

Cuando mi voz calle con la muerte, mi corazón te seguirá hablando.

Rabindranath Tagore

Habla para que yo te conozca.

Sócrates

CONTENIDOS

- Propagación, producción y percepción del sonido
- Aplicaciones de los ultrasonidos
- Las ondas sonoras
- Intensidad del sonido y sonoridad
- Características del sonido
- Reflexión y refracción del sonido
- Resonancia
- Efecto Doppler
- La audición y el oído humano
- Contaminación sonora

13 ONDAS SONORAS

Este es el sonar utilizado por The National Geographic en la búsqueda del barco A. R. A. General Belgrano.



El sonido es una de las formas de comunicación más importantes para los seres humanos y para otros seres vivos, como los animales, que pueden entenderse a través de los sonidos que emiten, y obtener información del medio que habitan por los sonidos que perciben.

El rápido avance tecnológico en el campo de las comunicaciones entre personas, que incluye no solo ondas mecánicas como las del sonido sino también ondas electromagnéticas, permite mejorar las formas de acceso a información de distintas índoles. A modo de ejemplo, se puede citar la evolución en las comunicaciones aprovechando los avances de la informática, que utiliza las redes de computación para la integración de sonidos e imágenes. También todos los sistemas de grabación y reproducción que almacenan señales sonoras como música, videos con imágenes, o películas.

En otros campos, las ondas sonoras se aplican para la detección de objetos. En la pesca se utiliza un aparato llamado **sonar** que permite detectar bancos de peces, u objetos perdidos en el fondo de mares, océanos, u otros cuerpos de agua de gran profundidad.

En medicina, los **ecógrafos** permiten el diagnóstico de las características y situación de distintas partes del cuerpo humano a través de la emisión y reflexión de ondas sonoras.

En otro orden, la relación del sonido con la música es uno de los campos más explorados por el ser humano y tiene miles de años de historia, ya que la actividad musical es anterior a la invención de la escritura.

Para la comprensión de muchos fenómenos sonoros, como algunos de los que aquí se mencionan, es necesario estudiar las propiedades físicas del sonido y sus aplicaciones, temas que serán tratados en este capítulo.



Auditorio Nacional de Música. Andalucía, España.

Desde la Antigüedad, la Física y la música han estado estrechamente unidas. Homero, el poeta griego del siglo VIII a.C, ya hace referencia en sus obras a las condiciones físicas de producción de sonidos, sobre todo en la descripción de las escenas de combate o naufragio.

Las investigaciones de los pensadores de la escuela pitagórica (fundada por Pitágoras alrededor del año 530 a.C) en la rama de la Física conocida como **Acústica**, se refieren a dos temas diferentes: la teoría de la naturaleza del sonido y la teoría matemática de la escala musical.

Aristóteles (384-322 a.C) por su parte, describe el sonido como un aliento con impulso.

En los siglos XVI, XVII y XVIII, junto con el desarrollo de la Mecánica, la Acústica se separa del arte musical para convertirse en una ciencia que estudia los fenómenos sonoros.

En este contexto, uno de los problemas fundamentales en las investigaciones teóricas sobre la emisión de sonidos, es el tema de las vibraciones de las cuerdas.

Galileo (1564-1642) en 1638 enuncia la noción de frecuencia de las vibraciones de una cuerda y demuestra que ésta depende de una serie de factores, tales como la longitud, la tensión y la masa de la cuerda. Newton (1642-1727) en 1687 considera que las vibraciones de las cuerdas provocan directamente el sonido y se lo imagina como choques que se propagan de partícula en partícula uniformemente y en todas direcciones.

Los estudios sobre la luz realizados durante el siglo XVII comienzan a vincular el sonido con una forma de propagación (el movimiento ondulatorio) similar a la de la luz.

Una serie de experimentos durante los siglos XVII y XVIII confirman que el sonido se propaga a mayor velocidad en un líquido que en el aire, y que no lo hace en el vacío.

Los estudios teóricos y prácticos del siglo XIX parten de la concepción del sonido como una vibración que se propaga en un medio material, y llegan a investigar los fenómenos de reflexión y refracción del sonido. También se avanza en las explicaciones sobre los fenómenos de interferencia y resonancia, y en 1842 se descubre el efecto Doppler acústico.



La lira es un instrumento de cuerdas cuyo origen se desconoce pero que se utiliza desde la Antigüedad. Las notas se producen por la vibración de las cuerdas.

Producción, propagación y percepción del sonido



El sonido de una campana se produce por las vibraciones de este objeto. La campana más grande en funcionamiento se encuentra en Cologne, Nordrhein-Westfalen, Alemania.



El violín, un instrumento de cuerda. No es posible establecer con exactitud si es de origen europeo u oriental. En el siglo XVII el violín (*violino*) se encontraba bastante difundido en Italia aunque carecía de todo prestigio. El compositor Claudio Monteverdi fue uno de los que apreció sus posibilidades sonoras, y lo usó para complementar las voces corales en su ópera *Orfeo* (1607). Desde entonces se le dio creciente importancia.

La trompeta es un instrumento de viento que puede producir sonidos estridentes pero también suaves dependiendo de las vibraciones que sufre el aire mientras se propaga en el interior de los tubos metálicos. El instrumento tiene más de 3500 años de antigüedad: en el interior de la tumba del faraón egipcio Tutankamón se encontraron trompetas de bronce y de plata.

Para comprender la naturaleza del sonido, es necesario describir y analizar cómo se produce, cómo se propaga y cómo se percibe.

Todos los sonidos se producen por las vibraciones de algún objeto o medio material. Si se golpea, por ejemplo, una olla, una campana, una puerta, etc., se produce un sonido que perdura hasta que el objeto deja de vibrar.

En otros casos, el sonido se produce por la vibración de una columna de aire contenida en un tubo, como en un silbato.

Los instrumentos musicales de viento, trompetas, flautas y similares, también emiten sonidos debido a la vibración de una columna de aire. Se diferencian entre sí por el tamaño, la forma que adopta la columna o tubo de aire y el modo como se generan las vibraciones.

Algunos de ellos, como el clarinete, tienen una lengüeta o lámina fina. La corriente de aire que se produce cuando la persona sopla, hace vibrar la lengüeta, y ésta a su vez, hace vibrar la columna de aire en el instrumento.

En los instrumentos de cuerda como la guitarra o el violín, el sonido se produce por la vibración de las cuerdas.

Para la producción de sonidos es necesario que exista una fuente que vibre, como la campana, una columna de aire, una cuerda, etc., pero además, es imprescindible que la vibración se propague en algún medio material.

El sonido puede propagarse en los sólidos, líquidos y gases aunque no lo hace con la misma velocidad, ya que ésta varía según las características físicas y las propiedades del medio. Mientras que en el acero la velocidad es de 5900 m/s, en el agua a 20 °C es de 1500 m/s.

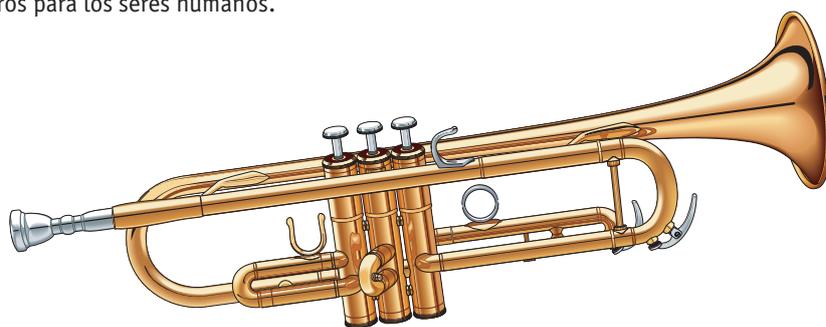
La temperatura del medio también influye en la velocidad de propagación. Por ejemplo: la velocidad de propagación del sonido en el aire a 20 °C es de 343 m/s, mientras que si la temperatura es de 0 °C su valor desciende a 331 m/s.

Puede ocurrir que exista una fuente que produzca vibraciones que se propagan en un medio, pero que no pueden ser percibidas por el oído humano. Entonces para hablar de sonidos también debe considerarse su percepción.

El **rango de audición** para el oído humano está comprendido entre frecuencias de 20 Hz a 20 000 Hz, límites mínimo y máximo respectivamente de percepción del sonido. Se trata de valores promedio, ya que varían de persona a persona.

La mayor sensibilidad está comprendida normalmente entre las frecuencias de 1000 Hz a 5000 Hz. Algunas personas ancianas son menos sensibles a frecuencias superiores a 1000 Hz.

Aquellos procesos sonoros inferiores a los 20 Hz se denominan **infrasonidos**, y los superiores a 20 000 Hz se llaman **ultrasonidos**. Normalmente estas frecuencias no pueden ser percibidas por las personas, por lo cual no se consideran fenómenos sonoros para los seres humanos.



Aplicaciones de los ultrasonidos

En el campo de la medicina, los ultrasonidos son muy utilizados en distintas especialidades para explorar y obtener información sobre algunas partes del cuerpo humano. Por ejemplo, en obstetricia, la **ecografía** o **ultrasonografía** es un método diagnóstico que emplea ondas sonoras de alta frecuencia (ultrasonidos) para obtener imágenes de los órganos internos de un feto al captar el eco o reflejo de estas ondas.

Esta exploración no utiliza radiación electromagnética como los rayos X, que son más invasivos y riesgosos. La ecografía obstétrica puede confirmar un embarazo, estimar el tiempo de gestación, diagnosticar malformaciones congénitas, valorar la posición del feto, determinar si un embarazo es múltiple, etc.

Un ecógrafo está formado por un sistema de transductores o dispositivos que transforman señales eléctricas en ultrasonidos, y luego, cuando reciben el eco, transforman el ultrasonido en pulsos eléctricos. Cuando se coloca el transductor sobre la piel de la persona, se producen ultrasonidos que se propagan en la pelvis y el interior del abdomen. Al llegar al feto y a los tejidos que lo rodean, como los del útero o la placenta, las ondas se reflejan y el eco es captado por el transductor, que al traducir estas señales sonoras en eléctricas permite obtener en tiempo real la imagen de un feto en un monitor. Esto significa que es posible captar las características físicas y el movimiento del feto en el mismo tiempo en que se está efectuando el estudio médico. Estas imágenes se pueden grabar en un video y también imprimir en una placa o papel.

Los actuales ecógrafos permiten obtener imágenes 3D (tridimensionales) en movimiento, también en tiempo real.

Otras especialistas médicas como urólogos, gastroenterólogos, nefrólogos utilizan ecógrafos que funcionan con ultrasonidos para determinar posibles anomalías en las características físicas y funcionamiento de los órganos.

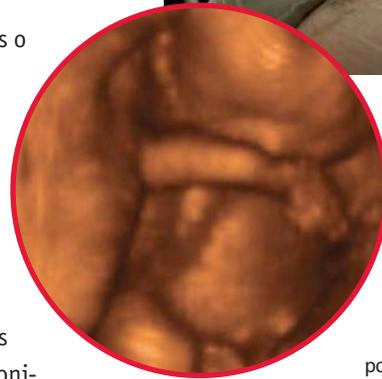
El nefrólogo, especialista en riñones, utiliza un nefroscopio que permite no solo visualizar los riñones de un paciente, sino también, en algunos casos, eliminar cálculos renales.

En los últimos años se produjo un sorprendente incremento de las técnicas de ultrasonido aplicadas al control de calidad de los alimentos. En ellas se aplica el principio que señala que las propiedades del medio a través del cual se propaga una onda sonora afectan su velocidad de propagación.

Por ejemplo, si en la leche, que se presupone esterilizada, hay un crecimiento de los microorganismos, el receptor de ultrasonidos detectará una variación en la velocidad normal de propagación de la onda. De esta forma no es necesario abrir los envases para descubrir una contaminación microbiana.

También se han desarrollado métodos para el control de las carnes y quesos por medio de ultrasonidos, que permiten evaluar la composición y la textura de estos alimentos.

En el ámbito de la industria se utilizan técnicas por ultrasonidos de alto rendimiento para oclusión de piezas metálicas, y para remachado y soldadura de algunos objetos de plástico poroso producidos en serie como lapiceras, bolígrafos, o focos traseros de automóviles.



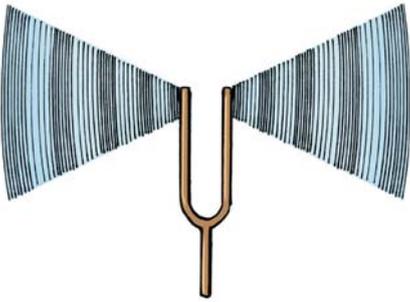
Las ecografías obstétricas permiten controlar el estado de un embarazo.

Esta es la imagen tridimensional de un bebé en gestación obtenida por un ecógrafo.



Imágenes de un bebé en gestación captada por un ecógrafo.

Las ondas sonoras



Un diapasón que vibra produce ondas sonoras.

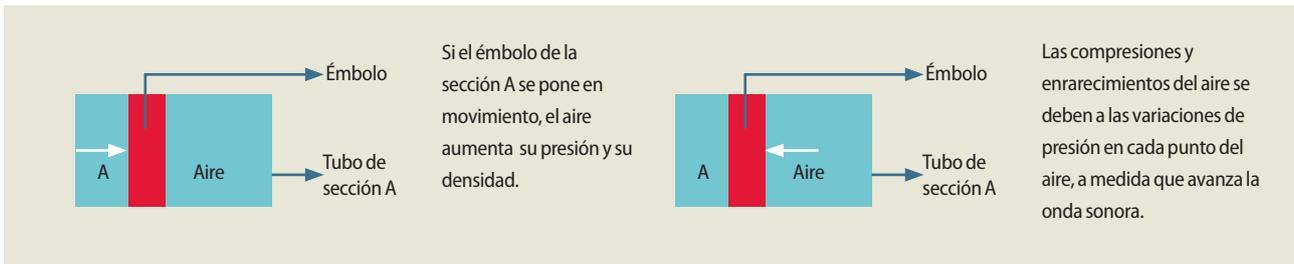
Las **ondas sonoras** son ondas longitudinales que se propagan en un medio material y se originan en las vibraciones que provoca una fuente emisora.

Para ejemplificar la propagación del sonido en un medio fluido como el aire, se puede analizar la siguiente experiencia: se coloca una regla de metal sobre una mesa, se sujeta un extremo mientras se levanta el extremo libre y luego se lo suelta. Las vibraciones que se producen llegan a las partículas sucesivas de aire en la dirección de propagación de la onda. Si el extremo libre de la regla oscila con movimiento armónico simple, se propagan en el aire un conjunto de ondas longitudinales periódicas que se alejan de la fuente.

De igual modo un diapasón (horquilla de metal que se utiliza para afinar instrumentos musicales) al vibrar produce ondas armónicas longitudinales, ya que las partículas del aire vibran en la misma dirección en que se propaga la onda.

También es posible describir este fenómeno considerando las variaciones de presión que se producen en cada punto del aire alcanzado por la onda de sonido.

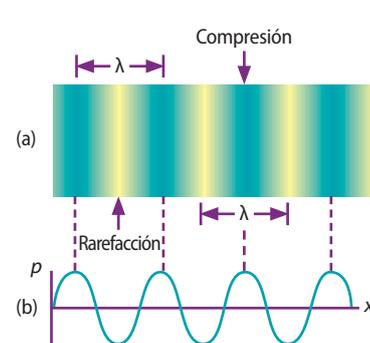
Se puede suponer que cada pequeño volumen de aire alcanzado por la onda es como un tubo de sección A con un émbolo o dispositivo móvil, que contiene una determinada cantidad de aire. Si el pistón del émbolo se encuentra en reposo, el aire del tubo está en equilibrio, lo cual implica que la presión y densidad se mantienen constantes.



Si el pistón se mueve, las vibraciones de la capa de aire más cercana se moverán en la misma dirección en que se propaga la perturbación. Esta capa de aire ejerce presión sobre las capas vecinas y se forma una región de **compresión** donde los valores de presión y densidad del aire son mayores que los que corresponden a la situación de equilibrio.

El movimiento de regreso del pistón, se forma una zona de **enrarecimiento** del aire donde la presión y la densidad alcanzan valores más bajos que los de la situación en equilibrio.

El movimiento oscilatorio del pistón produce una serie de compresiones y enrarecimientos del aire que se propagan a lo largo del tubo. De esa manera se propaga una onda sonora en el aire: en cada punto se producen pequeñas variaciones de presión.



Es posible representar gráficamente la presión p de cada punto del aire en función del desplazamiento x . La distancia entre dos compresiones o enrarecimientos sucesivos determina la longitud de onda.

El gráfico (a) muestra las compresiones y enrarecimientos de una onda sonora en el aire en un determinado tiempo.

El gráfico (b) muestra la variación sinusoidal de la presión p en función del desplazamiento x .

Intensidad del sonido y sonoridad

La **intensidad** de una onda sonora es una medida de la energía que se propaga por unidad de tiempo y por unidad de área.

Si una fuente emisora, por ejemplo un parlante, vibra, se genera una onda que avanza en todas las direcciones con una velocidad característica para el medio, transfiriendo energía en una superficie esférica.

Si el parlante tiene una potencia (rapidez con que se emite energía) de 1000 watt, emite más energía por segundo que otro de 500 watt, y además, a medida que la onda esférica se propaga, la energía se distribuye en áreas esféricas cada vez mayores.

Se define entonces la **intensidad sonora** como la potencia transferida por una onda sonora a través de una superficie colocada perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda. Matemáticamente:

$$I = \frac{P}{S}$$

donde P es la potencia, S la superficie perpendicular a la dirección de propagación, e I la intensidad sonora.

La intensidad sonora se mide en W/m^2 , es decir, watt sobre metro cuadrado.

La menor intensidad de sonido que puede percibir el oído humano es del orden de $10^{-12} W/m^2$; a este valor se lo denomina **umbral de la audición**.

La intensidad de sonido máxima llamada **umbral de dolor** es de $1 W/m^2$. Este valor representa el máximo tolerado por el oído humano, y es un billón de veces mayor que el valor mínimo audible. Si se supera este valor máximo la sensación se vuelve dolorosa y con riesgo de daños físicos u otros tipos de trastornos en la salud.

No todas las personas tienen la misma sensibilidad frente a los sonidos, pero es indudable que este intervalo de intensidades detectadas por el oído humano es muy amplio. Debido a esto se adopta una escala logarítmica para analizar y comparar las intensidades de distintos sonidos. La unidad de esta escala es el **decibel** (dB) en homenaje a Alexander Graham Bell (1847-1922), científico e inventor inglés a quien se le atribuye la invención del teléfono. El valor $10^{-12} W/m^2$ corresponde a 0 dB; las restantes escalas son factores de diez, con lo cual un sonido diez veces más intenso que el umbral de la audición, tiene una intensidad de 10 decibeles (corresponde al valor $10^{-11} W/m^2$). Un sonido de 20 dB corresponde a un sonido 100 veces más intenso que el umbral de la audición.

La **intensidad relativa**, β , de un sonido en decibeles se expresa de la siguiente forma:

$$\beta = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0} = 10 \cdot \log \frac{I}{10^{-12} W/m^2}$$

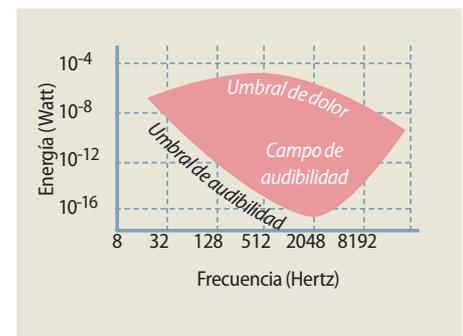
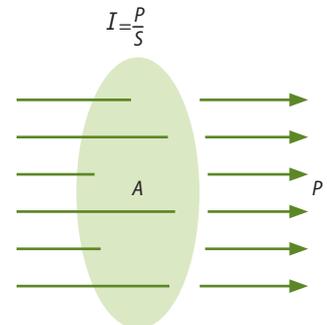
donde I es la intensidad del sonido e I_0 representa al umbral de la audición.

Se denomina **sonoridad** a la sensación de intensidad del sonido (no a la intensidad misma) relacionada con las características fisiológicas del sistema auditivo de cada persona y además con la frecuencia del sonido.

Tabla del nivel de sonoridad de algunos fenómenos

Nivel de sonido	Umbral de audibilidad	Susurro	Conversación	Tráfico urbano	Concierto de rock	Reactor a 10 m de distancia
dB	0	30	60	90	120	150

La **intensidad sonora** es una medida de la potencia con que la onda atraviesa una unidad de superficie perpendicular a la dirección de propagación.

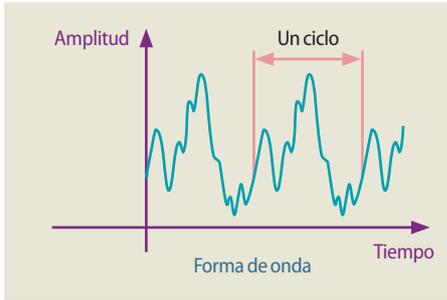


Esquema gráfico del campo de audibilidad del oído humano.

1. ¿Cuántas veces más intenso es un sonido de 70 dB respecto de otro de 40 dB?



Características del sonido



Representación de la onda sonora emitida por un piano. Este gráfico indica los valores de presión o amplitud que toma el aire en cada punto, representados en el eje vertical, en función del tiempo, representado en el eje horizontal.

Para distinguir un sonido de otro es necesario conocer sus características, que son la intensidad, la altura y el timbre.

Cuando se habla de sonidos fuertes como el de un avión al despegar y débiles como el murmullo de voces, se hace referencia a la intensidad de los sonidos, que como ya se ha dicho, está relacionada con la sonoridad.

Cuando la propagación se produce en el aire, la **intensidad** del sonido depende de las diferencias de presiones máximas y mínimas que puede alcanzar el medio en cada punto considerado. Si se representa gráficamente la propagación de la onda sonora en el aire, la intensidad está asociada a la amplitud de la onda. Los sonidos más intensos o fuertes tienen mayor amplitud de onda que los sonidos menos intensos o débiles.

La **altura o tono** de un sonido determina si es grave o agudo. Se relaciona con la frecuencia de la onda: los sonidos agudos corresponden a mayores frecuencias que los sonidos graves.

Por ejemplo, el sonido más grave de una guitarra corresponde a una frecuencia de 82,4 Hz, y el sonido más agudo, a 698,5 Hz.

Una cuerda de violín produce un sonido más agudo que la cuerda en la misma posición de una viola.

En música se designa el tono por las notas, por ejemplo, una nota fundamental o estándar es el LA que tiene una frecuencia de 440 Hz, es decir que al tocar la tecla correspondiente de un piano se producen en la cuerda 440 oscilaciones por segundo.

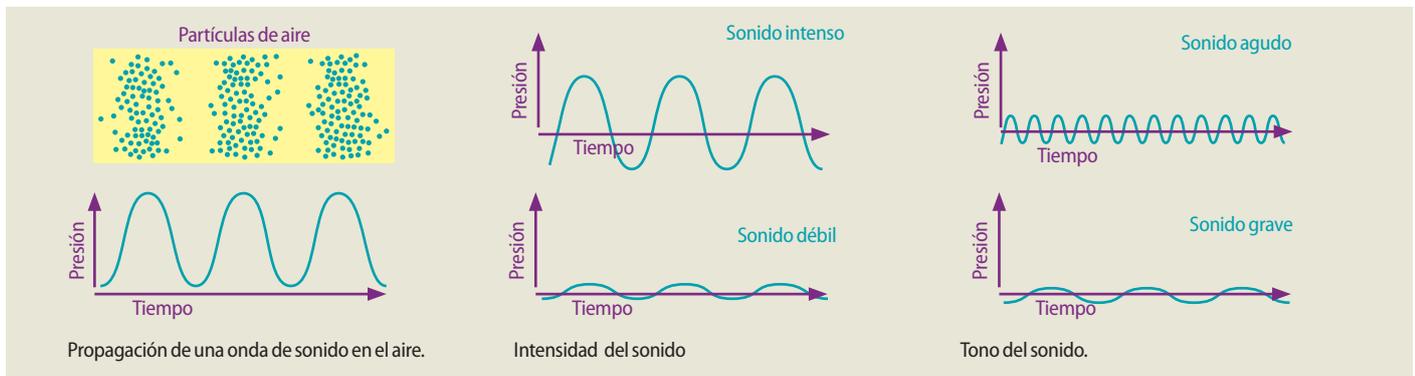
Las notas musicales se obtienen variando las frecuencias de las fuentes sonoras que vibran en el instrumento musical, lo que se logra modificando el tamaño, la tensión o la masa del cuerpo que al oscilar emite el sonido. Cuando los guitarristas o violinistas afinan su instrumento lo hacen ajustando las clavijas, ya que de este modo varían las tensiones de las cuerdas.

En los instrumentos de viento, el largo de la columna de aire que vibra se puede modificar como en el caso de la trompeta. En otros instrumentos, como la flauta, el clarinete o el saxofón, se puede variar la altura o tono de las notas que se ejecutan abriendo y cerrando agujeros que forman parte de estos instrumentos.

Aunque el oído humano puede detectar frecuencias entre los 20 Hz y 20 000 Hz, las frecuencias de las notas musicales llegan solamente a los 4500 Hz, como el caso del piano, cuyo rango de frecuencias (32 Hz a 3950 Hz) cubre el rango de todos los otros instrumentos.

Teniendo en cuenta que el oído humano puede diferenciar sonidos con 1 Hz de diferencia, se podrían tener unas 4000 notas en la escala musical, aunque solo hay 88 en un piano.

La voz humana está comprendida entre frecuencias del orden de los 80 Hz, la más grave, de bajo, y 1200 Hz, la más aguda, de soprano.



Timbre de un sonido

El timbre es la cualidad del sonido que permite distinguir qué instrumento lo está emitiendo, aun cuando tenga igual tono e intensidad que otro. Una nota emitida por un violín, por ejemplo, suena diferente de la misma nota emitida por una guitarra.

Debido a esta cualidad es posible reconocer a una persona por su voz, que resulta una característica de cada individuo. Las oscilaciones que se producen en las cuerdas vocales por el pasaje del aire que llega de los pulmones y pasa por la laringe hacia la boca, permiten la emisión de la voz humana. La lengua, el paladar, la boca y los labios, la nariz y la garganta son verdaderas cajas de resonancia que producen un efecto de amplificación de los sonidos emitidos y caracterizan el timbre de voz propio en cada ser humano.

El **timbre** está relacionado con la complejidad de las ondas sonoras que llegan al oído. Pocas veces las ondas sonoras corresponden a sonidos puros, como el caso del diapasón que emite un sonido de una única frecuencia.

Los instrumentos musicales, por el contrario, emiten sonidos que resultan de vibraciones complejas. Según se ha visto en el capítulo anterior, el Teorema de Fourier permite analizar una onda compleja como la suma de ondas armónicas simples de una frecuencia y amplitud determinadas, cada una de las cuales, en forma separada, corresponde a un sonido puro.

La frecuencia que más se percibe se denomina **frecuencia fundamental** que es la más baja que emite el instrumento. A esta onda se le suman otras denominadas **armónicas** o **sobretonos**, cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental, pero de amplitudes (volumen) muy inferiores. Por ejemplo, la primera armónica tiene una frecuencia igual al doble de la fundamental. Cuando un sonido tiene el doble de frecuencia que el otro, se dice que está una octava por encima, o que es una octava más agudo.

En un piano se disponen grupos de siete teclas blancas y cinco teclas negras. Cada octava tecla cierra un grupo y abre otro. Por esta razón la distancia musical entre esas teclas se llama **octava**. La frecuencia de cada tecla de la octava que sigue es el doble de la tecla de la octava anterior y la frecuencia de la misma nota que corresponde a la octava anterior, es la mitad.

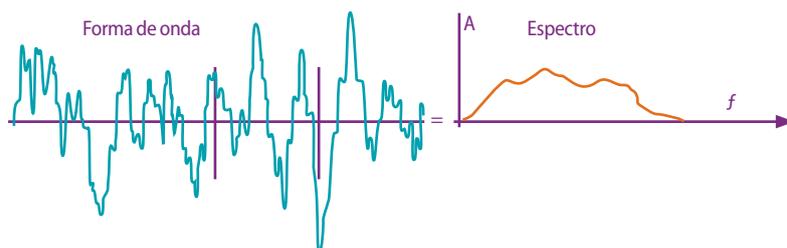
También se pueden analizar las frecuencias armónicas de un sonido mediante un gráfico del espectro sonoro emitido por el instrumento, como se muestra en la siguiente figura.

En el eje de las abscisas se representan los valores de la frecuencia y en el eje de las orde-

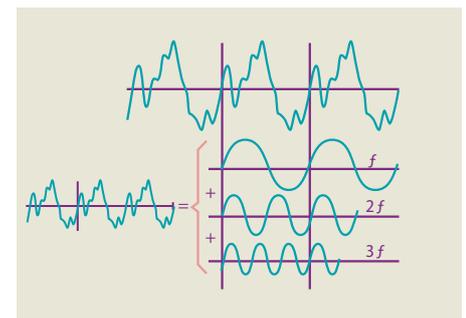


nadas, la amplitud de la onda. Para un sonido armónico como el de una guitarra o un piano, el gráfico que se obtiene es una sucesión de barras.

Los ruidos no tienen frecuencias definidas, de modo que el espectro ya no se muestra



Alrededor del año 1695 un italiano llamado **Bartolomeo Cristofori** construyó un instrumento muy similar al piano que hoy conocemos. Las primeras composiciones específicas para piano aparecieron en 1732. Son las famosas 12 sonatas para piano de **Giustini**. **Juan Sebastián Bach** tomó contacto por primera vez con un piano hacia el año 1750.



Frecuencia fundamental y armónicas de una onda sonora de un piano, donde f es frecuencia fundamental o primera armónica, $2f$ es la segunda armónica (frecuencia doble de la fundamental), $3f$ es la tercera armónica (frecuencia triple de la fundamental).

Reflexión y refracción del sonido

Cuando una onda se encuentra con un obstáculo o con una superficie de separación de otro medio, se **refleja** en forma parcial o total.

Si la superficie reflectora no tiene rugosidades de dimensiones parecidas a la longitud de onda, la onda incide sobre ella y regresa al medio del cual proviene, con una dirección de propagación que forma un ángulo igual al ángulo de incidencia.

El **eco** es un fenómeno que se explica por la reflexión del sonido. El oído humano puede captar sonidos distintos si estos le llegan separados entre sí por lo menos por un intervalo de 0,1 segundo, en caso contrario, los sonidos se superponen y no se diferencian unos de otros. Por este motivo y dado que el sonido viaja en el aire a una velocidad de aproximadamente 340 m/s, para que una persona que se encuentra en una habitación cerrada con paredes reflectantes oiga su voz, este sonido debe viajar ida y vuelta en un intervalo de por lo menos 0,1 segundo. Con lo cual, el sonido debe llegar a la pared en por lo menos 0,05 segundo. Como la velocidad del sonido se considera constante, la distancia a la que debe encontrarse la persona de la pared es:

$$x = v \cdot \Delta t = 340 \text{ m/s} \cdot 0,05 \text{ s} = 17 \text{ m}$$

O sea, la persona debe ubicarse a 17 m o más de la pared para escuchar su voz reflejada.

La reflexión del sonido es aprovechada en la navegación para localizar objetos perdidos en el fondo del mar, en la pesca comercial para encontrar grandes bancos de peces, y en operaciones militares para determinar la posición de los submarinos.

En 1912 se hundió el enorme trasatlántico *Titanic* con casi todos sus pasajeros. La causa de esta catástrofe fue el choque con un iceberg. A partir de este hecho, se intentó emplear el eco para evitar casos semejantes y descubrir estos obstáculos de hielo durante la noche y en los días de niebla. Este procedimiento fracasó, pero impulsó otra idea muy acertada: la de medir la profundidad de los mares valiéndose de la reflexión del sonido en el fondo.

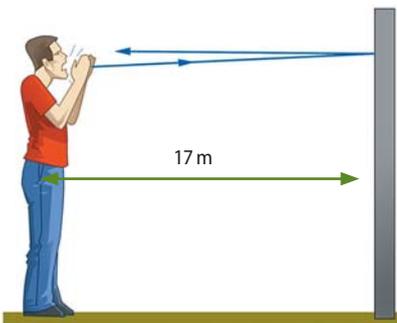
Los sonares modernos utilizan ultrasonidos de muy alta frecuencia, imperceptibles para el oído humano, en el orden de varios millones de oscilaciones por segundo.

El eco es también utilizado por distintas especies animales para localizar presas y obstáculos. Por ejemplo, los murciélagos, que son los únicos mamíferos que pueden volar, utilizan una especie de sonar natural. Emiten sonidos de alta frecuencia (ultrasonidos del orden de los 80 kHz) por la boca y la nariz, que les permiten no solo volar en plena oscuridad o en lugares de luz muy tenue, sino también dirigirse hacia insectos, que son sus presas.

Los delfines emiten sonidos cuya frecuencia oscila entre menos de 2000 Hz y más de 100 000 Hz para obtener información sobre el ambiente, localizar a sus presas e informar su propia localización. Son sonidos audibles como una serie de golpecitos, que pueden presentarse separados o como una sucesión de sonidos unidos entre sí. Las emisiones de los golpecitos nacen dentro de la cabeza del delfín, probablemente en la protuberancia que tiene en la frente, y se reflejan en la sustancia grasa de los costados de la cabeza y la mandíbula inferior; se producen incluso mientras el animal está bajo el agua.



Los delfines utilizan un sonar natural para orientarse.



La voz puede reflejarse al llegar a una pared. En ciertas condiciones se produce el eco de la propia voz.



Los murciélagos emiten sonidos inaudibles muy agudos (ultrasonidos entre 40 000 y 80 000 Hz), y reciben ecos que les aportan información de su medio.

Además de la reflexión del sonido, puede producirse, al mismo tiempo, la **absorción** parcial de la onda sonora por el obstáculo, según las propiedades del material y las características del objeto.

En algunos espacios cerrados, el sonido puede reflejarse sucesivamente en las paredes en las que es parcialmente absorbido y en otros objetos, lo que hace que su intensidad disminuya hasta hacerse inaudible.

Se llama **tiempo de reverberación** al intervalo necesario para que un sonido se haga un millón de veces menos intenso por absorción.

El tiempo de reverberación depende de las dimensiones de los espacios y de los objetos que se encuentran en él, y disminuye al aumentar la absorción sonora de las superficies del recinto. Por lo tanto, recubriendo las paredes, el piso y/o el cielorraso con materiales absorbentes, es posible reducir el tiempo de reverberación.

En general los materiales comunes de construcción (hormigón o concreto, mampostería, mosaicos, cerámicos) suelen ser poco absorbentes, por lo cual si no son tratados implican tiempos de reverberación demasiado largos.

En cambio, los materiales blandos y porosos, como la lana de vidrio, la espuma de poliuretano, las alfombras gruesas, las cortinas pesadas y con muchos pliegues, y los plafones o baldosas de fibra vegetal, en general aumentan la absorción sonora.

En un recinto con superficies poco absorbentes, las ondas sonoras se reflejan, volviendo la energía sonora al ambiente. Esta energía reflejada se suma a la nueva energía que está emitiendo la fuente, y, por consiguiente, aumenta el nivel de ruido.

En el diseño de un auditorio, sala de conferencias o de conciertos, recintos de grabaciones de música, etc., se intenta buscar un equilibrio entre los fenómenos de reverberación y absorción para mantener la armonía sonora.

Cuando la onda sonora atraviesa distintos medios de diferentes propiedades, sufre un cambio en la velocidad de propagación. Este fenómeno se denomina **refracción** del sonido.

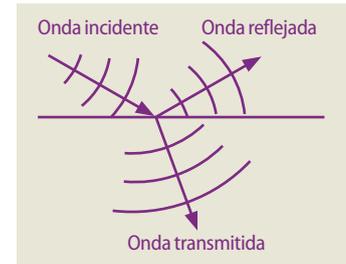
La propagación del sonido en el aire sufre refracciones debido a que la temperatura del aire no es uniforme.

Como la velocidad del sonido aumenta con la temperatura, en un día caluroso es mayor en las capas de aire bajas o más próximas a la superficie de la Tierra que en las más alejadas.

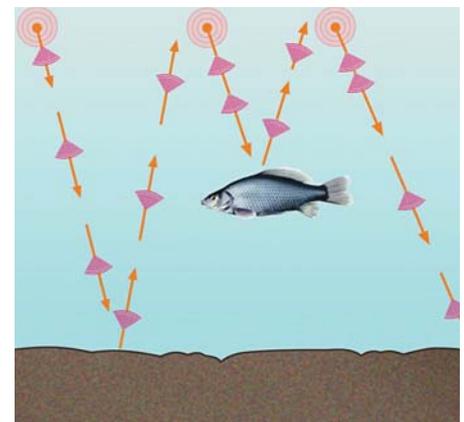
Como consecuencia de la refracción, el sonido se desvía hacia arriba. En esta situación, la comunicación entre dos personas lo suficientemente separadas se dificulta.

El fenómeno contrario ocurre en un día frío o por las noches, cuando las capas de aire cercanas a la superficie terrestre se encuentran a menor temperatura que las capas de aire más alejadas. Las ondas sonoras se desvían hacia el suelo y esto permite que el sonido se pueda escuchar a mayores distancias y con más nitidez.

La refracción del sonido en el agua es muy importante para los barcos que emiten ultrasonidos. Como la temperatura del agua tampoco es uniforme, la refracción del sonido deja como huecos, y es allí donde se ubican los submarinos, por ejemplo, para no ser detectados por los barcos enemigos en época de guerra.



Cuando una onda sonora llega a un obstáculo, parte se refleja, parte es absorbida por el objeto, y parte se refracta.



Ondas sonoras emitidas, reflejadas y refractadas en el agua.

Reverberación y absorción del sonido en un recinto cerrado, por ejemplo, un auditorio.



Resonancia en una columna de aire

Materiales

Una probeta. Un diapasón. Agua.

Procedimiento

1. Coloquen un poco de agua en la probeta.
2. Hagan vibrar el diapasón dándole un golpe y ubíquelo en la boca abierta de la probeta.
3. Varíen la longitud de la columna de aire de la probeta, agregando o quitando agua.
4. Repitan el procedimiento 2 y observen si notan algún cambio.
5. Registren lo que sucede. Expliquen la situación en términos físicos.



Resonancia con diapasones

Materiales

Dos diapasones iguales. Dos cajas de madera con soportes para diapasones.

Procedimiento

1. Coloquen los diapasones sobre las cajas de madera con una boca abierta, a modo de caja de resonancia.
2. Ubiquen los diapasones uno cerca del otro.
3. Hagan vibrar uno de ellos, por ejemplo, con un golpe fuerte.
4. Registren lo que sucede. Expliquen la situación en términos físicos.

Resonancia

Cuando los objetos o sistemas materiales vibran, lo hacen con una frecuencia natural que depende de algunas características de dichos sistemas, tales como la elasticidad del material, la distribución de su masa y la forma en que se produce la perturbación que los hace vibrar.

Por ejemplo, el sonido de un golpe en un vaso de vidrio es diferente del emitido por uno de metal, porque al ser de distintos materiales, vibran con distintas frecuencias. Si un sistema, en este caso un vaso de vidrio, se somete reiteradamente a una fuerza externa y la frecuencia de las vibraciones que se producen coincide con la frecuencia de vibración natural del sistema, se genera un importante aumento de la amplitud de las vibraciones.

A este fenómeno se lo llama **resonancia**. Se presenta siempre que se apliquen impulsos sucesivos a un objeto que vibra en concordancia con la frecuencia natural de vibración del objeto.

Por ejemplo, con impulsos pequeños aplicados al ritmo de frecuencia natural de una hamaca, se puede lograr que la hamaca se mueva con gran amplitud. Para mantener o aumentar las oscilaciones de la hamaca se tienen que dar las siguientes condiciones:

- la perturbación tiene que ser periódica, con una frecuencia igual a la frecuencia natural del sistema;
- el sentido de la perturbación tiene que estar en fase con la oscilación, es decir, que debe coincidir con el sentido del movimiento;
- si la perturbación es muy intensa y el rozamiento es despreciable o existe poco rozamiento, el aumento de la amplitud de las oscilaciones puede provocar roturas en el sistema.

Por ejemplo, en el puente de Tacoma Narrows, en el estado de Washington, Estados Unidos, en el año 1940, comenzó a soplar un viento que produjo la resonancia del puente. Este importante aumento de la amplitud de su vibración provocó su destrucción.

También los mecanismos o sistemas resonantes de los instrumentos musicales pueden variar. En los instrumentos de viento (flautas, quejas, etc.) la columna de aire tiene una frecuencia de vibración natural que puede modificarse si se tapan o destapan los orificios del instrumento. En los instrumentos de cuerda (guitarra, violín, etc.) la forma de la caja, su masa, y el material utilizado en su construcción producen fenómenos de resonancia para determinadas frecuencias que les dan el sonido característico.

No solo las oscilaciones mecánicas pueden producir resonancia; también las oscilaciones eléctricas y magnéticas provocan efectos similares. Por ejemplo, al sintonizar una emisora de radio girando la perilla del sintonizador u oprimiendo las teclas, se produce un cambio en el circuito eléctrico que altera su frecuencia natural. Este es un ejemplo de resonancia electromagnética. Los principios de este fenómeno se utilizan también en algunas técnicas de diagnóstico médico, como las resonancias electromagnéticas. Esta técnica se basa en el envío de una señal sonora sobre un objeto imantado, en este caso el cuerpo humano, y la recogida de la señal electromagnética o de retorno al estado de equilibrio, con posterior localización de los órganos o sistemas analizados y formación de la imagen.



Una hamaca puede resonar si se la impulsa con una frecuencia que coincida con su frecuencia natural de oscilación.

El efecto Doppler

El físico austriaco Christian Doppler (1803-1853) explicó los cambios de frecuencia de las ondas debido al movimiento del emisor o receptor, fenómeno que hoy se conoce como **efecto Doppler**.

Si el receptor está detenido y el emisor se mueve, el tono del sonido emitido por la fuente no se percibe igual que cuando el emisor está en reposo.

Por ejemplo, el silbato de un tren al aproximarse se percibe más agudo que el del tren detenido. A medida que el tren se aleja, el tono del sonido que se escucha es más bajo que el normal, es decir el sonido emitido por la fuente en reposo.

Lo mismo ocurre con la sirena de una ambulancia. Por el cambio en la altura del sonido de la sirena, se puede saber si se está alejando o acercando al receptor.

Este fenómeno no se restringe al movimiento del emisor. Si la fuente de sonido está detenida y es el receptor quien se mueve hacia la fuente, también percibirá un aumento en la frecuencia del sonido. En cambio, si se aleja, advertirá un sonido de tono más bajo.

En general, el efecto Doppler explica el cambio aparente en la frecuencia de una fuente de sonido cuando hay un movimiento relativo entre el emisor y el receptor.

Para explicar este fenómeno se considera la representación gráfica de las ondas periódicas emitidas por una fuente en forma de círculos concéntricos que se mueven en forma radial. La distancia entre los círculos representa la longitud de onda del sonido que se propaga con una determinada velocidad.

Si el emisor S se mueve hacia un observador, A, detenido, las ondas emitidas por S se acercan al receptor A. Como cada onda sucesiva se emite desde un punto más cercano al receptor que la onda anterior, la distancia entre las onda sucesivas, es decir la longitud de onda, es menor que la que corresponde a la onda sonora emitida por la fuente en reposo.

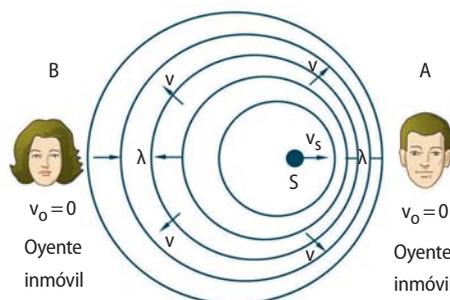
Una disminución de la longitud de onda implica un aumento de la frecuencia, lo que provoca un aumento en el tono del sonido.

Si el emisor S se aleja de otro observador, B, detenido, se produce un aumento de la longitud de las ondas que llegan al receptor, por lo cual B percibe un sonido de menor frecuencia. El cambio de la frecuencia depende de la velocidad relativa entre el emisor y el receptor y se puede calcular mediante la siguiente expresión matemática:

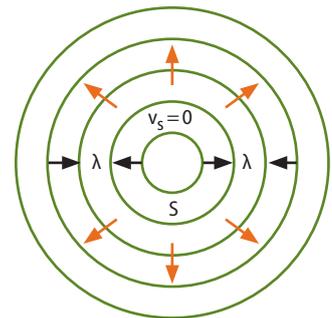
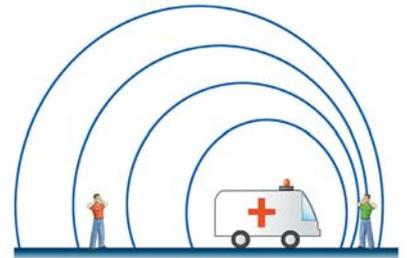
$$f' = \frac{v - v_r}{v - v_e} \cdot f$$

donde f' es la frecuencia medida por el receptor, f es la frecuencia medida por el emisor, v es la velocidad de la onda que depende del medio en el cual se propaga, v_r es la velocidad del receptor y v_e la velocidad del emisor con respecto al medio en el que se propaga el sonido.

Si el emisor se acerca al receptor A en reposo, éste percibirá un tono más alto del sonido emitido, es decir de mayor frecuencia, mientras que el receptor B, también en reposo, percibirá un sonido de menor frecuencia ya que el emisor se aleja de él.



El **efecto Doppler** se origina cuando hay un movimiento relativo entre la fuente sonora y el receptor. El resultado es la aparente variación de la altura del sonido ya que se produce un cambio de la frecuencia que percibe el receptor comparada con la frecuencia de ondas que origina el emisor.



Esquema de las ondas sonoras emitidas por una fuente fija.

Aplicaciones del efecto Doppler



No es conveniente que los soldados marchen todos juntos cuando cruzan un puente ya que sus pasos acompasados pueden provocar la resonancia del puente.

1. Si la frecuencia del sonido emitido por la bocina de un automóvil descompuesto detenido en una autopista es 500 Hz, ¿cuál es la frecuencia que percibe un auto de auxilio que se aproxima al automóvil a una velocidad de 90 km/h?

La velocidad del sonido en el aire es $v = 340$ m/s. Como el receptor se mueve hacia la fuente emisora, se puede considerar el signo positivo (+) para v y negativo (-) para v_r , ya que el auxilio se mueve en sentido opuesto al sonido de la bocina. Dado que el auto va a una velocidad de 90 km/h, el valor de v_r es 25 m/s. Además, la velocidad del emisor, v_e , es cero porque el auto está detenido. Luego:

$$f' = \frac{v - v_r}{v - v_e} \cdot f = \frac{340 \text{ m/s} - (-25 \text{ m/s})}{340 \text{ m/s}} \cdot 500 \text{ Hz} = 537 \text{ Hz}$$

El auxilio percibe una frecuencia de aproximadamente 537 Hz.

2. Una ambulancia viaja por una calle con una velocidad de 40 m/s y su sirena emite un sonido de 400 Hz. ¿Qué frecuencia de esta sirena mediría un conductor que viajase a 20 m/s en sentido contrario, alejándose de la ambulancia?

Si se considera como positivo el sentido de la propagación del sonido desde la ambulancia hacia el otro conductor, la velocidad v_r de su vehículo se considera también positiva (+). En cambio, la velocidad de la ambulancia, v_e , que se desplaza en sentido opuesto, se considera negativa.

Con lo cual:

$$f' = \frac{v - v_r}{v - v_e} \cdot f = \frac{340 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - (-40 \text{ m/s})} \cdot 400 \text{ Hz} = 337 \text{ Hz}$$

Por lo tanto el conductor del auto mide una frecuencia aproximada de 337 Hz.



El fenómeno de resonancia

El fenómeno de la resonancia se puede comprobar con algunas actividades experimentales sencillas.

Objetivo

Comprobar la resonancia en sólidos.

Resonancia mecánica con péndulos

Materiales

Seis péndulos. Dos hilos de 10 cm cada uno. Dos hilos de 15 cm cada uno. Dos hilos de 20 cm cada uno. Un soporte construido con dos varillas de más de 20 cm de altura sobre un pie como se ve en la figura que soportan entre ellas un hilo.

Procedimiento

1. Coloquen un hilo en cada péndulo.
2. Aten un hilo de cada medida al hilo del soporte, como se indica en la figura a una distancia de 6 cm.

3. Tomen un péndulo entre los dedos y háganlo oscilar.

4. Registren lo que sucede. Expliquen la situación en términos físicos.

5. Repitan lo anterior para los péndulos de las otras dos longitudes.



La audición y el oído humano

La percepción del sonido en los seres humanos es un fenómeno muy complejo en el que se pueden señalar los siguientes procesos:

- captación y procesamiento mecánico de las ondas sonoras;
- conversión de las señales sonoras en impulsos nerviosos;
- transmisión de dichos impulsos hasta los centros sensoriales del cerebro;
- procesamiento de la información codificada en forma de impulsos nerviosos.

En el sistema auditivo se pueden diferenciar dos regiones o partes.

La región periférica

En ella los estímulos sonoros conservan su carácter original de ondas mecánicas hasta el momento de su conversión en señales electroquímicas.

La región central

En ella se transforman las señales en sensaciones. En esta región también intervienen procesos cognitivos, mediante los cuales los sonidos tienen sentido según un contexto, es decir, se puede reconocer una palabra, una música o el sonido de un violín o de un piano.

El **oído** o región periférica se divide usualmente en tres zonas, llamadas oído externo, oído medio y oído interno, de acuerdo con su ubicación en el cráneo.

El **oído externo** está formado por el pabellón de la oreja que se encarga de captar las ondas sonoras; éstas se propagan hacia la membrana timpánica o **tímpano**, que constituye la entrada al oído medio.

El **oído medio** está formado por una cavidad llena de aire, en cuyo interior se encuentran tres pequeños huesos, denominados **martillo**, **yunque** y **estribo**, articulados entre sí, y que cumplen la función de amplificar la señal recibida. Uno de los extremos del martillo está unido al tímpano, lo que le permite captar las vibraciones y transmitir las al yunque y al estribo; éste comunica con la **ventana oval**, orificio que permite la entrada del sonido al oído interno.

En el **oído interno** se encuentra la **cóclea** o **caracol**, un conducto rígido en forma de espiral de unos 35 mm de longitud, lleno de fluidos de distintas composiciones químicas.

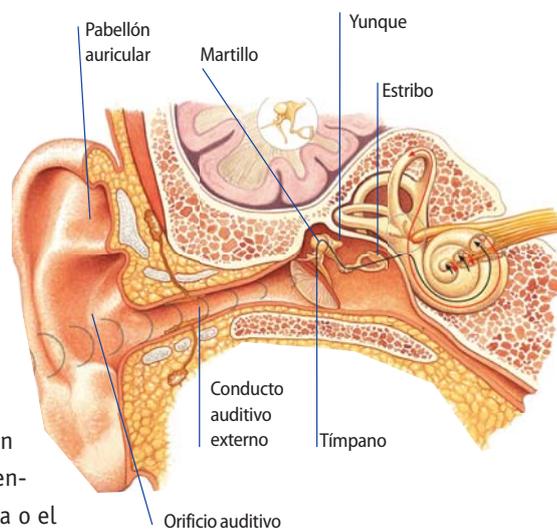
Las vibraciones captadas por la membrana oval son transmitidas a estos fluidos dentro del caracol.

Sobre una membrana ubicada dentro de la cóclea, llamada **membrana basilar**, se encuentra el **órgano de Corti**, que contiene células ciliares internas y externas; cuando son estimuladas al recibir las vibraciones, llevan estos impulsos al cerebro, que decodificará la información.

En el complejo fenómeno de la audición humana se destacan los siguientes procesos.

- Los sonidos llegan a través del conducto auditivo hasta el tímpano.
- Los cambios de presión en la pared externa de la membrana timpánica, asociados a la señal sonora, provocan la vibración del tímpano.
- Las vibraciones del tímpano se transmiten a lo largo de una cadena de pequeños huesos.
- Estos huesos se encuentran en contacto con los fluidos contenidos en el oído interno; por lo tanto, el tímpano y la cadena de pequeños huesos actúan como un mecanismo para transformar las vibraciones del aire en vibraciones de los fluidos.
- El movimiento del líquido provoca, a su vez, las vibraciones de una membrana elástica que hace que sus células ciliares se compriman contra las partes rígidas del caracol.
- Los estímulos de las células ciliares son transmitidos hasta el cerebro por las fibras nerviosas.

Estructura del oído humano.



La contaminación sonora

La contaminación sonora es una característica de las sociedades industrializadas y los grandes núcleos urbanos, que se suma a otros agentes de contaminación atmosférica como el smog, el humo, las partículas en suspensión de polvo y de materiales tóxicos como el plomo, los gases, el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, radiaciones, microbios, entre otros.

En las últimas décadas se produjo un aumento importante de los ruidos ambientales debido al crecimiento de la densidad de población, al uso de maquinarias muy ruidosas como martillos neumáticos o palas mecánicas, sirenas, incremento de la cantidad de automóviles y otros vehículos como motocicletas, ómnibus, camiones, aviones, trenes, etc.

Los adolescentes y personas jóvenes están expuestos a elevados niveles de ruido debido al uso de aparatos para escuchar música, como el walkman, el discman o mp3, o a los ruidos de los lugares bailables, de diversión, etcétera.



En una calle céntrica de una ciudad ruidosa, la intensidad del sonido puede superar los 75 dB.



Los martillos neumáticos pueden superar los 130 dB.



En los salones de baile y en los recitales de música como el rock, se pueden superar los 120 dB.

Según la OMS (Organización Mundial de la Salud) el nivel máximo tolerable por el oído humano es de 70 dB, si bien estos valores son subjetivos y dependen de la sensibilidad de percepción de cada persona. Sin embargo, se ha comprobado que las exposiciones prolongadas a niveles superiores a este valor máximo tolerable pueden producir trastornos en la salud, como cefaleas (dolores de cabeza),

disminución de la percepción auditiva, alteraciones en los ritmos cardíacos y respiratorios, problemas digestivos, daños en el sistema nervioso, dificultades en la capacidad de concentración, cambios del comportamiento, conductas agresivas, trastornos en el sueño, estrés, etc.

Si los ruidos superan los 120 dB pueden causar dolor en los oídos, y si la intensidad sonora es mayor que 140 dB, puede provocar desorientación en el espacio y hasta sordera permanente; más allá de los 160 dB el tímpano puede estallar.

Es necesario tomar conciencia de estos factores y niveles de contaminación sonora y adoptar medidas que tiendan a mejorar este problema de las sociedades modernas y sus grandes ciudades.

Algunas de estas acciones para tener en cuenta son las siguientes.

- El uso de protectores del oído, como audífonos, en las profesiones o empleos que exponen a niveles altos de ruido.
- La instalación de pantallas o sistemas de protección entre el foco de ruido y los oyentes, por ejemplo pantallas antirruído en las autopistas.
- Colocación de revestimientos aislantes o absorbentes del sonido en los lugares ruidosos, las máquinas u otras fuentes de sonido intenso.
- Reducción de la circulación de vehículos en zonas residenciales.
- Realización de campañas de educación ambiental para la real toma de conciencia de este problema.



2. Luego de esta lectura respondan.

a. ¿Qué otras medidas se pueden adoptar para disminuir el ruido en una ciudad, en una casa, o en una escuela?

b. ¿Cómo se puede promover una campaña de difusión de este problema?

c. Busquen artículos en diarios y revistas que traten este tema. Señalen y analicen las ideas principales.

Escalas musicales, músicos y físicos

LOS MÚSICOS SUPIERON DESDE SIEMPRE QUE HAY CIERTOS SONIDOS QUE RESULTAN AGRADABLES AL OÍDO Y OTROS QUE NO.

Los pitagóricos, en la antigua Grecia, descubrieron que los sonidos agradables se daban cuando las cuerdas de la lira tenían entre sí largos cuya relación era un cociente entre números enteros y no muy grandes, por ejemplo el cociente entre el largo de dos cuerdas que sonaran armoniosamente podía ser $\frac{9}{8}$. Sobre la base de conocimientos musicales por un lado y propuestas matemáticas que hoy se pueden interpretar como relaciones entre frecuencias, se diagramó una escala musical con las 7 notas que hoy se utilizan, dividida en 12 semitonos: es decir las frecuencias entre una nota, por ejemplo el LA de 440 Hz y el siguiente LA de 880 Hz se dividió en 12 intervalos parecidos, aunque no iguales, que corresponden a las 7 notas con sus sostenidos o bemoles. Esta escala tenía sus problemas. Como los intervalos entre las notas no eran iguales, al transponer una pieza musical para que sea más aguda o más grave debido a que tenía que ser interpretada por otro instrumento, su musicalidad se desajustaba. Se propuso entonces una escala



Foto de Einstein en 1924 tocando el violín

con todos sus intervalos iguales. A esta escala artificialmente construida se le llama **escala bien temperada**. Para calcular la frecuencia que corresponde a cada una de las 12 partes iguales, llamadas semitonos, en que se divide el intervalo de una octava, por ejemplo entre dos LA, se multiplica la frecuencia del semitono anterior por $\sqrt[12]{2} \approx 1,0586$. Así, para obtener la frecuencia del LA sostenido se hace:

$$f_{La} = 440 \text{ Hz} \cdot 1,058 = 466 \text{ Hz}$$

Para el SI:

$$f_{Si} = 440 \text{ Hz} \cdot (1,058)^2 = 493 \text{ Hz}$$

y después de 12 pasos, uno por cada semitono:

$$f_{LA} = (\sqrt[12]{2})^{12} \cdot 440 \text{ Hz} = 880 \text{ Hz}.$$

La vinculación entre la física y la música no se ha dado solo desde la fundamentación acústica. Muchos físicos han estado vinculados con la música. Vincenzo Galilei, padre de Galileo era músico y fue uno de los promotores de la escala bien temperada. Einstein conservó hasta el final de su vida un vivo amor por la música. Acostumbraba tocar el violín para sí mismo como un arma de descanso y relajamiento; lo hacía con talento y musicalidad suficientes como para haberse atrevido a tocar en más de una ocasión en público para coleccionar fondos con fines de beneficencia. Sus compositores predilectos eran Bach y Mozart, así como los italianos Vivaldi, Scarlatti o Corelli. Fuentes: Internet- http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/31/htm/sec_8.htm.

La física de los instrumentos musicales de J. Luzuriuaga y R. Pérez. Eudeba, Bs. As., 2006.

La música de hoy está estrechamente relacionada con la física y la tecnología no solo a través de la acústica sino también por el uso de la electrónica.

a. Busquen información acerca de la producción de sonido en los instrumentos musicales electrónicos utilizados habitualmente (teclados, bajos, guitarras etc).

b. Busquen información acerca de la forma de grabar y reproducir música (CD y mp3).



IDEAS BÁSICAS DE LA UNIDAD

- Para la producción de sonidos es necesario que exista una fuente que vibre.
- El **sonido** necesita un medio material para propagarse. La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio.
- El **rango de audición humana** está comprendido entre frecuencias de 20 Hz a 20 000 Hz. Los procesos sonoros de frecuencias inferiores a los 20 Hz se denominan **infrasonidos**, y los de frecuencias superiores a 20 000 Hz se llaman **ultrasonidos**.
- Las **ondas sonoras** en el aire se explican por las variaciones de presión que se producen en cada punto del aire alcanzado por la onda.
- La **intensidad sonora** se define como la potencia transferida por una onda sonora, a través de una superficie colocada perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.
- La **sonoridad** es la sensación de intensidad del sonido relacionada con las características fisiológicas del sistema auditivo de cada persona y con la frecuencia de las ondas sonoras.
- Las características más importantes que permiten distinguir un sonido de otro son la **intensidad**, el **tono** y el **timbre**.
- El sonido puede reflejarse. El **eco** es un fenómeno que se explica por la reflexión del sonido.
- Un obstáculo puede producir al mismo tiempo la reflexión y la absorción parcial de la onda sonora.
- Cuando una onda sonora atraviesa distintos medios de diferentes propiedades, se **refracta**.
- La **resonancia** se produce cuando a un sistema se le aplica una perturbación periódica cuya frecuencia coincide con la frecuencia de vibración natural de dicho sistema.
- El fenómeno debido a los cambios aparentes de frecuencia de las ondas por el movimiento relativo del emisor con respecto al receptor se denomina **efecto Doppler**.
- Los ruidos son sonidos intensos y desagradables, capaces de producir la llamada **contaminación sonora**.

Fórmulas

$$I = \frac{P}{S}$$

Intensidad sonora

$$\beta = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Intensidad relativa

$$f' = \frac{v - v_r}{v - v_e} \cdot f$$

Variación de frecuencia por efecto Doppler

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

1. En algunas películas de cowboys se muestra al personaje que coloca su oreja sobre la vía del tren para saber si éste se acerca. Expliquen por qué prefiere escuchar a través de la vía y no a través del aire.
2. Si dos astronautas llegan a la Luna, ¿se pueden comunicar entre sí mediante ondas sonoras?
3. Los gatos pueden percibir sonidos de hasta 70 000 Hz y algunas especies de murciélagos, ultra altas frecuencias de hasta 120 000 Hz. Comparen las longitudes de ondas percibidas por estos dos animales.
4. ¿Un sonido de 30 dB es 30 veces más intenso que el umbral de la audición humana? Justifiquen la respuesta.
5. Si se aumenta la temperatura del aire en un órgano de tubos, ¿qué sucede con las frecuencias resonantes?
6. Un parlante produce un sonido debido a la oscilación de un diafragma. ¿La intensidad del sonido producido depende de la frecuencia, o de la amplitud de la onda sonora?
7. ¿La intensidad sonora es una medida de la sonoridad de una fuente? Expliquen los significados físicos de cada término.
8. Un diapasón aumenta su sonoridad si se coloca sobre una caja de resonancia. ¿Por qué? Expliquen este fenómeno.
9. ¿Es posible que la voz de una persona se oiga mejor que lo habitual cuando canta en la ducha? Justifiquen su respuesta.
10. En noches de muy baja temperatura o luego de alguna nevada intensa, se produce una acentuada sensación de quietud y silencio. ¿A qué se debe este fenómeno?
11. Algunos cantantes de ópera prueban la capacidad sonora de su voz emitiendo sonidos que pueden romper, por ejemplo, una copa de cristal. ¿Cuál es la explicación física de este hecho?
12. ¿El eco de un sonido es más débil, o más intenso que el sonido original?
13. ¿Por qué un superior grita “rompan fila” a los soldados que marchan, antes de cruzar un puente?
14. Un tren está parado en la estación y suena su silbato; luego comienza a moverse alejándose de la estación. ¿Cómo describirían el tono del sonido emitido por el silbato del tren una persona que está parada en el andén de la estación? ¿Por qué?
15. Si la fuente emisora de sonido y el receptor se mueven con la misma velocidad, ¿se produce el efecto Doppler? Justifiquen la respuesta.
16. Si se tiene un tubo abierto y otro cerrado de igual longitud, ¿en cuál de los dos se producen notas más agudas? Expliquen.
17. Si se golpea un extremo de una barra de aluminio de 20 cm de longitud, ¿cuánto tarda el sonido en llegar al otro extremo?
18. La frecuencia de la nota DO central de un teclado es 256 Hz.
 - a. ¿Cuál es el período de una vibración de esta frecuencia?
 - b. ¿Cuál es la longitud de la onda sonora emitida?
19. Un barco pesquero emite un ultrasonido que se propaga en el agua y al cabo de 5 segundos recibe el eco del sonido reflejado en un cardumen. ¿A qué profundidad se encuentra dicho cardumen?
20. ¿Cuáles son los niveles de intensidad relativa, en dB, de dos sonidos cuyas intensidades son $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ e $I = 1 \text{ W/m}^2$?
21. Un sonido tiene una intensidad de 10^{-7} W/m^2 . ¿Cuál es su nivel de intensidad relativa?
22. ¿Cuál es la potencia transferida por una onda sonora cuando atraviesa una ventana de $1,5 \text{ m}^2$ de superficie, colocada perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, si su nivel de intensidad es de 70 dB?
23. Un tubo abierto de un órgano tiene 80 cm de longitud. Calculen la frecuencia fundamental y la frecuencia de las dos primeras armónicas emitidas, sabiendo que las ondas sonoras en el tubo se propagan con una velocidad de 340 m/s.
24. Una ambulancia se mueve con una velocidad de 40 m/s emitiendo un sonido con su sirena cuya frecuencia es de 500 Hz. Determinen la frecuencia que percibe una persona en reposo a medida que la ambulancia se acerca y luego se aleja de ella.
25. El nivel del sonido tolerable por el oído humano es 70 dB. Si la intensidad de sonido de un lavarropas es de $I = 10^{-4} \text{ W/m}^2$, ¿es superior o inferior al nivel tolerable?

ACTIVIDADES DE INTEGRACIÓN

- 26.** ¿Por qué no suena de la misma manera una cuerda de guitarra cuando se pulsa en su punto medio que cuando se pulsa en un extremo?
- 27. a.** ¿Cómo se varía la tensión de las cuerdas de una guitarra?
b. ¿De qué materiales están hechas?
c. ¿Sus masas son iguales, o diferentes?
d. ¿En qué aspectos o cualidades del sonido influyen estos factores considerados?
- 28.** ¿Influye la forma de la guitarra en el timbre del sonido producido? ¿Por qué?
- 29.** Busquen datos sobre la forma en que emite sonidos la guitarra eléctrica.
- 30.** Busquen información sobre otros instrumentos musicales que les interese conocer y averigüen las características de los sonidos que producen.
- 31.** Una persona se ubica a 40 metros de una pared y grita. ¿Cuánto tarda en escuchar el eco de su voz?
- 32.** ¿Cuáles son las longitudes de onda más larga y más corta que puede oír una persona?
- 33.** Cuando el sonido se propaga por el aire, se producen oscilaciones en la presión de los puntos alcanzados por la onda. ¿Qué ocurre con los puntos alcanzados por una onda sonora que se propaga en un metal?
- 34.** Cuando un grupo de murciélagos vuelan juntos, ¿mediante qué característica del sonido distingue cada uno de ellos su propio eco?
- 35.** Desde lo alto de una plataforma petrolera que se encuentra a 50 m de altura sobre el mar, se emite una señal de sonar verticalmente hacia abajo y tarda un segundo en registrarse el eco reflejado en el fondo. Si la velocidad del sonido en el agua es 1420 m/s, ¿cuál es la profundidad del mar en esa zona?
- 36.** ¿Qué significa un valor negativo en decibels, por ejemplo -10 dB?
- 37.** Un chico toca un silbato mientras se hamaca. Describan cómo varía la frecuencia del sonido que oye la persona que lo empuja.
- 38.** ¿Varía la distancia mínima a una pared para escuchar el eco, si cambia bastante la temperatura del aire? Justifiquen la respuesta.
- 39.** Para calcular la distancia a la que se encuentra una tormenta, se puede contar el tiempo entre la observación de un relámpago y el momento en que se oye el trueno. ¿A qué distancia se encuentra una tormenta si ese tiempo es de 5 segundos?
- 40.** Una onda sonora de 70 dB de intensidad relativa llega a un tímpano cuya superficie es de $0,55 \text{ cm}^2$. ¿Cuánta energía absorbió el tímpano en 5 minutos?
- 41.** Para obedecer a los requisitos legales, una fábrica diseña sus automóviles de modo que emitan un ruido con un máximo de 80 decibeles que corresponde al límite legal. En una inspección realizada en la calle se determinó que uno de esos vehículos emitía un ruido máximo de 90 decibeles. El fabricante afirma que la diferencia entre la intensidad medida y el límite legal es despreciable. Calculen el aumento de intensidad del ruido y verifiquen la afirmación del fabricante.
- 42.** Existen murciélagos que se alimentan de peces. Para ubicarlos, emiten sus señales de ultrasonido que les permiten ubicar al pez sumergido cerca de la superficie. Describan los distintos procesos que sigue la onda desde que es emitida hasta que es oída nuevamente por el murciélago.
- 43.** Un diapasón produce una onda sonora. ¿La longitud de onda del sonido aumenta, disminuye, o queda igual cuando la onda que se desplaza por el aire llega al agua? Justifiquen la respuesta.
- 44.** En muchas especies animales el sonido es una de las principales fuentes de información para su supervivencia. Expliquen a partir de conceptos acústicos por qué esos animales tienen sus orejas muy desarrolladas.
- 45.** Dos personas que discuten emiten sonidos de 60 decibeles cada una. ¿El nivel del sonido que percibe una tercera persona es de 120 decibeles? Justifiquen la respuesta mediante el cálculo de las intensidades y las intensidades relativas.
- 46.** Una persona grita un gol con un sonido de intensidad relativa de 50 decibeles. Si la intensidad total se puede tomar como la suma de las intensidades de los sonidos emitidos por cada persona, ¿cuántas personas deberán gritar con igual intensidad para producir un nivel de 80 decibeles?

AUTOEVALUACIÓN

Determinen si las siguientes afirmaciones son verdaderas (V) o falsas (F). Justifiquen en cada caso.

- 1 Las ondas sonoras son longitudinales y pueden propagarse en el vacío.
- 2 Es posible que exista una fuente que emita ondas sonoras que se propaguen en un medio, pero que no puedan ser percibidas por el oído humano.
- 3 La intensidad de una onda sonora es una medida de la energía que se propaga por unidad de tiempo y por unidad de área.
- 4 La intensidad de un sonido en cada punto del aire aumenta si aumenta la frecuencia de la onda emitida.
- 5 Los sonidos graves se deben al aumento de la velocidad de propagación de la onda sonora.
- 6 Los sonidos del mismo tono emitidos por dos instrumentos diferentes se pueden distinguir por su timbre.
- 7 Un incremento de la intensidad relativa de 10 dB corresponde a un aumento de 100 veces la intensidad del sonido.
- 8 Los sonidos de más de 70 dB no son audibles para las personas.
- 9 El oído humano puede captar sonidos distintos separados entre sí por un intervalo de 1 s.
- 10 La reflexión del sonido permite explicar el funcionamiento de los ecógrafos.
- 11 El sonar de los barcos emite infrasonidos que se reflejan cuando llegan a un obstáculo.
- 12 La refracción del sonido se produce cuando una onda sonora atraviesa distintos medios.
- 13 El fenómeno de resonancia se produce cuando un sistema vibra con una amplitud de onda coincidente con la amplitud de onda natural del sistema.
- 14 Si una fuente sonora está detenida y el receptor se mueve alejándose del emisor, percibirá un aumento en la frecuencia.
- 15 El efecto Doppler explica el cambio aparente en la frecuencia de una fuente de sonido cuando hay un movimiento relativo entre el emisor y el receptor.
- 16 El sistema de la audición humana es muy complejo y cambia en cada persona.
- 17 El tímpano es una membrana delgada ubicada en el oído interno que vibra al ingresar las ondas sonoras a través del pabellón de la oreja.
- 18 La contaminación sonora se debe a los ruidos que superan valores de intensidad relativa de 120 dB.
- 19 Algunos materiales absorbentes pueden evitar la reflexión del sonido y disminuir los efectos del ruido.
- 20 La exposición prolongada al ruido puede producir daños en la salud.