

EL SONIDO Y LAS ONDAS

Una onda es una perturbación que avanza o que se propaga en un medio material o incluso en el vacío. A pesar de la naturaleza diversa de las perturbaciones que pueden originarlas, todas las ondas tienen un comportamiento semejante. El sonido es un tipo de onda que se propaga únicamente en presencia de un medio que haga de soporte de la perturbación. Los conceptos generales sobre ondas sirven para describir el sonido, pero, inversamente, los fenómenos sonoros permiten comprender mejor algunas de las características del comportamiento ondulatorio.

Los jugadores de dominó, como distracción complementaria, colocan las fichas del juego en posición vertical, una al lado de otra, a una distancia inferior a la longitud de las fichas formando una hilera. Cuando se le da un impulso a la ficha situada en uno de los extremos se inicia una acción en cadena; cada ficha transmite a su vecina el impulso recibido, el cual se propaga desde un extremo a otro a lo largo de toda la hilera. En términos físicos podría decirse que una onda se ha propagado a través de las fichas de dominó. La idea de onda corresponde en la física a la de una *perturbación* local de cualquier naturaleza que avanza o se propaga a través de un medio material o incluso en el vacío.

Algunas clases de ondas precisan para propagarse de la existencia de un medio material que, al igual que las fichas de dominó, haga el papel de soporte de la perturbación; se denominan genéricamente *ondas mecánicas*. El sonido, las ondas que se forman en la superficie del agua, las ondas en muelles o en cuerdas, son algunos ejemplos de ondas mecánicas y corresponden a compresiones, deformaciones y, en general, a perturbaciones del medio que se propagan a través suyo. Sin embargo, existen ondas que pueden propagarse aun en ausencia de medio material, es decir, en el vacío. Son las *ondas electromagnéticas* o campos electromagnéticos viajeros; a esta segunda categoría pertenecen las ondas luminosas.

Independientemente de esta diferenciación, existen ciertas características que son comunes a todas las ondas, cualquiera que sea su naturaleza, y que en conjunto definen el llamado *comportamiento ondulatorio*, esto es, una serie de fenómenos típicos que diferencian dicho comportamiento del comportamiento propio de los corpúsculos o partículas.

EL MOVIMIENTO ONDULATORIO

El tipo de movimiento característico de las ondas se denomina movimiento ondulatorio. Su propiedad esencial es que no implica un transporte de materia de un punto a otro. Así, no hay una ficha de dominó o un conjunto de ellas que avancen desplazándose desde el punto inicial al final; por el contrario, su movimiento individual no alcanza más de un par de centímetros. Lo mismo sucede en la onda que se genera en la superficie de un lago o en la que se produce en una cuerda al hacer vibrar uno de sus extremos. En todos los casos las partículas constituyentes del medio se desplazan relativamente poco respecto de su posición de equilibrio. Lo que avanza y progresa no son ellas, sino la perturbación que transmiten unas a otras. El movimiento ondulatorio supone únicamente un transporte de energía y de cantidad de movimiento.

Tipos de ondas

Junto a una primera clasificación de las ondas en mecánicas y electromagnéticas, es posible distinguir diferentes tipos de ondas atendiendo a criterios distintos.

En relación con su ámbito de propagación las ondas pueden clasificarse en:

Monodimensionales: Son aquellas que, como las ondas en los muelles o en las cuerdas, se propagan a lo largo de una sola dirección del espacio.

Bidimensionales: Se propagan en cualquiera de las direcciones de un plano de una superficie. Se denominan también ondas superficiales y a este grupo pertenecen las ondas que se producen en la superficie de un lago cuando se deja caer una piedra sobre él.

Atendiendo a la periodicidad de la perturbación local que las origina, las ondas se clasifican en:

Periódicas: Corresponden a la propagación de perturbaciones de características periódicas, como vibraciones u oscilaciones que suponen variaciones repetitivas de alguna propiedad. Así, en una cuerda unida por uno de sus extremos a un vibrador se propagará una onda periódica.

No periódicas: La perturbación que las origina se da aisladamente y en el caso de que se repita, las perturbaciones sucesivas tienen características diferentes. Las ondas aisladas, como en el caso de las fichas de dominó, se denominan también *pulsos*.

Según que la dirección de propagación coincida o no con la dirección en la que se produce la perturbación, las ondas pueden ser:

Longitudinales: El movimiento local del medio alcanzado por la perturbación se efectúa en la dirección de avance de la onda. Un muelle que se comprime da lugar a una onda longitudinal.

Transversales: La perturbación del medio se lleva a cabo en dirección perpendicular a la de propagación. En las ondas producidas en la superficie del agua las partículas vibran de arriba a abajo y viceversa, mientras que el movimiento ondulatorio progresa en el plano perpendicular. Lo mismo sucede en el caso de una cuerda; cada punto vibra en vertical, pero la perturbación avanza según la dirección de la línea horizontal. Ambas son ondas transversales.

La propagación de las ondas

El mecanismo mediante el cual una onda mecánica monodimensional se propaga a través de un medio material puede ser descrito inicialmente considerando el caso de las ondas en un muelle. Cuando el muelle se comprime en un punto y a continuación se deja en libertad, las fuerzas recuperadoras tienden a restituir la porción contraída del muelle a la situación de equilibrio. Pero dado que las distintas partes del muelle están unidas entre sí por fuerzas elásticas, la dilatación de una parte llevará consigo la compresión de la siguiente y así sucesivamente hasta que aquella alcanza el extremo final.

En las ondas en la superficie de un lago, las fuerzas entre las moléculas de agua mantienen la superficie libre como si fuera una película tensa. Tales fuerzas de unión entre las partículas componentes son las responsables de que una perturbación producida en un punto se propague al siguiente, repitiéndose el proceso una y otra vez de forma progresiva en todas las direcciones de la superficie del líquido, lo que se traduce en el movimiento de avance de ondas circulares.

Como puede deducirse del mecanismo de propagación descrito, las propiedades del medio influirán decisivamente en las características de las ondas. Así, la velocidad de una onda dependerá de la rapidez con la que cada partícula del medio sea capaz de transmitir la perturbación a su compañera. Los medios más rígidos dan lugar a velocidades mayores que los más flexibles. En un muelle de baja constante elástica k una onda se propagará más despacio que en otra que tenga una k mayor. Lo mismo sucede con los medios más densos respecto de los menos densos.

Ningún medio material es perfectamente elástico. Las partículas que lo forman en mayor o menor grado rozan entre sí, de modo que parte de la energía que se transmite de unas a otras se disipa en forma de calor. Esta pérdida de energía se traduce, al igual que en el caso de las vibraciones, en una atenuación o amortiguamiento. Sin embargo, el estudio de las ondas en las condiciones más sencillas prescinde de estos efectos indeseables del rozamiento.

Magnitudes características del movimiento ondulatorio

Una onda armónica es la producida por la propagación de una vibración armónica simple. Cada punto del medio que es alcanzado por la perturbación describe un movimiento armónico simple que va pasando de una partícula a otra. Mientras que el punto inicial o *foco* que origina la vibración mantenga su movimiento, las diferentes partículas del medio estarán oscilando en torno a sus posiciones de equilibrio, constituyendo en conjunto una serie de osciladores armónicos cuyas vibraciones están tanto más retrasadas o desacompañadas respecto de la del foco, cuanto mayor sea la distancia a él, o lo que es lo mismo, cuanto más tiempo tarde la perturbación en llegar hasta ellos.

Las características del movimiento vibratorio armónico simple (M.A.S.) en un punto del medio definen también las características de la onda correspondiente en ese punto. Así el estado de vibración o de perturbación del medio viene determinado por la elongación; el *periodo* T de la onda coincide con el periodo del M. A. S. que se propaga, es decir, con el tiempo que emplea una cualquiera de las partículas del medio en efectuar una oscilación completa; la *frecuencia* f es la inversa del periodo $f = 1/T$ y representa el número de oscilaciones por segundo. La *amplitud* A representa el máximo desplazamiento que experimenta una partícula del medio respecto de su posición de equilibrio.

La propagación de una onda armónica en una cuerda da lugar a una senoide que avanza a lo largo de ella. A diferencia del M.A.S. el movimiento ondulatorio se propaga o progresa a través del medio. Ello permite introducir una nueva magnitud característica que es exclusiva de este tipo de movimientos y que se denomina *longitud de onda*. Si en un instante dado se sacara una fotografía del aspecto que presenta la cuerda por la que se propaga una onda armónica, el resultado sería una línea sinusoidal que constituye el perfil de la onda en ese instante. Otra fotografía tomada un instante posterior mostraría que la senoide ha avanzado.

En cualquier caso, la altura de la cuerda tomada con su signo (altura que en este tipo de ondas mide la magnitud o el estado de perturbación) se repite a intervalos iguales de distancia, cada uno de los cuales constituye una longitud de onda. La longitud de onda es, pues, la distancia que separa dos puntos sucesivos del medio que se encuentran en el mismo estado de perturbación. Coincide con el espacio que recorre la onda durante un intervalo de tiempo igual a un periodo, es decir,

espacio = velocidad x tiempo

$$\lambda = v \cdot T \quad (13.1)$$

Donde v es la velocidad, supuesta constante, de avance de la perturbación.

Expresada en términos de frecuencia, la ecuación anterior toma la forma:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (13.2)$$

e indica que la longitud de onda λ y la frecuencia f son dos magnitudes inversamente proporcionales, de modo que cuanto mayor es una tanto menor es la otra.

LA ECUACIÓN DE ONDA

El movimiento ondulatorio puede expresarse en forma matemática mediante una ecuación que describa un movimiento vibratorio avanzando por un medio. Para ello es preciso partir de la ecuación que define la oscilación del foco u origen de la perturbación. Si el movimiento es armónico simple su ecuación correspondiente será:

$$Y = A \cdot \text{sen } \omega t$$

o también

$$Y = A \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{T} t \right)$$

$$Y = A \cdot \text{sen} (2\pi f t)$$

Donde la elongación se representa, en este caso, por la letra Y , pues en ondas transversales, como sucede en las cuerdas, equivale a una altura.

Dado que la perturbación avanza a una velocidad v , en recorrer una distancia r invertirá un tiempo $t' = \frac{r}{v}$.

Eso significa que el estado de perturbación de cualquier punto P situado a una distancia r del foco O coincidirá con el que tenía el foco t' segundos antes. Se trata de un tiempo de retardo que indica en cuánto se ha retrasado la perturbación al llegar a P respecto del foco.

Por tanto, si en la ecuación de la elongación que describe la situación del foco, se cambia t por $t-t'$ se obtiene una ecuación que describe el estado de perturbación del punto P :

$$Y = A \cdot \text{sen } \omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$$

Dado que t y r hacen referencia a instantes genéricos y distancias genéricas respecto del foco O , la anterior ecuación describe el estado de perturbación del medio, medido por la altura Y en cualquier punto y en cualquier instante, lo que constituye una buena descripción matemática de una onda armónica.

El argumento de la función seno correspondiente puede expresarse también en la forma

$$\omega \left(t - \frac{r}{v} \right) = \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{r}{\lambda/T} \right) = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

dado que $\omega = 2\pi/T$ y $v = \lambda/T$; lo cual permite escribir la ecuación de ondas en función de sus parámetros o constantes características, tales como la amplitud A , el periodo T y la longitud λ .

$$Y = A \cdot \text{sen } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

La ecuación de onda recibe también el nombre de función de onda y puede referirse a una perturbación genérica que no consista precisamente en una altura, si se sustituye Y por la letra griega Ψ que designa la magnitud de la perturbación. En tal caso, la función de onda toma la forma

$$\psi = A \cdot \text{sen } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

en donde Ψ puede representar la alteración, con el tiempo, de propiedades físicas tan diversas como una densidad, una presión, un campo eléctrico o un campo magnético, por ejemplo, y su propagación por el espacio.

APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN DE UNA ONDA

La ecuación de una onda permite determinar el estado de perturbación en cualquier instante y en cualquier punto del medio, por lo que define completamente a la onda correspondiente. En el caso de una onda armónica viene dada por la expresión

$$\psi = A \cdot \text{sen } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right)$$

siendo A (amplitud), T (periodo) y λ (longitud de onda) las constantes o parámetros que la caracterizan y t y r las variables que indican el instante de tiempo considerado y la distancia al foco del punto en el que se desea estudiar la perturbación. Si se conocen A , T y λ es posible escribir la ecuación de Ψ y viceversa, si se conoce Ψ por comparación pueden identificarse los valores de A , T y λ .

La ecuación de una onda transversal que se propaga a lo largo de una cuerda viene dada por la expresión

$$\Psi = 0,1 \cdot \text{sen } \pi (2t - 4r)$$

Se trata de determinar a) la amplitud A de la onda, b) su periodo T , c) su longitud de onda, d) la velocidad de avance de la perturbación, e) la magnitud de la perturbación en un punto que dista $0,2$ m del foco al cabo de $0,5$ segundos de iniciarse el movimiento. (Todas las cantidades están expresadas en unidades SI.)

Para resolver las cuestiones a, b, c basta con identificar la ecuación general con la que corresponde al movimiento ondulatorio concreto que se pretende analizar. Por tanto:

a) Comparando el factor que multiplica en ambas a la función seno resulta $A = 0,1$ m.

b) Comparando el argumento o ángulo de la función seno, también llamado fase de la onda correspondiente, resulta:

$$2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right) = \pi (2t - 4r)$$

En lo que respecta a los coeficientes respectivos de la variable t se tiene:

$$\frac{2\pi}{T} = \pi \cdot 2 \quad T = 1 \text{ s}$$

c) En lo que respecta a los coeficientes de la variable r :

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \pi \cdot 4 \quad \lambda = 0,5 \text{ m}$$

d) La velocidad v es el cociente entre λ y T :

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{0,5}{1} = 0,5 \text{ m/s}$$

e) Sustituyendo los valores de $t = 0,5$ s y $r = 0,2$ m en la expresión de Ψ resulta:

$$\Psi = 0,1 \cdot \text{sen } \pi (2 \cdot 0,5 - 4 \cdot 0,2) = 0,02 \text{ m}$$

Es decir, en ese punto y en ese instante la magnitud de la perturbación, medida por la altura que alcanza la cuerda, es de $0,02$ m, la quinta parte de la máxima altura o elongación dada por la amplitud $A = 0,1$ m.

APLICACIÓN: LA INFLUENCIA DEL MEDIO EN LA VELOCIDAD DEL SONIDO

En los medios gaseosos como el aire el sonido se propaga más lentamente que en los medios sólidos. Así, la velocidad del sonido es 15,4 veces mayor en el hierro que en el aire. Se trata de calcular en cuánto se retrasaría la recepción del sonido del silbato de un tren propagado por el aire respecto del ruido de sus ruedas propagado por los raíles para un observador que se encuentre a dos kilómetros de la locomotora, considerando la velocidad del sonido en el aire a la temperatura ambiente igual a 340 m/s.

Dado que el sonido en un medio homogéneo se propaga a velocidad constante, se cumplirá la relación $v = s/t$ y por tanto:

$$t_{\text{aire}} = \frac{s}{v_{\text{aire}}} = \frac{2 \cdot 10^3 \text{ m}}{340 \text{ m/s}} = 5,9 \text{ s}$$

$$t_{\text{hierro}} = \frac{t_{\text{aire}}}{15,4} = \frac{5,9}{15,4} = 0,4 \text{ s}$$

El tiempo de retraso entre ambas será su diferencia, es decir:

$$t = t_{\text{aire}} - t_{\text{hierro}} = 5,9 - 0,4 = 5,5 \text{ s}$$

TRANSMISIÓN DE LA ENERGÍA EN UN MOVIMIENTO ONDULATORIO

La propagación de una onda lleva consigo un flujo o transporte de energía del foco emisor al medio a lo largo de la dirección en la que la onda avanza. Si la perturbación que se propaga consiste en un movimiento vibratorio armónico es posible determinar la magnitud de dicho flujo de energía.

En un medio elástico el movimiento vibratorio de cada punto se conserva en el tiempo, no hay disipación de la energía de vibración y, por tanto, la energía mecánica total, suma de cinética y potencial, se mantiene constante. Dado que en un M.A.S. la energía total coincide con la energía potencial máxima o con la cinética máxima, para cada partícula del medio alcanzada por la perturbación se cumplirá:

$$E = E_c + E_p = E_c (\text{máxima}) = \frac{1}{2} m v_{\text{max}}^2$$

siendo $v_{\text{max}} = \omega A$ y $\omega = 2\pi f$, es decir:

$$E = \frac{1}{2} m (2\pi f A)^2 = 2\pi^2 m f^2 A^2$$

Si n es el número de partículas contenido en la unidad de volumen del medio alcanzado por la perturbación, la energía de vibración acumulada en dicho volumen unidad será:

$$E_V = n \cdot E = 2\pi^2 m n f^2 A^2 = 2\pi^2 \rho f^2 A^2$$

donde ρ representa la densidad del medio y coincide con el producto de $m \cdot n$, es decir, con la masa de las partículas contenidas en una unidad de volumen.

Dado que la intensidad I de un movimiento ondulatorio representa la energía que atraviesa la superficie unidad en la unidad de tiempo, equivaldrá a la energía total de vibración contenida en el cilindro obtenido cuando una superficie unidad avanza una longitud igual a la que recorre la onda en un segundo. Dicho volumen, igual al producto de la base por la altura, coincidirá con la velocidad v de la onda:

$$V = \text{base} \times \text{altura} = 1 \text{ m}^2 \times v \cdot 1 \text{ s} = v$$

y por tanto la intensidad vendrá dada por el producto de E_V por V :

$$I = E_V \cdot V = 2\pi^2 \rho v f^2 A^2$$

Es decir, la intensidad de un movimiento ondulatorio, y por tanto la energía asociada a la onda, es directamente proporcional al cuadrado de su amplitud A y al cuadrado de su frecuencia f . Las ondas de alta frecuencia serán más energéticas que las de frecuencia baja y lo mismo sucederá respecto de la amplitud.

LA NATURALEZA DEL SONIDO

Las ondas sonoras constituyen un tipo de ondas mecánicas que tienen la virtud de estimular el oído humano y generar la sensación sonora. En el estudio del sonido se deben distinguir los aspectos físicos de los aspectos fisiológicos relacionados con la audición. Desde un punto de vista físico el sonido comparte todas las propiedades características del comportamiento ondulatorio, por lo que puede ser descrito utilizando los conceptos sobre ondas. A su vez el estudio del sonido sirve para mejorar la comprensión de algunos fenómenos típicos de las ondas. Desde un punto de vista fisiológico sólo existe sonido cuando un oído es capaz de percibirlo.

El sonido y su propagación

Las ondas que se propagan a lo largo de un muelle como consecuencia de una compresión longitudinal del mismo constituyen un modelo de ondas mecánicas que se asemeja bastante a la forma en la que el sonido se genera y se propaga. Las ondas sonoras se producen también como consecuencia de una compresión del medio a lo largo de la dirección de propagación. Son, por tanto, ondas longitudinales.

Si un globo se conecta a un pistón capaz de realizar un movimiento alternativo mediante el cual inyecta aire al globo y lo toma de nuevo, aquél sufrirá una secuencia de operaciones de inflado y desinflado, con lo cual la presión del aire contenido dentro del globo aumentará y disminuirá sucesivamente. Esta serie de compresiones y encarecimientos alternativos llevan consigo una aportación de energía, a intervalos, del foco al medio y generan ondas sonoras. La campana de

un timbre vibra al ser golpeada por su correspondiente martillo, lo que da lugar a compresiones sucesivas del medio que la rodea, las cuales se propagan en forma de ondas. Un diapasón, la cuerda de una guitarra o la de un violín producen sonido según un mecanismo análogo.

En todo tipo de ondas mecánicas el medio juega un papel esencial en la propagación de la perturbación, hasta el punto de que en ausencia de medio material, la vibración, al no tener por donde propagarse, no da lugar a la formación de la onda correspondiente. La velocidad de propagación del sonido depende de las características del medio. En el caso de medios gaseosos, como el aire, las vibraciones son transmitidas de un punto a otro a través de choques entre las partículas que constituyen el gas, de ahí que cuanto mayor sea la densidad de éste, mayor será la velocidad de la onda sonora correspondiente. En los medios sólidos son las fuerzas que unen entre sí las partículas constitutivas del cuerpo las que se encargan de propagar la perturbación de un punto a otro. Este procedimiento más directo explica que la velocidad del sonido sea mayor en los sólidos que en los gases.

Sonido físico y sensación sonora

No todas las ondas sonoras pueden ser percibidas por el oído humano, el cual es sensible únicamente a aquellas cuya frecuencia está comprendida entre los 20 y los 20 000 Hz. En el aire dichos valores extremos corresponden a longitudes de onda que van desde 16 metros hasta 1,6 centímetros respectivamente. En general se trata de ondas de pequeña amplitud.

Cuando una onda sonora de tales características alcanza la membrana sensible del tímpano, produce en él vibraciones que son transmitidas por la cadena de huesecillos hasta la base de otra membrana situada en la llamada ventana oval, ventana localizada en la cóclea o caracol. El hecho de que la ventana oval sea de 20 a 30 veces más pequeña que el tímpano da lugar a una amplificación que llega a aumentar entre 40 y 90 veces la presión de la onda que alcanza al tímpano. Esta onda de presión se propaga dentro del caracol a través de un líquido viscoso hasta alcanzar otra membrana conectada a un sistema de fibras fijas por sus extremos a modo de cuerdas de arpa, cuyas deformaciones elásticas estimulan las terminaciones de los nervios auditivos. Las señales de naturaleza eléctrica generadas de este modo son enviadas al cerebro y se convierten en sensación sonora. Mediante este proceso el sonido físico es convertido en sonido fisiológico.

CUALIDADES DEL SONIDO

El oído es capaz de distinguir unos sonidos de otros porque es sensible a las diferencias que puedan existir entre ellos en lo que concierne a alguna de las tres cualidades que caracterizan todo sonido y que son la intensidad, el tono y el timbre. Aun cuando todas ellas se refieren al sonido fisiológico, están relacionadas con diferentes propiedades de las ondas sonoras.

Intensidad

La intensidad del sonido percibido, o propiedad que hace que éste se capte como fuerte o como débil, está relacionada con la intensidad de la onda sonora correspondiente, también llamada *intensidad acústica*. La intensidad acústica es una magnitud que da idea de la cantidad de energía que está fluyendo por el medio como consecuencia de la propagación de la onda.

Se define como la energía que atraviesa por segundo una superficie unidad dispuesta perpendicularmente a la dirección de propagación. Equivale a una potencia por unidad de superficie y se expresa en W/m^2 . La intensidad de una onda sonora es proporcional al cuadrado de su frecuencia y al cuadrado de su amplitud y disminuye con la distancia al foco.

La magnitud de la sensación sonora depende de la intensidad acústica, pero también depende de la sensibilidad del oído. El intervalo de intensidades acústicas que va desde el *umbral de audibilidad*, o valor mínimo perceptible, hasta el *umbral del dolor* es muy amplio, estando ambos valores límite en una relación del orden de 10^{14}

Debido a la extensión de este intervalo de audibilidad, para expresar intensidades sonoras se emplea una escala cuyas divisiones son potencias de diez y cuya unidad de medida es el decibelio (dB). Ello significa que una intensidad acústica de 10 decibelios corresponde a una energía diez veces mayor que una intensidad de cero decibelios; una intensidad de 20 dB representa una energía 100 veces mayor que la que corresponde a 0 decibelios y así sucesivamente.

Otro de los factores de los que depende la intensidad del sonido percibido es la frecuencia. Ello significa que para una frecuencia dada un aumento de intensidad acústica da lugar a un aumento del nivel de sensación sonora, pero intensidades acústicas iguales a diferentes frecuencias pueden dar lugar a sensaciones distintas.

Tono

El *tono* es la cualidad del sonido mediante la cual el oído le asigna un lugar en la escala musical, permitiendo, por tanto, distinguir entre los graves y los agudos. La magnitud física que está asociada al tono es la frecuencia. Los sonidos percibidos como graves corresponden a frecuencias bajas, mientras que los agudos son debidos a frecuencias altas. Así el sonido más grave de una guitarra corresponde a una frecuencia de 82,4 Hz y el más agudo a 698,5 hertz.

Junto con la frecuencia, en la percepción sonora del tono intervienen otros factores de carácter psicológico. Así sucede por lo general que al elevar la intensidad se eleva el tono percibido para frecuencias altas y se baja para las frecuencias bajas. Entre frecuencias comprendidas entre 1 000 y 3 000 Hz el tono es relativamente independiente de la intensidad.

Timbre

El *timbre* es la cualidad del sonido que permite distinguir sonidos procedentes de diferentes instrumentos, aun cuando posean igual tono e intensidad. Debido a esta misma cualidad es posible reconocer a una persona por su voz, que resulta característica de cada individuo.

El timbre está relacionado con la complejidad de las ondas sonoras que llegan al oído. Pocas veces las ondas sonoras corresponden a sonidos puros, sólo los diapasones generan este tipo de sonidos, que son debidos a una sola frecuencia y representados por una onda armónica. Los instrumentos musicales, por el contrario, dan lugar a un sonido más rico que resulta de vibraciones complejas. Cada vibración compleja puede considerarse compuesta por una serie de vibraciones armónico simples de una frecuencia y de una amplitud determinadas, cada una de las cuales, si se considerara separadamente, daría lugar a un sonido puro. Esta mezcla de tonos parciales es característica de cada instrumento y define su timbre. Debido a la analogía existente entre el mundo de la luz y el del sonido, al timbre se le denomina también color del tono.

FENÓMENOS ONDULATORIOS

Las propiedades de las ondas se manifiestan a través de una serie de fenómenos que constituyen lo esencial del comportamiento ondulatorio. Así, las ondas rebotan ante una barrera, cambian de dirección cuando pasan de un medio a otro, suman sus efectos de una forma muy especial y pueden salvar obstáculos o bordear las esquinas.

El estudio de los fenómenos ondulatorios supone la utilización de conceptos tales como periodo, frecuencia, longitud de onda y amplitud, y junto a ellos el de *frente de onda*, el cual es característico de las ondas bi y tridimensionales.

Se denomina frente de ondas al lugar geométrico de los puntos del medio que son alcanzados en un mismo instante por la perturbación.

Las ondas que se producen en la superficie de un lago, como consecuencia de una vibración producida en uno de sus puntos, poseen frentes de onda circulares. Cada uno de esos frentes se corresponden con un conjunto de puntos del medio que están en el mismo estado de vibración, es decir a igual altura. Debido a que las propiedades del medio, tales como densidad o elasticidad, son las mismas en todas las direcciones, la perturbación avanza desde el foco a igual velocidad a lo largo de cada una de ellas, lo que explica la forma circular y, por tanto, equidistante del foco, de esa línea que contiene a los puntos que se encuentran en el mismo estado de vibración.

Las ondas tridimensionales, como las producidas por un globo esférico que se infla y desinfla alternativamente, poseen frentes de ondas esféricos si el foco es puntual y si el medio, como en el caso anterior, es homogéneo.

El principio de Huygens

La explicación de los fenómenos ondulatorios puede hacerse de forma sencilla sobre la base de un principio propuesto por Christian Huygens (1629-1695) para ondas luminosas, pero que es aplicable a cualquier tipo de ondas. La observación de que las ondas en la superficie del agua se propagaran de una forma gradual y progresiva suscitó en Huygens la idea de que la perturbación en un instante posterior debería ser producida por la perturbación en otro anterior. Este fue el germen del siguiente principio general de propagación de las ondas que lleva su nombre:

«Cada uno de los puntos de un frente de ondas puede ser considerado como un nuevo foco emisor de ondas secundarias que avanzan en el sentido de la perturbación y cuya envolvente en un instante posterior constituye el nuevo frente.»

La aplicación del principio de Huygens se lleva a efecto mediante un método puramente geométrico conocido como *método de construcción de Huygens*. En el caso de una onda bidimensional circular producida por un foco o fuente puntual la aplicación de este método sería como sigue.

Si S es el frente de ondas correspondiente a un instante cualquiera t , según el principio de Huygens, cada punto de S se comporta como un emisor de ondas secundarias también circulares. Al cabo de un intervalo de tiempo t los nuevos frentes formarán una familia de circunferencias S_i , con sus centros situados en cada uno de los puntos de S y cuyo radio $r = v \cdot \Delta t$ será el mismo para todas ellas si la velocidad v de propagación es igual en cualquier dirección. La línea S' tangente a todos los frentes secundarios S_i y que los envuelve resulta ser otra circunferencia y constituye el nuevo frente de ondas para ese instante posterior $t = t + \Delta t$.

Reflexión y refracción de las ondas

Cuando una onda alcanza la superficie de separación de dos medios de distinta naturaleza se producen, en general, dos nuevas ondas, una que retrocede hacia el medio de partida y otra que atraviesa la superficie límite y se propaga en el segundo medio. El primer fenómeno se denomina *reflexión* y el segundo recibe el nombre de *refracción*.

En las ondas monodimensionales como las producidas por la compresión de un muelle, la reflexión lleva consigo una inversión del sentido del movimiento ondulatorio. En las ondas bi o tridimensionales la inversión total se produce únicamente cuando la incidencia es normal, es decir, cuando la dirección, en la que avanza la perturbación es perpendicular a la superficie reflectante. Si la incidencia es oblicua se produce una especie de rebote, de modo que el movimiento ondulatorio reflejado cambia de dirección, pero conservando el valor del ángulo que forma con la superficie límite.

En el caso de las ondas sonoras, la reflexión en una pared explica el fenómeno del eco. Si la distancia a la pared es suficiente, es posible oír la propia voz reflejada porque el tiempo que emplea el sonido en ir y volver permite separar la percepción de la onda incidente de la reflejada. El oído humano sólo es capaz de percibir dos sonidos como separados si distan uno respecto del otro más de 0,1 segundos, de ahí que para que pueda percibiéndose el eco la superficie reflectiva debe estar separada del observador 17 metros por lo menos, cantidad que corresponde a la mitad de la distancia que recorre el sonido en el aire en ese intervalo de tiempo ($17 \text{ m} = 340 \text{ m/s} \cdot 0,1 \text{ s}/2$).

En los espacios cerrados, como las salas, el sonido una vez generado se refleja sucesivas veces en las paredes, dando lugar a una prolongación por algunos instantes del sonido original. Este fenómeno se denomina *reverberación* y empeora las condiciones acústicas de una sala, puesto que hace que los sonidos anteriores se entremezclen con los posteriores. Su eliminación se logra recubriendo las paredes de materiales, como corcho o moqueta, que absorben las ondas sonoras e impiden la reflexión.

El fenómeno de la refracción supone un cambio en la velocidad de propagación de la onda, cambio asociado al paso de un medio a otro de diferente naturaleza o de diferentes propiedades. Este cambio de velocidad da lugar a un cambio en la dirección del movimiento ondulatorio. Como consecuencia, la onda refractada se desvía un cierto ángulo respecto de la incidente.

La refracción se presenta con cierta frecuencia debido a que los medios no son perfectamente homogéneos, sino que sus propiedades y, por lo tanto, la velocidad de propagación de las ondas en ellos, cambian de un punto a otro. La propagación del sonido en el aire sufre refracciones, dado que su temperatura no es uniforme. En un día soleado las capas de aire próximas a la superficie terrestre están más calientes que las altas y la velocidad del sonido, que aumenta con la temperatura, es mayor en las capas bajas que en las altas. Ello da lugar a que el sonido, como consecuencia de la refracción, se desvía hacia arriba. En esta situación la comunicación entre dos personas suficientemente separadas se vería dificultada. El fenómeno contrario ocurre durante las noches, ya que la Tierra se enfría más rápidamente que el aire.

Interferencias y pulsaciones

Cuando dos ondas de igual naturaleza se propagan simultáneamente por un mismo medio, cada punto del medio sufrirá la perturbación resultante de componer ambas. Este fenómeno de superposición de ondas recibe el nombre de *interferencias* y constituye uno de los más representativos del comportamiento ondulatorio.

Lo esencial del fenómeno de interferencias consiste en que la suma de las dos ondas supuestas de igual amplitud no da lugar necesariamente a una perturbación doble, sino que el resultado dependerá de lo retrasada o adelantada que esté una onda respecto de la otra. Se dice que dos ondas alcanzan un punto dado *en fase* cuando ambas producen en él oscilaciones sincrónicas o acompasadas. En tal caso la oscilación resultante tendrá una amplitud igual a la suma de las amplitudes de las ondas individuales, y la interferencia se denomina *constructiva* porque en la onda resultante se refuerzan los efectos individuales. Si por el contrario las oscilaciones producidas por cada onda en el punto considerado están contrapuestas, las ondas llegan en *oposición de fase* y la oscilación ocasionada por una onda será neutralizada por la debida a la otra. En esta situación la interferencia se denomina *destruktiva*.

Si se consideran ondas armónicas unidimensionales y de igual frecuencia, el fenómeno de interferencias puede ser entendido como una consecuencia de las diferencias de distancia de los dos focos O_1 y O_2 al punto genérico P del

medio considerado. Si en la diferencia entre $\overline{O_1P}$ y $\overline{O_2P}$ caben un número entero de ondas completas (y de longitudes de onda), eso significa que las ondas individuales llegan en fase a P . Si por el contrario caben un número impar de medias ondas (de semilongitudes de onda $\lambda/2$), equivale a decir que las ondas individuales llegan en oposición de fase.

De acuerdo con lo anterior, según sea la posición del punto P del medio respecto de los focos, así será el tipo de interferencias constructiva o destructiva que se darán en él. Cuando se estudia el medio en su conjunto se aprecian puntos en los que ha habido refuerzo y puntos en los que ha habido destrucción mutua de las perturbaciones. Cada uno de tales conjuntos de puntos forman líneas alternativas. El conjunto de líneas de máxima amplitud y de mínima amplitud de oscilación resultante constituye el esquema o *patrón de interferencias*.

Si se hace sonar un silbato en un recinto cuyas paredes reflejen bien el sonido, la superposición de las ondas incidente y reflejada daría lugar a un fenómeno de interferencias. Un observador que se desplazara por la sala, distinguiría unas posiciones en las cuales la intensidad del sonido percibido es máximo de otras en donde es prácticamente nulo. Para una frecuencia constante la intensidad del sonido fisiológico depende del cuadrado de la amplitud, pero no de la elongación, de modo que el oído no capta la vibración, sino que percibe una sensación regular que en los fenómenos de interferencia cambia de magnitud con la posición.

Cuando las ondas que se superponen tienen frecuencia ligeramente diferentes el fenómeno de interferencias sucede en el tiempo, es decir, sin desplazarse de un punto a otro un observador de ondas sonoras percibiría variaciones de intensidad pulsantes u oscilantes que reciben el nombre de *pulsaciones*. La suma geométrica de dos ondas sinusoidales de frecuencias o de periodos próximos demuestra que la onda resultante no tiene una amplitud constante, sino que varía a lo largo del tiempo. Se dice que es una onda de *amplitud modulada*. Si la amplitud varía, también variará la intensidad del sonido correspondiente, el cual es percibido fuerte y débil de un modo alternativo.

La difracción

Las ondas son capaces de traspasar orificios y bordear obstáculos interpuestos en su camino. Esta propiedad característica del comportamiento ondulatorio puede ser explicada como consecuencia del principio de Huygens y del fenómeno de interferencias.

Así, cuando una fuente de ondas alcanza una placa con un orificio o rendija central, cada punto de la porción del frente de ondas limitado por la rendija se convierte en foco emisor de ondas secundarias todas de idéntica frecuencia. Los focos secundarios que corresponden a los extremos de la abertura generan ondas que son las responsables de que el haz se abra tras la

rendija y bordee sus esquinas. En los puntos intermedios se producen superposiciones de las ondas secundarias que dan lugar a zonas de intensidad máxima y de intensidad mínima típicas de los fenómenos de interferencias.

Ambos fenómenos que caracterizan la difracción de las ondas dependen de la relación existente entre el tamaño de la rendija o del obstáculo y la longitud de onda. Así, una rendija cuya anchura sea del orden de la longitud de la onda considerada, será completamente bordeada por la onda incidente y, además, el patrón de interferencias se reducirá a una zona de máxima amplitud idéntica a un foco. Es como si mediante este procedimiento se hubiera seleccionado uno de los focos secundarios descritos por Huygens en el principio que lleva su nombre.

EL EFECTO DOPPLER

La frecuencia de un sonido está determinada por la frecuencia de la vibración que lo origina siempre que el foco que lo emite y el observador que lo percibe estén ambos en reposo. Cuando, ya sea el foco, ya sea el observador, están en movimiento, el sonido percibido presenta una frecuencia que depende de la velocidad. Un observador situado ante la vía del tren aprecia que el sonido emitido por el silbato de una locomotora que pasa delante de él a gran velocidad es más agudo cuando se acerca (mayor frecuencia, f) y más grave cuando se aleja (menor frecuencia). Este efecto, según el cual la frecuencia percibido de un sonido depende del estado de movimiento del observador, del foco o de ambos, fue explicado por primera vez en 1842 por el físico austriaco Christian Doppler (1803-1853).

Si, como en el caso de la locomotora, el observador O está en reposo y el foco emisor F de ondas sonoras está en movimiento, sucede que debido al avance del foco los frentes de ondas se comprimen en el sentido del movimiento. Es como si cada frente de ondas tendiera a alcanzar al emitido en un instante anterior. Lo contrario sucede en el sentido opuesto al movimiento y los frentes de ondas se separan. El movimiento del foco da lugar, en definitiva, a frentes de ondas excéntricos.

El cambio en la distancia entre los frentes de ondas equivale a una modificación en la longitud de onda λ correspondiente y consiguientemente en la frecuencia observada. La nueva f' puede expresarse en términos matemáticos en la forma

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda \pm v_F T}$$

donde v es la velocidad del sonido y v_F la velocidad del foco. El término $v_F \cdot T$ representa el espacio que recorre el foco en un intervalo de tiempo igual a un periodo T y, por tanto, la corrección que hay que aplicar a la longitud de onda λ (espacio recorrido por el sonido en un periodo T) medida en ausencia de movimiento. Dicha corrección es positiva cuando el foco se acerca al observador y negativa cuando se aleja de él.

Expresando la anterior ecuación de modo que figure en ella la frecuencia $f = v/\lambda$ del sonido que se percibiría si el foco estuviera en reposo, se tiene:

$$f' = \frac{v/\lambda}{\frac{\lambda \pm v_F T}{\lambda}} = \frac{f}{1 \pm v_F/v} \quad \begin{array}{l} - \text{ si } F \text{ se acerca a } O \\ + \text{ si } F \text{ se aleja a } O \end{array}$$

sin más que dividir numerador y denominador por λ .

Esta fórmula predice un salto de frecuencia de un tono musical completo si el foco pasa por delante del observador a 67 km/h. El propio Doppler organizó experimentos con trompetas dispuestas en vagones para comprobar la validez de sus explicaciones teóricas. Músicos profesionales, expertos en la apreciación de los tonos, hicieron las veces de instrumentos de medida de los saltos de frecuencia en sus experiencias.

Si es el observador el que se desplaza a una velocidad v_O estando el foco en reposo, los frentes de onda mantienen en este caso su carácter concéntrico, pero la frecuencia percibida, es decir, el número de ellos que llegan al observador en la unidad de tiempo, será diferente. Si el observador se acerca al foco las velocidades de ambos se sumarán y se restarán si se aleja de él. Por tanto:

$$f' = \frac{v \pm v_O}{\lambda}$$

expresión que puede escribirse en la forma:

$$f' = \frac{v}{\lambda} \pm \frac{v_O}{\lambda} = \frac{v}{\lambda} \left(1 \pm \frac{v_O}{v} \right)$$

es decir:

$$f' = f \left(1 \pm \frac{v_O}{v} \right) \begin{array}{l} + \text{ si } O \text{ se acerca a } F \\ - \text{ si } O \text{ se aleja a } F \end{array}$$

siendo f' la frecuencia percibida por el observador y f la frecuencia emitida por el foco.

APLICACIÓN DE LA NOCIÓN DE INTERFERENCIAS

El resultado de la superposición de dos movimientos ondulatorios de igual frecuencia en un punto determinado del medio depende de la relación existente entre las diferencias de distancias entre los focos respectivos y el punto considerado. Llamando a dicha diferencia, las condiciones de máximo y de mínimo en el movimiento resultante se pueden escribir en la forma:

MÁXIMO $\Delta = n \lambda$ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ (en Δ cabe un número entero de ondas ~ completas)

MÍNIMO $\Delta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ (en Δ cabe un número impar de semiondas
 \cap)

Un experimentador conecta dos tubos de goma a la caja de un diapasón que es excitado eléctricamente y mantiene los otros extremos de los tubos en sus oídos. Aumentando progresivamente la longitud de uno de ellos, aprecia que cuando la diferencia entre ambos es de 18 cm percibe por primera vez un sonido de intensidad mínima. Se trata de determinar cuál es la frecuencia del diapasón y la longitud de la onda sonora correspondiente. (Considérese la velocidad del sonido en el aire 340 m/s.)

En este caso el diapasón equivale a dos focos, al generar ondas idénticas que se propagan por caminos diferentes. Si el primer mínimo se consigue cuando es igual a 18 cm, aplicando la condición de mínimo se tendrá:

$$\Delta = (2n + 1) \frac{\lambda}{2} \quad \text{con } n = 0$$

luego:

$$\lambda = 2\Delta = 2 \cdot 0,18 = 0,36 \text{ m}$$

Dado que la frecuencia f y la longitud de onda λ están relacionadas por la ecuación

$$v = \lambda \cdot f$$

se tendrá:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340}{0,36} = 0,44 \text{ Hz}$$

APLICACIÓN DEL EFECTO DOPPLER

Una lancha rápida se acerca a la pared vertical de un acantilado en dirección perpendicular. Con la ayuda de un aparato de medida el piloto aprecia que entre el sonido emitido por la sirena de su embarcación y el percibido tras la reflexión en la pared del acantilado se produce un salto de frecuencias de 440 Hz a 495 Hz. ¿A qué velocidad navega la lancha? (Tómese la velocidad del sonido en el aire $v = 340 \text{ m/s.}$)

El dato de la frecuencia inicial, 440 Hz, corresponde al valor en reposo, ya que el piloto, al moverse con la embarcación, está en reposo respecto de ella; por contra, el dato del sonido reflejado corresponde a una frecuencia emitida en movimiento. Se trata de averiguar, antes de pasar a las ecuaciones, si la situación es la de un foco en movimiento, la de un observador en movimiento o la de ambos en movimiento.

Si el observador estuviera situado en el acantilado se trataría, en efecto, del primer caso, pero por una parte la pared refleja la excentricidad de los frentes producida por el avance del foco -equivale a un foco en movimiento- y por otra, el observador se acerca a ese foco ficticio; luego la situación es la planteada en tercer lugar.

Las ecuaciones características del efecto Doppler indican lo siguiente:

observador (O) en movimiento
y foco (F) en reposo:

$$f' = f \left(1 + \frac{v_O}{v} \right) \quad (O \text{ se acerca a } F)$$

observador (O) en reposo
y foco (F) en movimiento:

$$f' = f / \left(1 - \frac{v_F}{v} \right) \quad (F \text{ se acerca a } O)$$

Como se dan ambos casos, se aplicará sucesivamente ambas transformaciones a la frecuencia emitida f para obtener la frecuencia percibido f'

$$f' = f \left(\frac{1 + v_O/v}{1 - v_F/v} \right) = f \left(\frac{1 + v_F/v}{1 - v_F/v} \right) = f \left(\frac{v + v_F}{v - v_F} \right)$$

pues en este caso $v_F = v_O$

Sustituyendo resulta:

$$495 = 440 \left(\frac{340 + v_F}{340 - v_F} \right)$$

y despejando v_F se tiene:

$$v_F = 20 \text{ m/s} = 72 \text{ km/h}$$