sonido está sometido a la refracción, es decir, la desviación de las ondas de sonido de su trayectoria original. En las regiones polares, por ejemplo, donde el aire situado cerca del suelo es más frío que el de las capas más altas, una onda de sonido ascendente que entra en la región más caliente, donde el sonido avanza a

más velocidad, se desvía hacia abajo por la refracción. La excelente recepción del sonido a favor del viento y la mala recepción en contra del viento también se deben a la refracción. La velocidad del aire suele ser mayor en las alturas que cerca del suelo; una onda de sonido ascendente que avanza a favor del viento se desvía hacia el suelo, mientras que una onda similar que se mueve en contra del viento se desvía hacia arriba, por encima de la persona que escucha.

El sonido también se ve afectado por la reflexión, y cumple la ley fundamental de que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Un eco es el resultado de la reflexión del sonido. El sonar se basa en la reflexión de los sonidos propagados en agua. Una bocina es un tubo cónico que forma un haz de ondas de sonido reflejando algunos de los rayos divergentes en los lados del tubo. Un tubo similar puede recoger ondas de sonido si se dirige el extremo ancho hacia la fuente de sonido.

El sonido también experimenta difracción e interferencia. Si el sonido de una única fuente llega a un oyente por dos trayectorias diferentes por ejemplo, una directa y otra reflejada, los dos sonidos pueden reforzarse; sin embargo, si no están en fase pueden interferir de forma que el sonido resultante sea menos intenso que el sonido directo sin reflexión. Las trayectorias de interferencia son distintas para sonidos de diferentes frecuencias, con lo que la interferencia produce distorsión en sonidos complejos. Dos sonidos de distintas frecuencias pueden combinarse para producir un tercer sonido cuya frecuencia es igual a la suma o diferencia de las dos frecuencias originales.

Sensaciones de tono

Si se practica una audimetría a una persona joven normal, se comprueba que su oído es sensible a todos los sonidos entre 15–20 hercios y 15.000–20.000 hercios. El oído de las personas mayores es menos agudo, sobre todo en las frecuencias más elevadas. El oído es especialmente sensible en la gama que va desde el la situado por encima del do central hasta el la que está cuatro octavas por encima; en esa zona, una persona puede percibir un sonido cientos de veces más débil que una octava por encima o dos octavas por debajo. El grado en que un oído sensible puede distinguir entre dos notas puras que difieran ligeramente en intensidad o frecuencia varía en los diferentes rangos de intensidad y frecuencia de los tonos. En sonidos de intensidad moderada situados en el rango de frecuencia para el que el oído es más sensible (entre 1.000 y 2.000 Hz aproximadamente), es posible distinguir una diferencia de intensidad de un 20% (1 decibelio, o dB) y una diferencia en frecuencia de un 0,33% (alrededor de una vigésima de nota). En este mismo rango, la diferencia entre el sonido más tenue que puede oírse y el sonido más fuerte que puede distinguirse como tal sonido (los sonidos más fuertes se 'sienten', o perciben, como estímulos dolorosos) es de unos 120 decibelios: una diferencia de intensidad de aproximadamente un billón de veces.

Todas estas pruebas de sensibilidad se refieren a tonos puros, como los producidos por un oscilador electrónico. Incluso para esos tonos puros, el oído es imperfecto. Dos notas con frecuencia idéntica pero una gran diferencia de intensidad pueden aparentar una ligera diferencia de tono. Más importante resulta la diferencia en las intensidades relativas aparentes en las distintas frecuencias. A intensidades altas, el oído es aproximadamente igual de sensible a la mayoría de las frecuencias, pero a bajas intensidades el oído es mucho más sensible a las frecuencias medias que a las extremas. Por tanto, un equipo de reproducción de sonido que funciona perfectamente parecerá no reproducir las notas más graves y agudas si se reduce mucho la intensidad.

Tres tipos de sonido importantes

En la voz, la música y el ruido, es raro escuchar un tono puro. Una nota musical contiene, además de la frecuencia fundamental, tonos más agudos que son armónicos de la misma. La voz contiene una mezcla compleja de sonidos, de los que algunos (pero no todos) guardan una relación armónica entre sí. El ruido está formado por una mezcla de muchas frecuencias diferentes dentro de un determinado rango; por tanto, puede compararse con la luz blanca, que se compone de una mezcla de luces de los distintos colores. Los distintos

ruidos se distinguen por sus diferentes distribuciones de energía en los distintos rangos de frecuencias.

Cuando se transmite al oído un tono musical que contiene determinados armónicos del tono fundamental, pero carece de otros armónicos o del propio tono fundamental, el oído forma diferentes 'batidos' o pulsaciones cuya frecuencia es la suma o la diferencia de los sonidos originales, con lo que producen los armónicos que faltan o el tono fundamental que no figura en el sonido original. Estas notas también son armónicos de la nota fundamental original. Esta respuesta incorrecta del oído puede resultar útil. Por ejemplo, un equipo reproductor de sonido sin un altavoz grande no puede producir sonidos de tono más grave que el do situado dos octavas por debajo del do central; sin embargo, el oído de una persona que escuche ese equipo puede proporcionar la nota fundamental a partir de las frecuencias de batido de sus armónicos. Otra imperfección del oído ante los sonidos ordinarios es la incapacidad de oír notas de alta frecuencia cuando existen sonidos de baja frecuencia de intensidad considerable. Este fenómeno se denomina enmascaramiento.

En general, para que se entienda el habla y se comprenda satisfactoriamente un tema musical basta reproducir las frecuencias entre 250 y 3.000 Hz (el rango de frecuencias de un teléfono normal), aunque algunos sonidos como la *zeta* requieren frecuencias de hasta 6.000 Hz. Sin embargo, para que el efecto sea natural hay que reproducir el rango que va aproximadamente de 100 a 10.000 Hz. Los sonidos generados por unos pocos instrumentos musicales sólo pueden reproducirse con naturalidad con frecuencias algo más bajas, y algunos ruidos necesitan frecuencias más altas.

En cuanto a la conversión de ondas de sonido en ondas eléctricas y viceversa.

Efecto Doppler

La frecuencia de una onda, que es ordinariamente igual a la de fuente, se puede cambiar al moverse de fuente, el observador, o ambos. Cuando el observador se dirige hacia la fuente sonora, entran a su oído más ondas por segundo, y la frecuencia se eleva. Cuando se mueve alejándose de la fuente, le llegan menos ondas por segundo, y la frecuencia disminuye. Este fenómeno se denomina *efecto Doppler* y es válido para todas las ondas, pero nosotros nos ocuparemos de tal en el sonido.

Cuando una persona viaja en automóvil y pasa a otro, cuya bocina está sonando, se puede notar una reducción pronunciada en la frecuencia del sonido. Antes de pasar otro auto, la frecuencia era superior a la normal. Después, se hizo inferior a la normal –de ahí proviene la reducción repentina de la frecuencia en el instante de pasar. Si ambos autos estuvieran en reposo, la frecuencia del sonido que se escucha estaría dada por una fórmula:

velocidad de la onda

$f =$

longitud de onda

Si uno se dirige hacia la fuente sonora con una velocidad v' , la velocidad aparente de la onda es $v + v'$; por consiguiente, la frecuencia está dada por:

$v + v'$

$f' =$

longitud de onda

Dividiendo las ecuaciones anteriores miembro a miembro:

$$f' = v + v'$$

$$f v$$

Si se aleja de la fuente:

$$f' = v - v'$$

$$f v$$

Cuando el observador está en reposo y la fuente se mueve con una velocidad v' :

$$f' = v$$

$$f v (+-) v'$$

Resumen:

El sonido es un tren de ondas de compresión que se puede oír. La velocidad del sonido en un lugar es independiente de la presión, y es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura Kelvin.

Los sonidos emitidos por un tubo cerrado en un extremo son las armónicas impares cuyas frecuencias son 1, 3, 5.... veces la frecuencia del tono fundamental o primera armónica. Los sonidos emitidos por un tubo abierto en ambos extremos tiene frecuencia 1, 2, 3, 4, 5..... veces la fundamental.

Dos fuentes sonoras de frecuencia diferente hacen que un sonido, cuya intensidad aumenta o disminuye, produzca pulsaciones. El número de pulsaciones por unidad de tiempo está dado por: $f = f_2 - f_1$

Cuando un observador se mueve hacia una fuente sonora o se aleja de la misma con una velocidad v' , la frecuencia f' del sonido que percibe está dada por:

$$f' = v (+-) v'$$

$$f v$$

Las características psicológicas de los sonidos musicales son intensidad, timbre y altura. La intensidad depende de la amplitud de las vibraciones sonoras y de la sensibilidad del oído, la altura de la frecuencia, y el timbre de la combinación de frecuencias que existen.

Instrumentos de viento

Se basan en el principio del tubo de órgano. Los hay de frecuencia variable en forma continua (trombón, trompeta) y de frecuencias fijas (órgano, flauta). En todos ellos se excitan vibraciones estacionarias de una columna de aire, las cuales, a su vez, excitan ondas sonoras en el medio ambiente. La única forma de modificar la frecuencia de un tono en un instrumento de viento es variando la longitud de la columna de aire vibrante. Al ser muy grandes las longitudes para las frecuencias bajas, los instrumentos de viento de tonos graves (tuba) tienen dimensiones grandes. Para afinar los instrumentos de viento, por ejemplo un órgano, es necesario modificar la longitud de los tubos (habiendo en cada tubo dispositivos para ello). En un órgano, hay tubo tapados y abierto. Los tapados suenan una octava más abajo que los abiertos. Para afinar los instrumentos según la escala armónica, se recurre a un elemento con frecuencia patrón (diapasón), se afina una nota, haciéndola sonar simultáneamente y prestando atención a las variaciones periódicas de intensidad (batido). En caso de que aparezcan, se modifica la frecuencia de la nota en el sentido de hacer decrecer la frecuencia de

batido. una vez afinada la nota do3 se procede a afinar las otras octavas en base a ella. Para afinar un instrumento de viento según la escala armónica, no es necesario tener oído educado musicalmente (sí es necesario para el resto de las notas).

Los instrumentos de viento hacen uso o aprovechan las resonancias que producen las ondas sonoras en cavidades (ej: tubos). Estos instrumentos suenan debido a que se producen ondas estacionarias dentro de ellos, forzadas por el soplido que se ejecuta. Estas ondas son análogas a, por ejemplo, las que se producen en una cuerda con un extremo forzado, con la diferencia de que en esta última las ondas son transversales. Las diferentes notas musicales se consiguen cambiando la configuración de la cavidad resonante (por ejemplo, en las flautas se tapan diferentes orificios con los dedos). Finalmente, hay que destacar que la resonancia es forzada por un elemento vibrante controlado por la boca del ejecutor (en un saxofón el elemento vibrante es la caña o lengüeta, que no vibraría si no fuera por la fuerza que ejerce el músico sobre ella; en otros instrumentos de viento, como la trompeta, el trombón y la tuba, el elemento vibrante es el labio del propio ejecutor).

Instrumentos de percusión

Los instrumentos de percusión hacen uso directo de las vibraciones que producen ciertos elementos al recibir un impacto. Este último puede realizarse directamente a través de la mano o con algún objeto intermediario. Las vibraciones que producen estos instrumentos se propagan a través del aire para llegar a nuestros oídos. La particularidad que poseen es que producen una nota constante, a diferencia de los de viento que pueden ser manipulados para variar. Algunos ejemplos son los tambores, redoblantes, rototón, que se golpean con varas de diferentes materiales y vibran produciendo sonidos de diferentes características. El triángulo, se golpea con una vara de metal, y, al ser de material compacto vibra a alta frecuencia, produciendo un sonido muy agudo. Otros instrumentos, como el xilofón, pueden tener una combinación de varios elementos fijos que producen una cadena de notas.

Trabajo Práctico de Física

Ondas Sonoras. Instrumentos de viento y percusión