# Oscilaciones y Ondas

A un movimiento que se repite en intervalos de tiempo iguales se lo denomina *movimiento periódico*. Cuando una partícula, en un movimiento periódico, se mueve a lo largo de una misma trayectoria de ida y vuelta respecto a una posición de equilibrio, se dice que el movimiento que efectúa es oscilatorio o vibratorio.
El desplazamiento de una partícula que describe un movimiento periódico puede expresarse siempre en términos de funciones trigonométricas senos y cosenos. Debido a que el término armónico se aplica a las expresiones matemáticas que contienen este tipo de funciones, al movimiento periódico generalmente se lo denomina también movimiento armónico. En general, una *vibración armónica* se produce cuando una partícula oscila alrededor de un punto de equilibrio, de forma que su velocidad es máxima al pasar por el punto de equilibrio y nula en los extremos de la oscilación.

Podemos observar ejemplos de movimiento ondulatorio en la vida diaria, el universo está lleno de movimientos de este tipo: las oscilaciones del péndulo de un reloj, las de una cuerda de una guitarra, una masa sujeta a un resorte, los átomos y moléculas de una estructura cristalina sólida, las ondulaciones que se producen en el agua cuando se lanza una piedra a un estanque, las señales electromagnéticas generadas por emisoras de radio y televisión, etc.

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. Sin embargo, el concepto de onda es abstracto. Observando lo que nosotros llamamos una ondulación en el agua, lo que vemos en realidad es una reestructuración de la superficie que ha sido perturbada por el objeto que golpeó sobre ella. Sin el agua, allí no habría ninguna onda. Una onda que viaja en un cordón no existiría sin el cordón. Las ondas de sonido no podrían propagarse a través del aire si éste no estuviese conformado por moléculas. Aquella clase de ondas que precisan de un medio material que haga el papel de soporte de la perturbación para propagarse se denominan genéricamente *ondas mecánicas.* El sonido, las ondas que se forman en la superficie del agua, las ondas en cuerdas, son

algunos ejemplos de ondas mecánicas y corresponden a compresiones, deformaciones y, en general, a perturbaciones del medio por el que se propagan.
Sin embargo, existen ondas que pueden propagarse aún en ausencia de medio material, es decir, en el vacío. Son las *ondas electromagnéticas*, categoría a la que pertenecen las ondas luminosas. Independientemente de esta diferenciación, existen ciertas características que son comunes a todas las ondas, cualquiera que sea su naturaleza.

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. Un ejemplo de esto puede ser observado mediante la experiencia de colocar un corcho en un recipiente suficientemente amplio con agua y provocar ondas en la superficie del líquido. Se podrá comprobar que el corcho sólo sube, baja y oscila lentamente de adelante hacia atrás, pero no sigue al desplazamiento del oleaje, de lo que se puede concluir que el entorno que lo sostiene tampoco lo hace. Las partículas constituyentes del medio (agua) que sirve de soporte para la onda se desplazan relativamente poco respecto de su posición de equilibrio. Lo que avanza y progresa no son ellas, sino la perturbación que se transmiten de unas hacia las otras en su entorno. El movimiento ondulatorio supone únicamente un *transporte de energía* y de cantidad de movimiento.

## *Descripción de las ondas*

Para comenzar a estudiar el tema, podemos imaginar que construimos un dispositivo con el que se pueden generar ondas. Dicho dispositivo es un péndulo simple que consiste en una pesa suspendida de un hilo liviano. El hecho de que el hilo sea liviano no es trivial debido a que, si pretendemos estudiar sólo el movimiento de la pesa, la masa del hilo jugará un papel importante durante el movimiento de nuestro péndulo en los casos en que no sea mucho menor que la masa de la pesa suspendida. Si uno desplaza la masa de su posición de equilibrio (Figura 1 (a)), ésta empezará a describir un movimiento de vaivén sobre un plano vertical bien determinado: la pesa empezará a acercarse a su posición de equilibrio (Figura 1 (b)) y al alcanzarla empezará a alejarse nuevamente (Figura 1 (c)) hasta alcanzar una altura igual a la de la que salió desde el extremo opuesto (Figura 1 (d)); a partir de allí el movimiento se repite en dirección contraria (Figura 1 (e y f)). Si suponemos que el movimiento no es influido por ningún factor externo al sistema, este comportamiento se repetirá infinitas veces. De acuerdo a lo expuesto al principio de este capítulo, este movimiento es oscilatorio. El sistema completo se denomina *oscilador armónico simple* y su movimiento se denomina *movimiento armónico simple*.

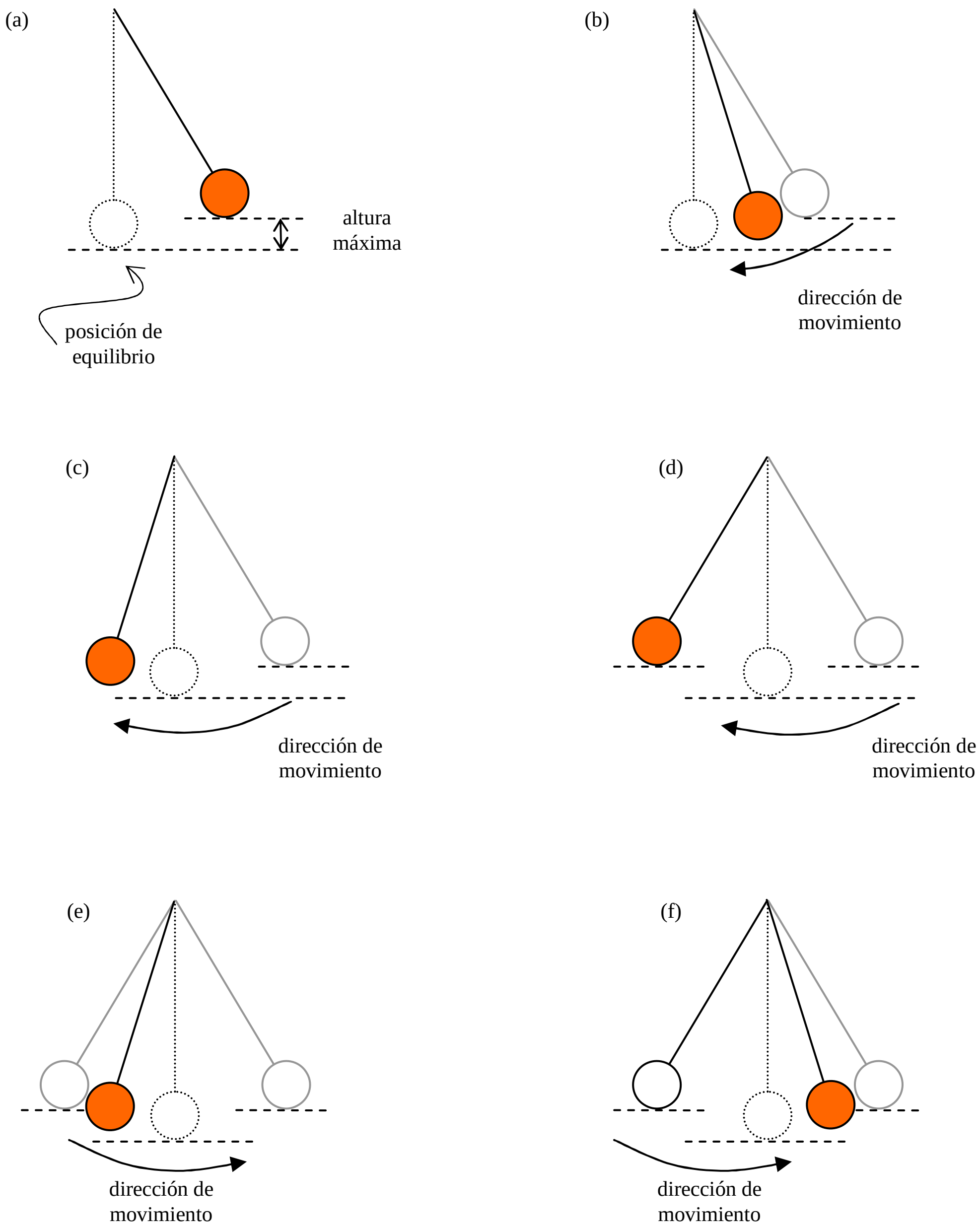



Figura 1: movimiento pendular. Se dibujó en línea de puntos la posición de equilibrio de la pesa.

Al tiempo de duración de un viaje de ida y vuelta del péndulo se denomina ***período***, se lo abrevia con la letra P, y obviamente, se determina en segundos*: [P] = [s].

Imaginemos ahora que en nuestro péndulo la pesa se reemplaza por un cono invertido como el de la Figura 2. El cono es hueco y contiene arena. Para visualizar el movimiento del péndulo, al cono se le ha practicado un pequeño orificio en su vértice, de forma tal que la arena puede caer muy lentamente dejando una ligera marca durante la experiencia. Si debajo del péndulo ubicamos un papel, se podrá observar que, en su vaivén, la arena del péndulo traza una línea recta (ver Figura 2). La longitud de la línea recta trazada por la arena será igual a dos veces a la máxima separación del péndulo desde su posición vertical de equilibrio.

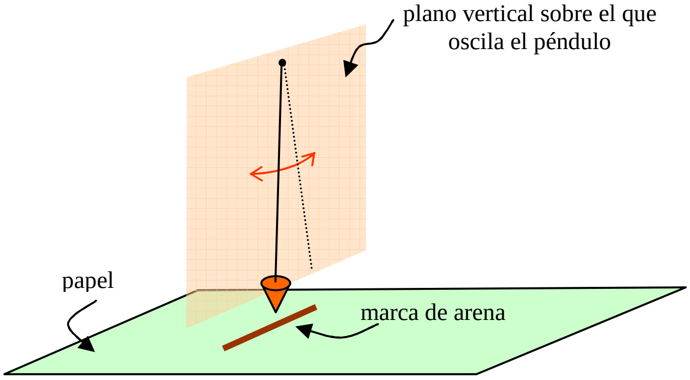



Figura 2: péndulo oscilando sobre un papel quieto

Si ahora el papel se coloca sobre una cinta transportadora que se mueve con rapidez constante, se puede ver que el trazo que deja la arena ya no es una línea recta, sino que se transforma en una curva *sinusoidal* similar a la que se muestra en la Figura 3. Este tipo de curvas sinusoidales nos permiten describir gráficamente el comportamiento de las ondas en general. Observando la marca sinusoidal que dejó la arena sobre el papel podremos estudiar algunas de las características más importantes del movimiento ondulatorio.

* Las unidades de medida de las magnitudes se expresan entre corchetes. Así, para indicar que el período se mide en segundos, escribiremos: [P] = [s].

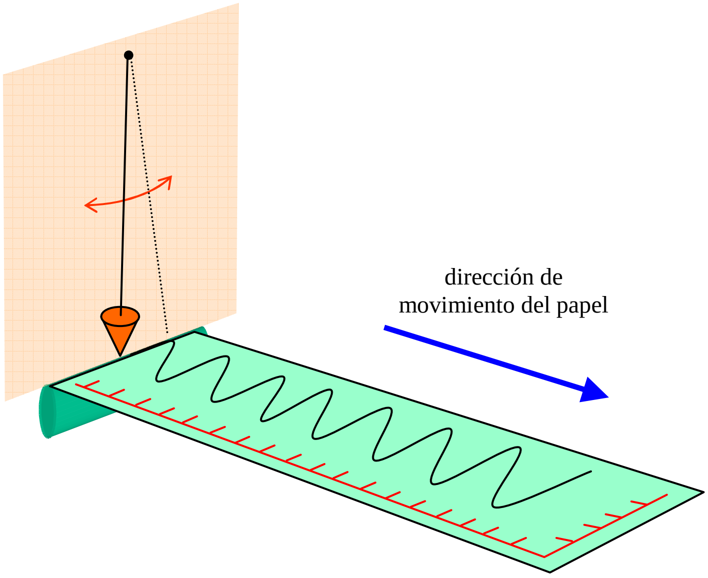



Figura 3: trazo de arena de un péndulo sobre una cinta trasportadora moviéndose con rapidez constante.

Para estudiar el movimiento con mayor precisión, sobre el papel se han realizado dos tipos de marcas (indicadas en rojo en la Figura 3). Las primeras se realizan a lo largo del papel y paralelas a la dirección de movimiento del mismo: indican la distancia que se movió el papel desde que empezó la experiencia o, lo que es lo mismo, miden la cantidad de papel que se desplazó por debajo del péndulo. Las otras marcas, perpendiculares a la dirección de movimiento del papel, permiten determinar la posición instantánea del péndulo con respecto a su posición de equilibrio. En la Figura 4 se observa un trozo del papel obtenido durante la experiencia donde, a modo de ayuda visual, la posición de equilibrio ha sido indica con línea de puntos.

A la distancia que hay, en un instante dado, entre la posición del péndulo y su posición de equilibrio la denominaremos desplazamiento. Al desplazamiento máximo, esto es, a la máxima distancia que el péndulo se separa de su posición de equilibrio, se la denomina ***amplitud** de la onda* y se indica con la letra A, siendo, para este caso en particular, [A] = [m]. Si se supone que ningún factor externo afecta al sistema durante la experiencia, el desplazamiento máximo será el mismo será la misma hacia un lado y hacia el otro de la posición de equilibrio, ver Figura 4.

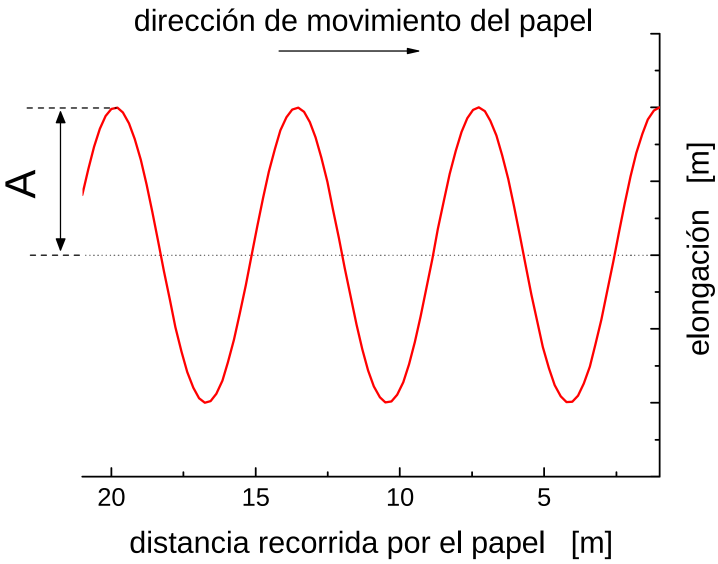



Figura 4: amplitud del movimiento, A. Como ayuda visual, se ha indicado en línea de puntos la posición de equilibrio.

Como se puede comprobar, esta onda puede caracterizarse como una sucesión infinita de crestas y valles de igual amplitud. En la Figura 3 es interesante observar también que la distancia recorrida por el papel es equivalente a la distancia recorrida por la onda. La distancia recorrida por el papel durante una oscilación completa, se denomina ***longitud de onda***. La longitud de onda se indica con la letra griega lambda ($\lambda$) y se mide en metros, $[\lambda] = [m]$. Sólo por una cuestión de comodidad, generalmente se utilizan las crestas o los valles para indicar las longitudes de onda, como ha sido el caso de lo indicado en la Figura 5 pero, a partir de su definición, está claro que podría utilizarse cualquier otra posición del péndulo para indicar la longitud de onda.

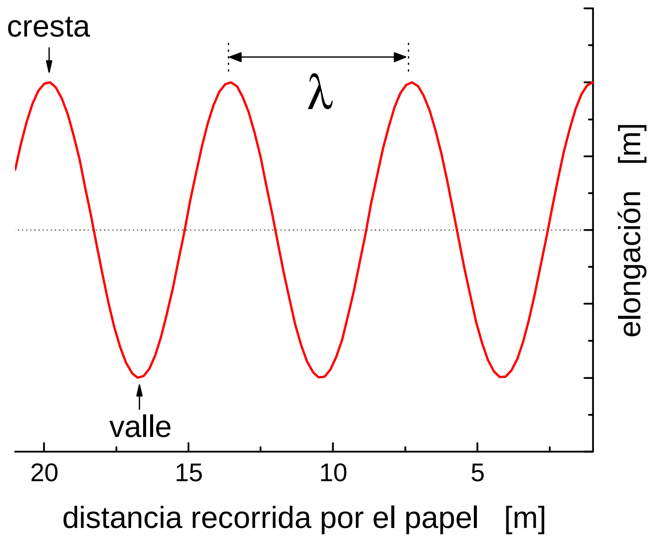



Figura 5: longitud de onda, λ. Se han señalado también una cresta y un valle de la onda. Como ayuda visual, se ha indicado en línea de puntos la posición de equilibrio.

Una oscilación completa se denomina ***ciclo***, con lo cual, de acuerdo a lo expuesto hasta este punto, un ciclo se desarrolla durante un tiempo igual a un período P durante el cual la onda ha recorrido una distancia λ.

Tal como hemos realizado la experiencia del péndulo simple hasta ahora, sería muy sencillo determinar la longitud de onda de nuestro movimiento armónico simple midiendo directamente sobre el papel la distancia entre, por ejemplo, dos valles sucesivos. En general, la longitud de onda λ será igual a la distancia entre dos valles separados n ciclos y dividido n. Sin embargo sería imposible determinar el período sin la ayuda de un reloj. Ante esta necesidad, la experiencia se puede realizar midiendo el desplazamiento del péndulo y el tiempo que tarda la pesa en alcanzar una posición determinada. De esta manera, se obtendría un gráfico similar al presentado en la Figura 6, en la que el período ha sido indicado como el tiempo transcurrido entre dos ondas consecutivas, medido en segundos.

Debemos recalcar que si bien los gráficos en las Figuras 5 y 6 tienen la misma forma (esto es, ambos son curvas sinusoidales) su significado es diferente. En la Figura 5 se representa la forma de la onda en función de la distancia x para un instante determinado; esto es, representa una especie de “instantánea” de la onda. En cambio, la Figura 6 representa la forma en que varía la onda con el tiempo t cuando nos detenemos en un punto fijo del espacio.

La cantidad de ciclos realizados por segundo se denomina frecuencia, y se expresa con la letra F, siendo [F] = $\left[\frac{1}{s}\right] = hertz = [Hz]$ †.

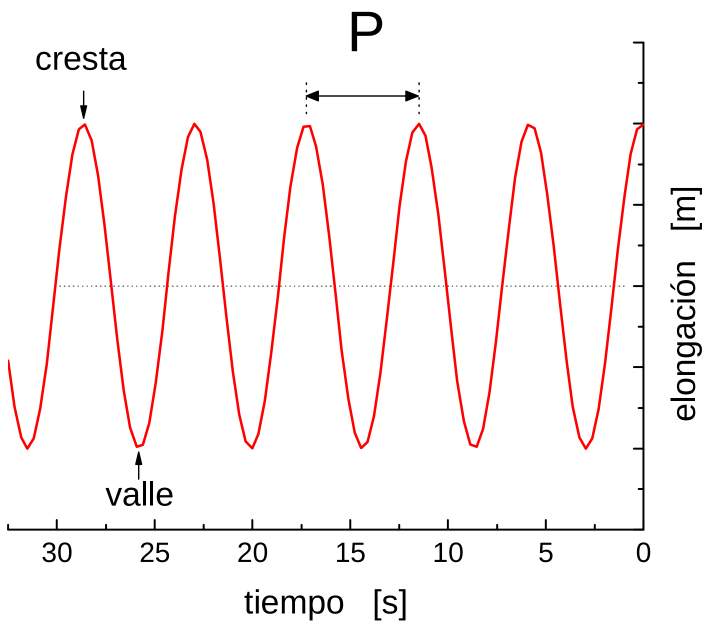



Figura 6: período, P. Se han señalado también una cresta y un valle de la onda. Como ayuda visual, se ha indicado en línea de puntos la posición de equilibrio.

Es interesante remarcar que si se conoce el período de oscilación, se puede calcular su frecuencia y viceversa, ya que la frecuencia y el período son cantidades inversas:

$$\begin{aligned} frecuencia &= \frac{1}{período} \\ F &= \frac{1}{P} \end{aligned} \tag{1}$$

† La unidad de medida de la frecuencia lleva el nombre en honor a Heirich Hertz (1857-1894), cuyas investigaciones proporcionaron la confirmación experimental en 1886 de la existencia de ondas electromagnéticas.

La frecuencia de la onda es la frecuencia de oscilación del péndulo, y ésta es una propiedad general para este tipo de movimientos: ***la frecuencia con que está vibrando la fuente emisora es igual a la frecuencia de la onda obtenida***. Junto con esto es posible observar que, de acuerdo a la definición de período y longitud de onda, es posible calcular la rapidez con que se está moviendo la onda. Teniendo en cuenta que se trata de un movimiento a velocidad constante,

$$rapidez = velocidad = \frac{espacio\ \ recorrido}{tiempo}$$

$$v = \frac{d}{t} \quad \left[\frac{m}{s}\right]$$

Si se toman como referencia dos ciclos sucesivos, la distancia entre ellos corresponde a una longitud de onda λ y el tiempo entre ellos será igual a un período P:

$$v = \frac{\lambda}{P}$$

$$v = \frac{\lambda}{\left(\frac{1}{F}\right)} = \lambda\, F \quad \left[\frac{m}{s}\right] \qquad (2)$$

De lo que resulta que la velocidad de una onda se calcula como el producto entre su longitud de onda y su frecuencia. 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. Como veremos más adelante, una onda de sonido se propaga más rápidamente en medios de mayor densidad. Cualquiera que sea el medio, existe una relación entre la longitud de onda, la rapidez y la frecuencia de la onda.

## *Descripción matemática de las ondas*

Como se indicó anteriormente, el desplazamiento de una partícula que describe un movimiento periódico puede expresarse en términos de funciones trigonométricas senos y cosenos. Antes de abordar la descripción matemática de una onda, se describirán brevemente algunas características de estas funciones trigonométricas prestando especial atención a los efectos observados cuando se producen variaciones en algunos de los diferentes parámetros.

Una de las principales características que ha sido observada en una onda generada durante un movimiento armónico simple es que su forma se repite en el tiempo (Figura 6) y en el espacio (Figura 5). De hecho, se denominó período al intervalo de tiempo que transcurre para que la onda vuelva a presentar su forma original. De esta manera, si se desea realizar un modelo matemático sencillo para representar una onda, se debería utilizar alguna expresión que presente estas características de periodicidad y, como veremos en lo que sigue, las funciones trigonométricas parecen ser las más indicadas. Se trabajará principalmente con la función seno, pero es importante destacar que las características que se describen a continuación son válidas también si se trabaja con coseno.

La función seno, $f(\alpha) = \mathrm{sen}(\alpha)$ se grafica en la Figura 7 (a). Es interesante destacar la repetitividad de la función al incrementar o disminuir el valor de $\alpha$. Aquí $\alpha$ es una variable abstracta, que más adelante identificaremos con el tiempo o la posición (o con ambos). Por ahora nos referiremos a $\alpha$ simplemente como el *argumento* de la función seno. Es posible observar que el gráfico se repite a intervalos de $2\pi$ ($2\pi \approx 2 \times 3.14 = 6.28$). De hecho, se podría haber construido sólo el intervalo entre $[0,2\pi]$ y luego repetirlo a lo largo de todo el eje horizontal; en la figura (a) se ha indicado uno de los intervalos. Se establece así que $\mathrm{sen}\ \alpha = \mathrm{sen}\ (2\pi+\alpha)$, para cualquier $\alpha$. Diremos entonces que la función $f(\alpha) = \mathrm{sen}(\alpha)$ es una función periódica de período $2\pi$.

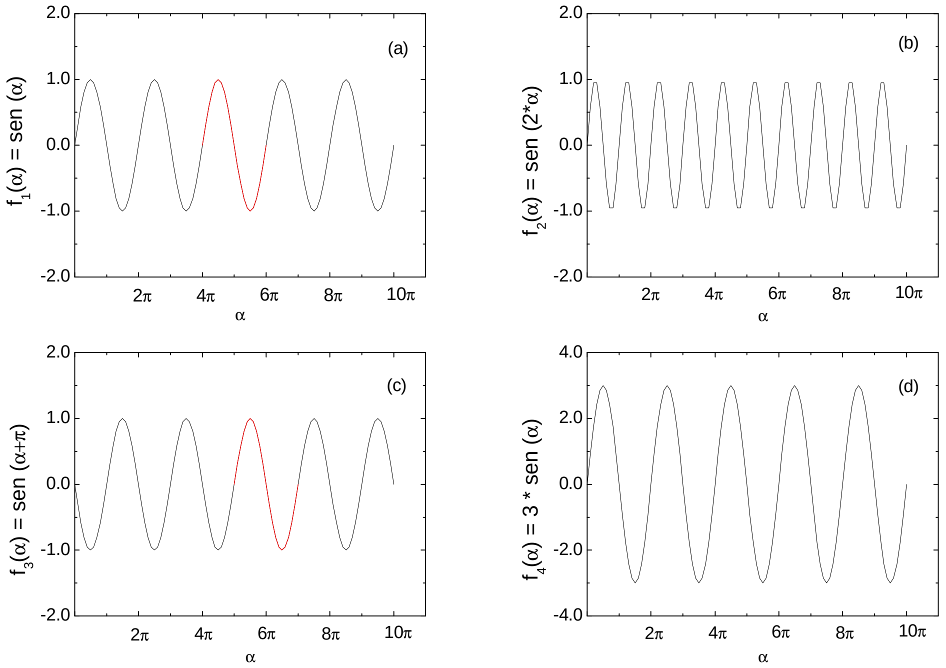



Figura 7: Diferentes funciones sinusoidales.

En la Figura 7 (b) se ha multiplicado por dos al argumento de la función. Se puede observar que, respecto a la función original, la periodicidad de la función se redujo a la mitad. Esto es, en este caso el gráfico se repite a intervalos de $\pi$.

Sin embargo, si al argumento de la función seno se le suma una constante, como es el caso en la Figura 7 (c), el período permanece inalterado pero el gráfico se desplaza hacia la izquierda. El valor de desplazamiento corresponde a la constante que se le ha sumado al argumento. Dicha constante, se denomina *ángulo de fase*, y se la representa con la letra griega minúscula fi, $\phi$. En nuestro caso la onda original (Figura 7 (a)) tiene un ángulo de fase $\phi_1 = 0$ y la de la Figura 7 (c) un ángulo de fase $\phi_3 = \pi$. Cuando una onda está desplazada respecto a otra se dice que están *desfasadas* entre sí con un desfasaje $\Delta\phi = \phi_3 - \phi_1 = \pi$. Por el contrario, cuando $\Delta\phi = 0$ se dice que las ondas están en fase. El ángulo de fase está determinado exclusivamente por la elección del origen y a los efectos de describir el movimiento es irrelevante. Dicho de otra manera, la forma del movimiento es la misma sin importar en qué instante de tiempo comienzo a observarlo. Sin embargo, y como veremos más adelante, aunque el concepto de ángulo de fase no es relevante cuando consideramos una onda armónica individual, juega un rol muy importante cuando se considera la superposición de dos o más ondas.

Finalmente, en la Figura 7 (d) se ha graficado el producto entre la función original y el número 3. A diferencia con los otros casos, se ha modificado la amplitud de la onda; esto indica que en nuestro modelo matemático de una onda, *la amplitud del movimiento oscilatorio está asociada al factor por el que se ha multiplicado a la función seno original*.

En base a lo expuesto, a las ondas generadas a partir de un movimiento armónico simple es posible describirlas mediante una función sinusoide (seno o coseno) del tipo:

$$y(x) = A\,sen\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \phi\right) \tag{3}$$

La forma de la onda es una curva sinusoidal tal como la observada con trazo continuo en la Figura 8, pero se debe notar que esta expresión no permite realizar una descripción temporal. Supongamos que se trata de una onda desplazándose a lo largo de una cuerda. La expresión obtenida brinda información acerca de la forma de la cuerda en ese instante dado, esto es, permite "sacar una instantánea" de la onda en cada instante de tiempo. Nótese que el desplazamiento máximo está dado por la *amplitud A*, y el valor de desplazamiento transversal, y(x), es el mismo en un valor x que en (x+λ), (x+2λ), etc. Sin embargo, si se necesita enfocar la atención en un punto de la cuerda, es decir, en un punto fijo de x, la ecuación debería poder describir la forma en que varía la posición transversal de ese punto de la cuerda con el tiempo.

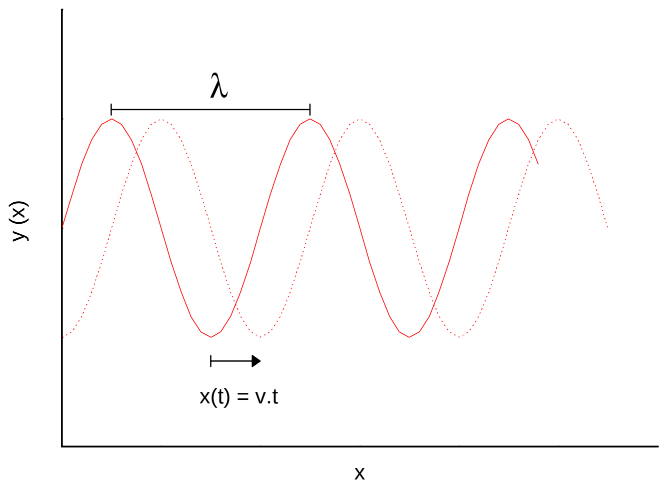



Figura 8

Conforme transcurre el tiempo, la onda viaja hacia la derecha con una velocidad v. La nueva posición de la onda está graficada en la Figura 8 con línea de puntos. Por lo tanto, la ecuación de la onda en el instante t es:

$$y(x,t) = A\ sen\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\lambda}v\,t + \phi\right) \qquad (3)$$

y, de acuerdo a la ec.(2),

$$y(x,t) = A\ sen\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{P}\ t + \phi\right) \qquad (4)$$

Generalmente, para reducir la ec.(4), se definen dos cantidades: el *número de onda k* y la *frecuencia angular* $\omega$. Sus expresiones son:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad (5)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{P} = 2\pi\ F \qquad (6)$$

con lo que resulta:

$$y(x,t) = A\ sen(k\ x - \omega\ t + \phi) \qquad (4)$$

que es la expresión más general para describir una onda armónica.

## *Frentes de onda*

Si se deja caer una piedra en un estanque de agua quieta, se puede observar que las ondas formadas en su superficie forman círculos concéntricos al punto en donde cayó el cuerpo. Observando con detalle cada uno de estos círculos, se puede comprobar que todas las partículas en dicho círculo se encuentran en la misma posición relativa, esto es, todas las partículas se encuentran en fase (concepto sobre el que se trabajará más adelante): todas se encuentran en una cresta de la onda, en un valle o en una posición intermedia. Cada uno de estos círculos definen lo que denominaremos ***frente de onda*** y si la densidad del medio es uniforme, la dirección de propagación de las ondas será perpendicular al frente de onda. De lo expuesto, la distancia radial entre cada círculo concéntrico corresponde a un longitud de onda y, dado que la onda se ha originado en un punto, a este tipo de ondas también se las denomina puntuales. Generalmente, con el objeto de facilitar el estudio de una onda, su dirección de propagación se representa gráficamente por medio de un ***rayo***, que es un vector trazado perpendicularmente al frente de onda. En la Figura 99 se esquematiza el frente de onda del ejemplo, generado sobre la superficie del agua, y un frente de onda plano, como el que se observaría, por ejemplo, en el caso de golpear la superficie del agua del estanque con una varilla lo suficientemente larga. Este último tipo se denomina frente de onda plano. En la figura también se dibujan los rayos que indican la dirección de propagación.

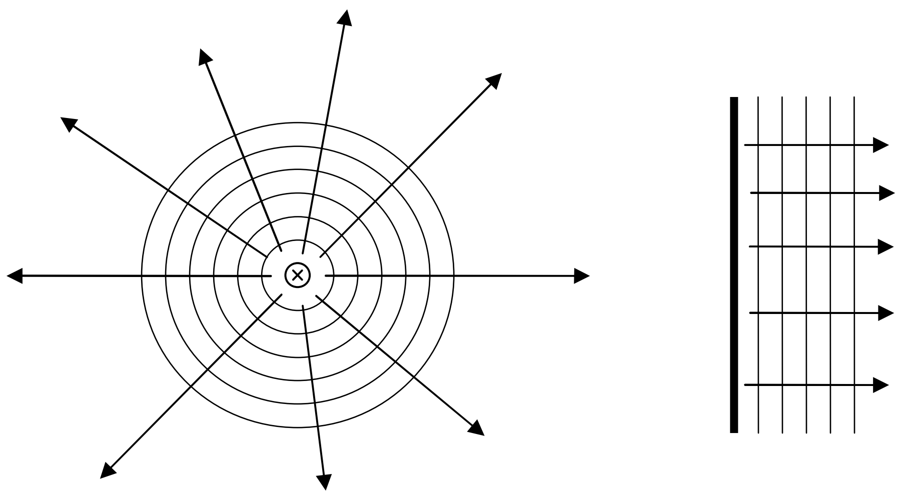


Figura 9: frentes de onda circular (a) y plano (b)

Trabajando con ondas que se desplazan en el espacio tridimensional, una onda plana se observa en el caso en que toda la perturbación se desplace en una única dirección, y se caracteriza porque las condiciones de las partículas del medio son las mismas en todos los puntos de un plano perpendicular a la dirección de propagación (Figura 10). Las ondas originadas en un punto que se propagan en el espacio tridimensional se denominan ondas puntuales y generan frentes de onda esféricos, como se muestra en la Figura 11.

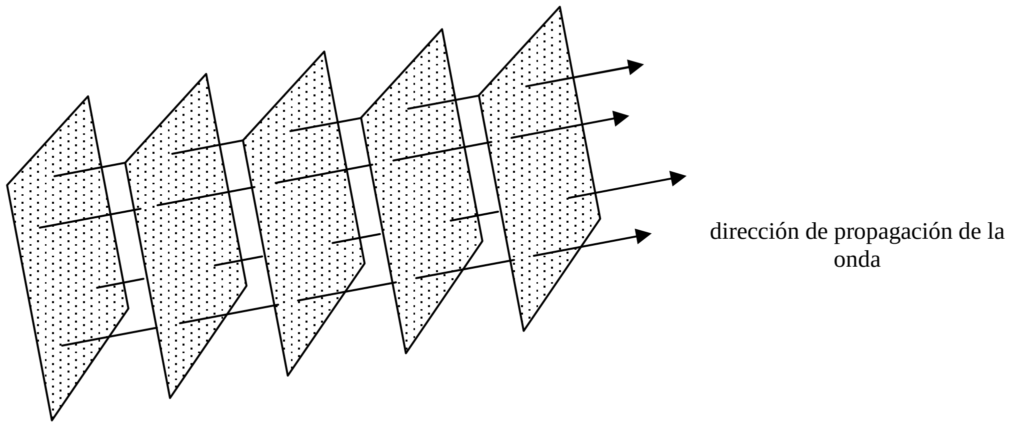



Figura 10: onda plana propagándose en el espacio.

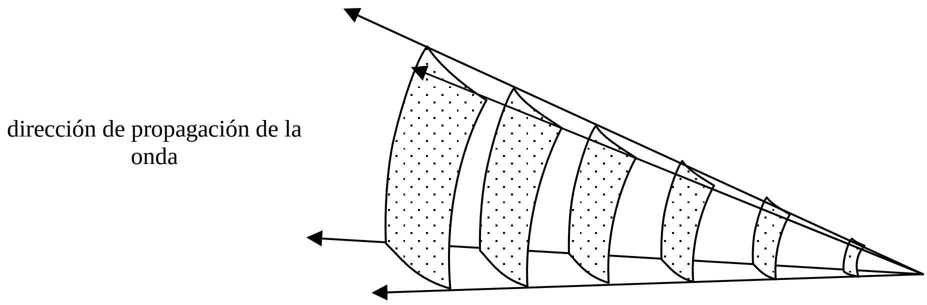



Figura 11: onda esférica propagándose en el espacio.

## *Clasificación de las ondas según su propagación*

Como ya se ha indicado, una onda es la propagación de una vibración a través de un medio determinado, por ejemplo las olas sobre el agua del mar, las oscilaciones que se propagan por una cuerda tensa, etc. Sin embargo, no todos los movimientos ondulatorios se producen de la misma manera.

En aquellos casos en que la dirección de propagación de la onda es perpendicular a la dirección de vibración, las ondas se denominan transversales. Las ondas transversales más comunes de observar son las que se transmiten por una cuerda tensa.

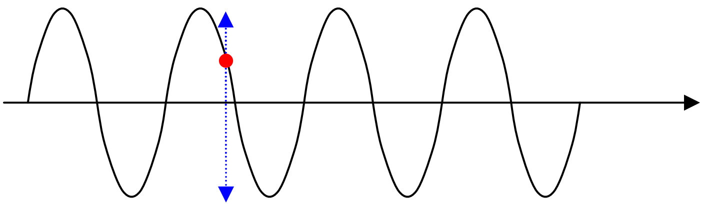



Figura 12: onda transversal

En cambio, cuando la dirección de propagación de la onda coincide con la dirección de la vibración, la onda se denomina longitudinal. Un ejemplo de este tipo de ondas se puede observar en la transmisión del sonido por un medio fluido. Si se coloca la mano delante de la boca al hablar o de un parlante transmitiendo a un volumen alto, se puede percibir las variaciones de presión del aire que golpea sobre la mano, efecto debido a las partículas de aire que vibran en la misma dirección en que transporta el sonido. Sin embargo, el ejemplo más fácil de visualizar es el de las oscilaciones que se transmiten a lo largo de un resorte, como el que se muestra en la siguiente Figura 13.

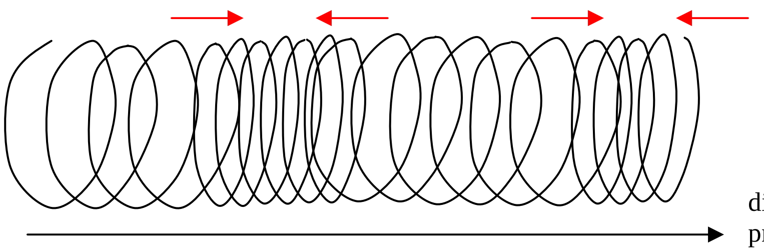



Figura 13: onda longitudinal

Por supuesto, en la naturaleza es muy común ver ejemplos de ondas que se desplazan en forma algo más complicada, por ejemplo las ondas en el agua; el estudio del comportamiento de ondas de este tipo excede los objetivos de este texto. En la Figura 14 se esquematiza un ejemplo de este caso, en donde se ha indicado con línea de puntos la trayectoria que sigue el cuerpo que flota en la superficie.

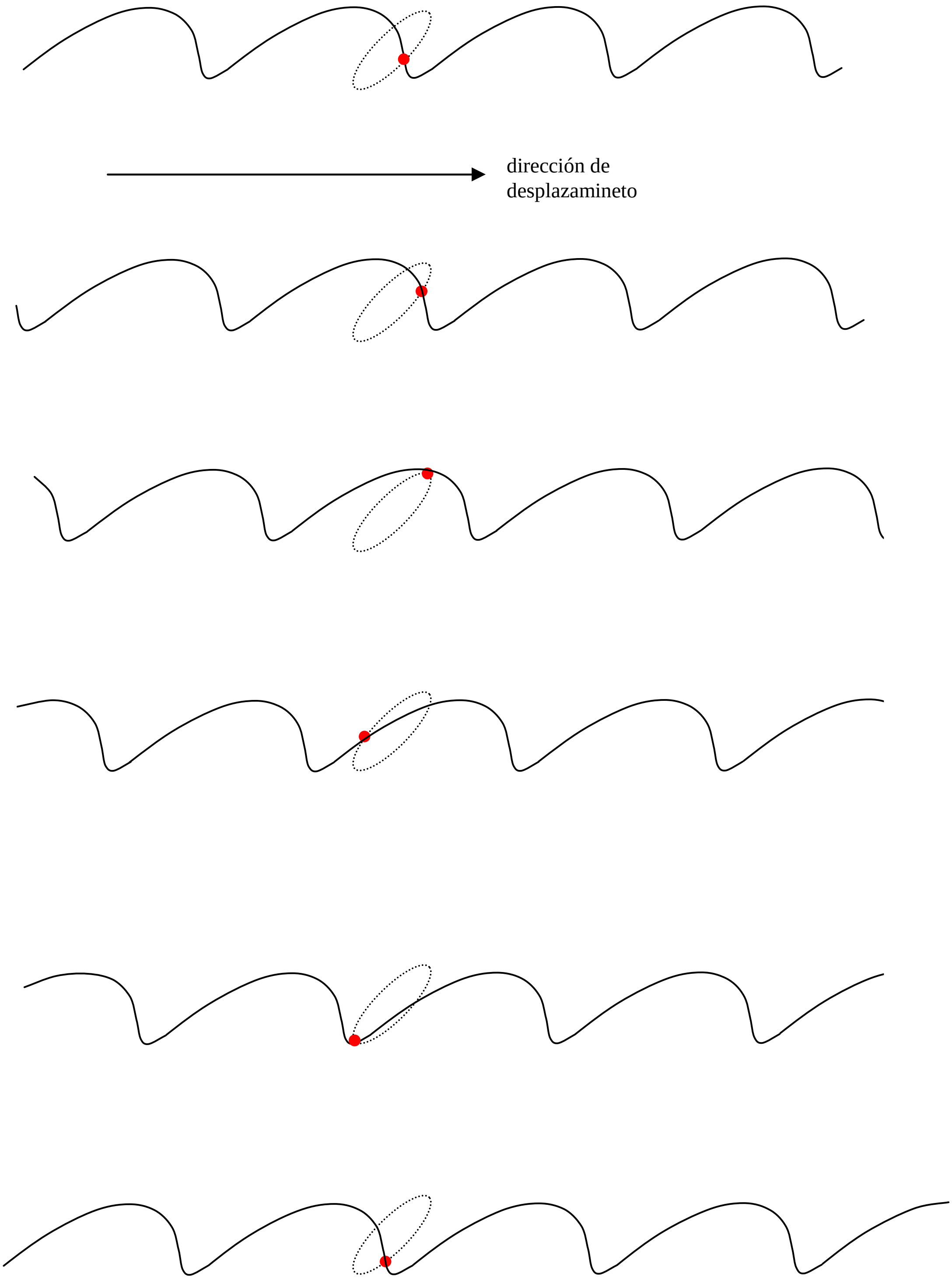



Figura 14: onda superficial desplazándose sobre la superficie del agua

## *Fenómeno de superposición de ondas: Interferencia*

Cuando dos movimientos ondulatorios de naturaleza similar se encuentran en un punto o una región del espacio sus ondas se superponen, el resultado es una nueva onda cuya perturbación es la suma de las perturbaciones de las dos ondas originales. Por ejemplo, este fenómeno se puede observar cuando una emisora de radio seleccionada correctamente se oye mal por culpa de la interferencia con otra emisora. Se denomina *interferencia* al resultado de la superposición de dos o más ondas armónicas.

Éste es un fenómeno particular de las ondas; cuando dos partículas se encuentran generalmente colisionan y se desvían mutuamente, sin embargo las ondas pueden cruzarse, interferir una con otra, y luego continuar propagándose como si nada hubiera ocurrido. Uno de los casos más sencillos para estudiar y observar directamente el fenómeno de interferencia puede ser aquél en que hacemos interferir ondas sobre una cuerda suficientemente tensa. También se puede observar directamente arrojando dos piedras al agua en un estanque tranquilo: las ondas que se producen pueden superponerse y forman lo que se denomina un *patrón de interferencia*. En este patrón de interferencia se pueden observar varios efectos a la vez: en algunos puntos las amplitudes de las ondas aumentan y en otros puntos se reducen o directamente se neutralizan. El fenómeno de interferencia en algunos casos debe ser necesariamente controlado, por ejemplo, cuando se prepara una sala para un concierto se debe tener en cuenta la interferencia entre ondas de sonido para que en todas las zonas de la sala los sonidos emitidos desde el escenario puedan oírse correctamente.

Si se produce superposición de ondas sinusoidales de igual frecuencia aunque de distinta amplitud y fase se obtiene otra onda sinusoidal de frecuencia idéntica, pero de amplitud y fase determinada por la amplitud y fase de sus componentes. En la Figura 15 se presentan un ejemplo de la superposición de dos ondas (1 y 2, respectivamente) de igual frecuencia, $F_1 = F_2$, y desfasadas en $\pi/2$. Claramente se puede observar que la amplitud de la onda resultante es la suma algebraica de las amplitudes $A_1$ y $A_2$ de las ondas superpuestas.

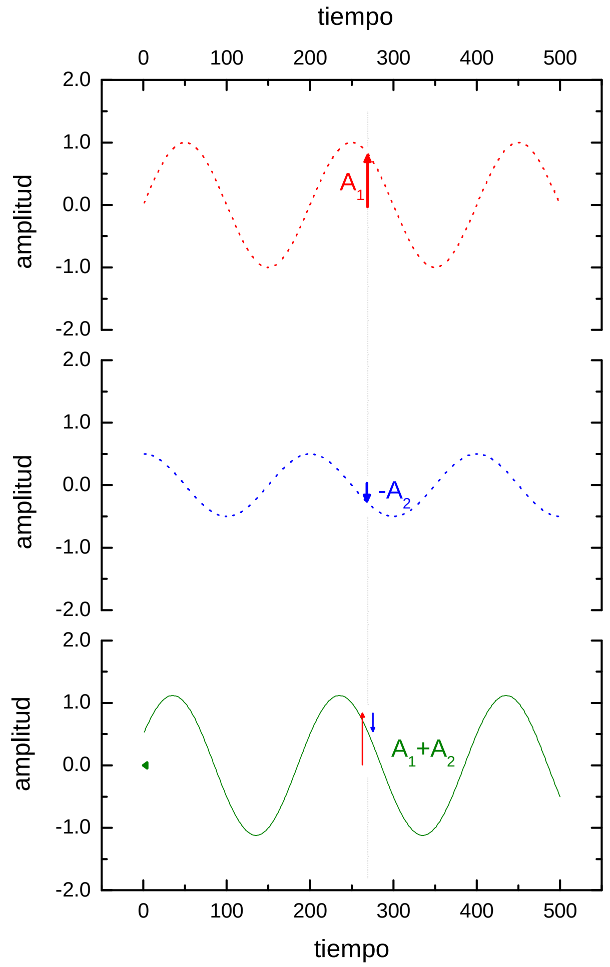



Figura 15: superposición de dos ondas sinusoidales de igual frecuencia, amplitudes $A_1$ y $A_2$ distintas y desfasadas entre sí en $\phi_2$ - $\phi_1$ = $\pi/2$

Se denomina interferencia constructiva cuando la amplitud de la onda resultante es mayor que la amplitud de las ondas que interfieren y se denomina interferencia destructiva cuando la amplitud de la resultante disminuye y se anula. En la Figura 16 se presentan ejemplos de este tipo de interferencias acerca de la cual es importante destacar que para que una interferencia sea totalmente destructiva las frecuencias, fases y amplitudes de las ondas intervinientes deben ser necesariamente idénticas.

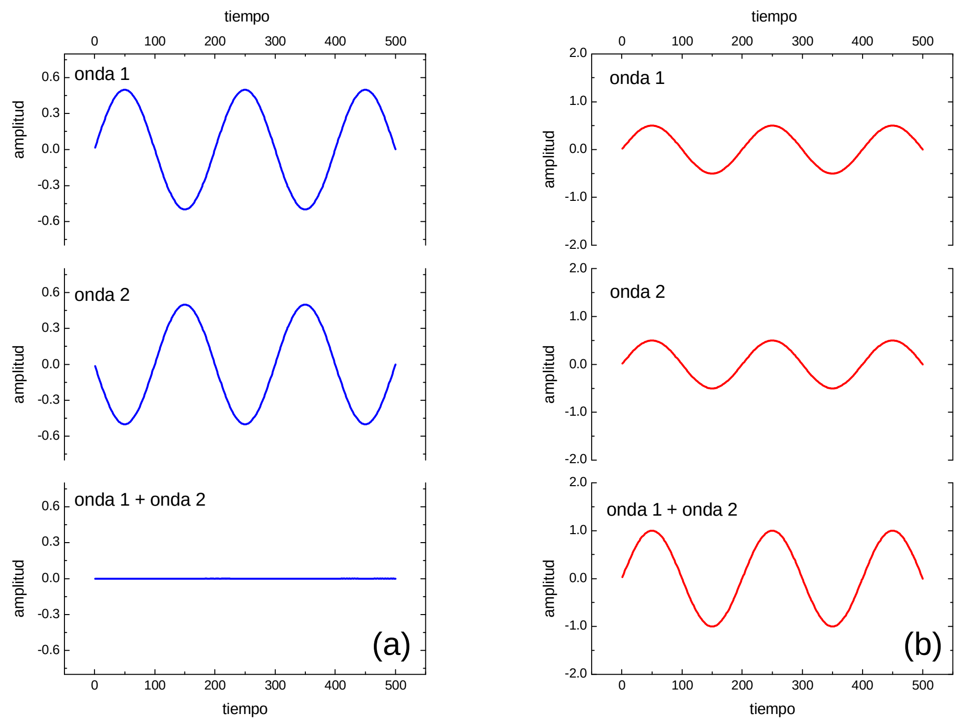



Figura 16: tipos de interferencia: (a) destructiva y (b) constructiva

Sin embargo, generalmente en la naturaleza se encuentran mayoritariamente casos de interferencia en que se observan ambos casos a la vez. En especial, existe el caso particular de interferencia conocido como *batido* que se produce cuando dos trenes de ondas de igual amplitud pero frecuencias ligeramente diferentes coinciden en el espacio. Esto da lugar a una vibración cuya amplitud varía con el tiempo. Para el caso de las ondas sonoras, estas variaciones de amplitud se percibirán como variaciones de intensidad sonora periódicas, que se denominan *pulsaciones*. Este efecto se ha utilizado durante mucho tiempo, por ejemplo, para la afinación de instrumentos musicales: se pone a vibrar un objeto (diapasón) a la misma frecuencia que la nota musical que se desea encontrar y si el instrumento está "desafinado" se escucharán pulsaciones mientras que, cuando se logra la afinación deseada se puede escuchar un sonido de intensidad sonora algo mayor.

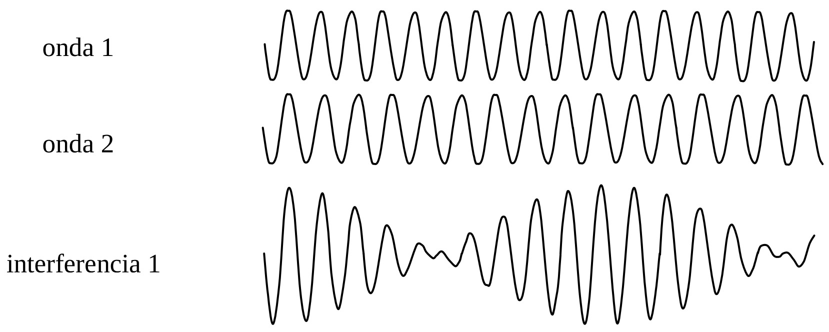



Figura 17: un caso particular de interferencia: batido

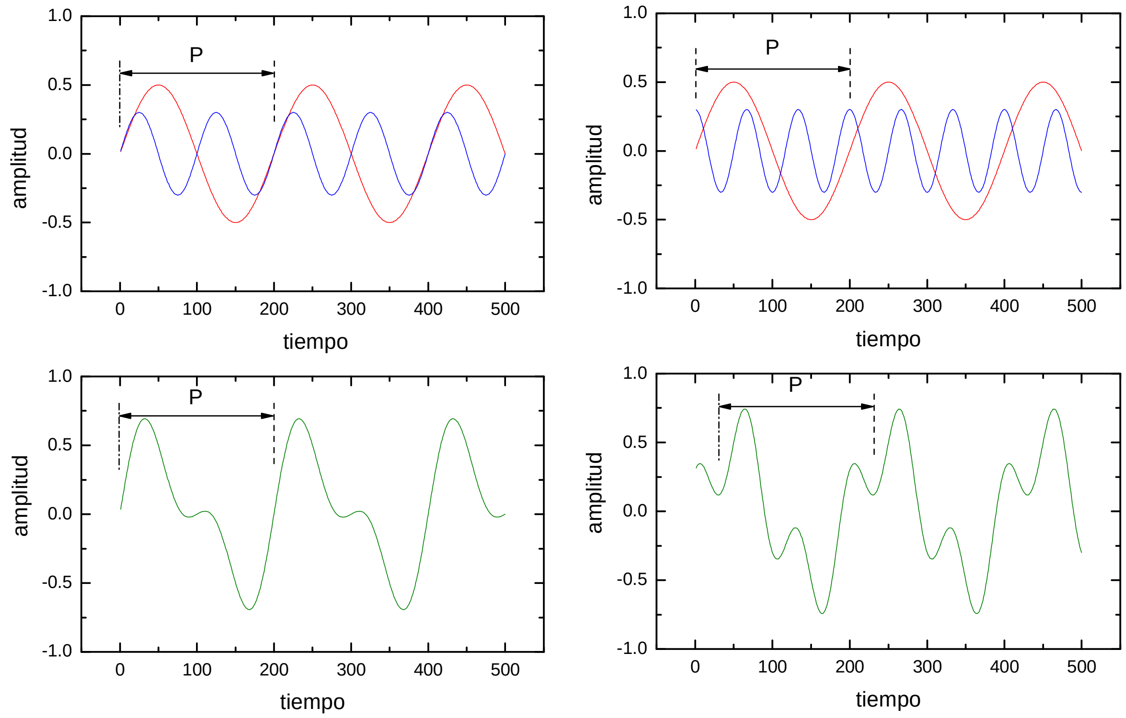
## *Superposición de armónicos*

Un caso importante de superposición es cuando la frecuencia de los componentes se relaciona de forma armónica. Se denominan armónicos de una dada frecuencia fundamental (que denominaremos $F_0$) a ondas cuya frecuencias $F_k$ son múltiplos enteros de $F_0$, esto es

$$F_k = k \cdot F_0 \qquad \text{con } k = 1, 2, 3, \ldots$$

De esta manera, dos ondas se relacionan de forma armónica si sus frecuencia son múltiplos enteros de una frecuencia fundamental. La onda con frecuencia $F_1$ se denomina primer armónico, la de frecuencia $F_2$, segundo armónico, y así sucesivamente.

Si se superponen los componentes armónicos de una onda, la resultante es una onda periódica, y su período P será igual al período de la onda con la frecuencia fundamental $F_0$, esto es, $P = 1/F_0$. De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la forma de la onda resultante estará determinada por la amplitud y la fase inicial de cada componente; de esta manera, la superposición de iguales componentes armónicos pero con diferentes amplitudes y fases se obtienen formas de onda muy distintas entre sí. En la Figura 18 se presentan dos ejemplos en los cuales se pueden observar la superposición de ondas de igual fase, caso (a), y desfasadas en 90º, caso (b). En cada caso ha sido indicado el período P del armónico fundamental y de la onda resultante, pudiéndose comprobar que coinciden plenamente entre sí.




(a) (b)

Figura 18: Superposición de ondas armónicas (1) y (2). (a) primer y segundo armónicos, rojo y azul respectivamente, con $\phi_1 = \phi_2$. (b) primer y tercer armónicos, rojo y azul respectivamente, $\phi_1 = 0$ y $\phi_2 = \pi/2$. En ambos casos $A_1 = 0.5$ y $A_2 = 0.3$.

## *Ondas Estacionarias*

Las ondas estacionarias representan un caso particular de la interferencia que se produce cuando dos ondas de amplitud, longitud de onda y velocidad idénticas avanzan en sentido opuesto a través del mismo medio. En la Figura 19 se ha ilustrado este ejemplo: el medio por el cual se propagan las dos ondas simultáneamente se dibuja en color verde y a modo de ayuda visual se han dibujado por separado las dos ondas que interfieren entre sí, desplazándose en sentidos opuestos. La numeración indica diferentes instantes de tiempo. El desplazamiento resultante en cualquier punto y momento es igual a la suma de los desplazamientos correspondientes a las ondas 1 y 2. Puede observarse que existen puntos en que la interferencia de la onda 1 y la onda 2 es totalmente destructiva y no existe movimiento. Esto puntos se denominan nodos y tienen la particularidad de no desplazarse a través de medio transmisor durante el tiempo que dura la interferencia.

Entre dos nodos, la amplitud de la onda resultante es variable y sólo cuando las dos ondas están en fase, es decir, las crestas coinciden con crestas y los valles con valles, la amplitud de la onda resultante es dos veces mayor que la de la onda incidente.
De esta manera, por tanto, el medio por el que se propagan las ondas queda dividido por los nodos en secciones que tienen una longitud igual a una longitud de onda.

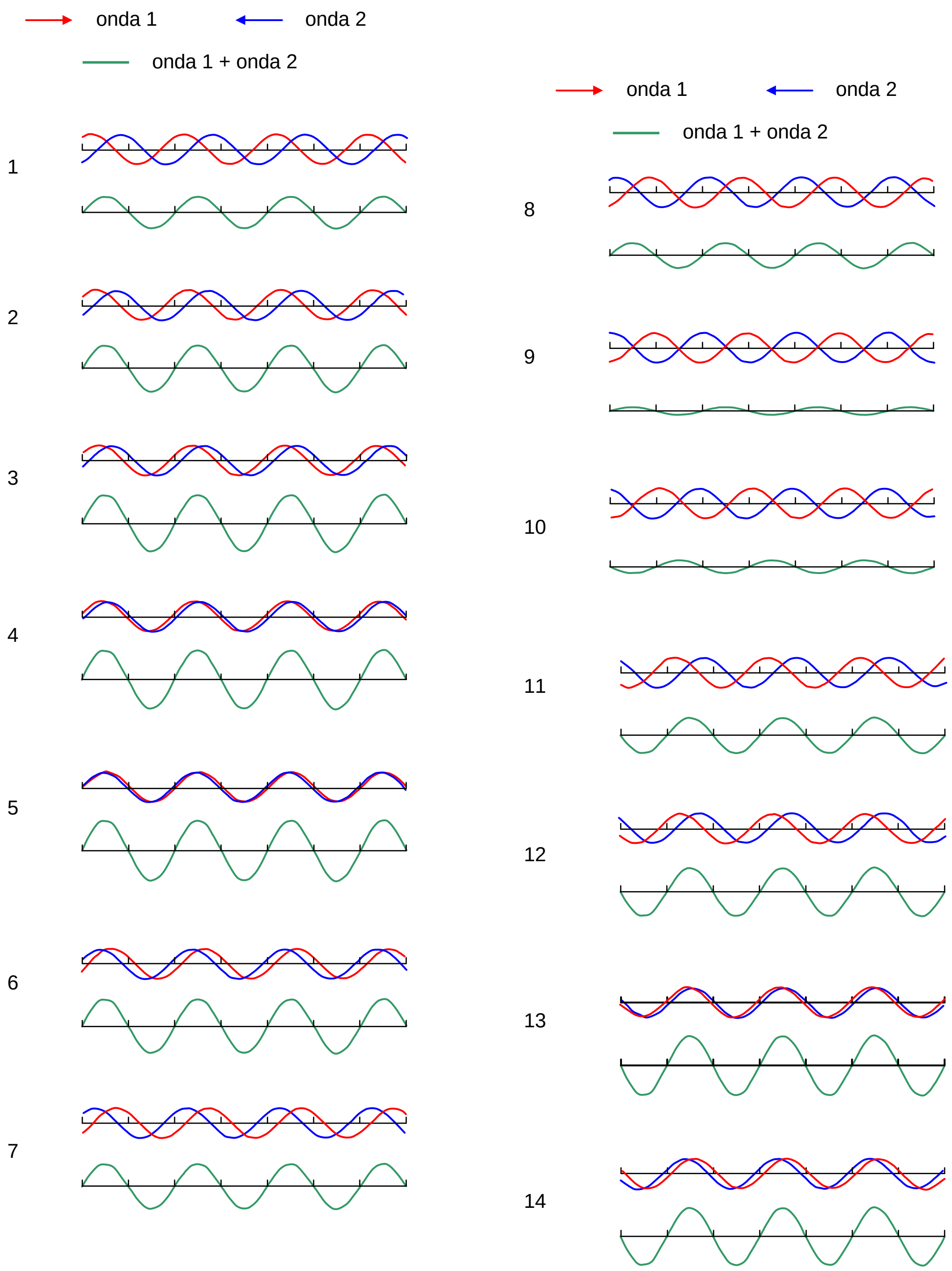



Figura 19: ondas estacionarias en una cuerda.

## *Reflexión y refracción de ondas*

Cuando una onda incide sobre la superficie de separación entre dos medios diferentes, una parte de su **energía** se transmite al segundo medio en forma de una **onda transmitida** de características similares a la incidente, mientras que otra parte de la energía incidente se refleja en dicha superficie y se propaga hacia atrás, hacia el medio del cual provino, para constituir una **onda reflejada**. Este fenómeno de reflexión y transmisión de perturbaciones oscilatorias es común tanto a las ondas mecánicas como a ondas electromagnéticas.

La reflexión se produce cuando la onda, que se propaga por un medio (1), incide sobre la superficie de separación con un medio diferente (2), como resultado de lo cual invierte su dirección y continúa viajando por el medio del cual proviene. Los rayos dibujados en la Figura 20 indican la dirección de propagación de las ondas incidente y reflejada. Se ha indicado también la recta normal (perpendicular) a la superficie de reflexión y los ángulos que forman la normal con el rayo incidente ( $\hat{i}$ ) y con el rayo reflejado ( $\hat{r}$ ).

Más adelante estudiaremos con detalle este fenómeno, especialmente aplicado a ondas de sonido y ondas de luz. Sin embargo, en este punto valen destacar dos propiedades importantes que se observan en la reflexión de ondas:

1) la normal, el rayo incidente y el rayo reflejado están en un mismo plano; este plano se ha indicado en la Figura 20.

2) el ángulo de incidencia, $\hat{i}$ ,es igual al ángulo de reflexión, $\hat{r}$ .

Cuando una onda incide sobre la superficie que separa dos medios (1) y (2) diferentes (por ejemplo aire y agua), en los cuales la onda tiene distintas velocidades de propagación, parte de la onda incidente se refleja hacia el medio (1) y otra parte pasa al medio (2). Este último proceso se denomina refracción. La onda refractada sufre algunos cambios, como consecuencia, principalmente, del cambio de la velocidad de propagación:

1) su dirección de propagación cambia, como se muestra con detalle en la Figura 20

2) si bien la frecuencia resulta inalterada, en virtud de la ecuación (2), la longitud de onda cambia. La velocidad de la onda en el medio (1) es $v_1 = F\ \lambda_1$ siendo F la frecuencia de la onda y $\lambda_1$ la longitud de onda en el medio (1). Luego de la refracción la nueva longitud de onda será $\lambda_2 = \frac{v_2}{F}$ , donde $v_2$ es la velocidad de la onda en el medio 2.

Luego de la reflexión la onda continúa propagándose por el medio (1) y los parámetros tales como su longitud de onda, frecuencia, velocidad, permanecen inalterados. Con el fin de facilitar su estudio, una onda se representa gráficamente por medio de rayos, que son líneas que trazadas perpendicularmente al frente de onda y que en se representan por flechas gruesas.

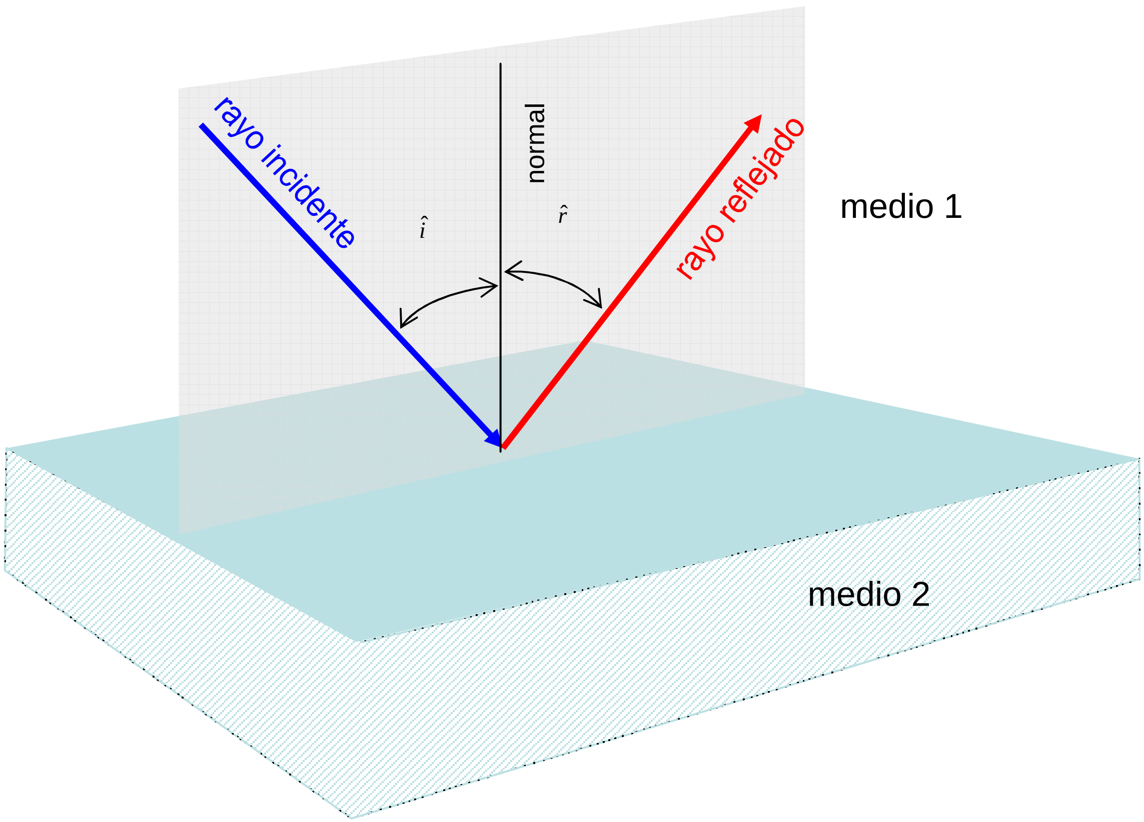



Figura 20: reflexión de una onda

Efecto Doppler

Imagina un insecto que agita las patas mientras flota en medio de un charco tranquilo. Supón que el insecto no avanza, sino que sólo remueve el agua en una posición fija. Las crestas de las ondas que el insecto produce son círculos concéntricos porque la rapidez de las ondas es igual en todas direcciones. Si el insecto sube y baja en el agua con una frecuencia constante, la distancia entre dos crestas sucesivas (la longitud de onda) es la misma para todas las ondas.

Supón ahora que el insecto se desplaza en el agua con una rapidez menor que la rapidez de la onda. El insecto persigue en efecto una parte de las crestas que produce. El patrón ondulatorio se deforma y deja de ser concéntrico. El centro de la cresta exterior se formó cuando el insecto estaba en el centro de ese círculo. El centro de la cresta inmediata posterior se formó cuando el insecto estaba en el centro de ese círculo, y así sucesivamente. Los centros de las crestas circulares se desplazan en la misma dirección que el insecto. Aunque el insecto mantiene la misma frecuencia inicial de oscilación, un observador situado en el punto B percibirá las crestas más a menudo. El observador detectaría una frecuencia mayor. Esto se debe a que las crestas sucesivas deben recorre una distancia cada vez menor y, por tanto, llegan a B con mayor frecuencia que si el insecto no avanzase hacia B.

Ahora bien, un observador situado en el punto A percibe una frecuencia menor porque las crestas se suceden a intervalos de tiempo mayores. Debido al movimiento del insecto, cada cresta tiene que recorrer una distancia mayor que la anterior para llegar a A. Este cambio de frecuencia debido al movimiento de la fuente (o del receptor) se conoce como **efecto Doppler**. Cuanto mayor es la rapidez de la fuente, más grande es el efecto Doppler.

El efecto Doppler se hace patente cuando un auto pasa junto a ti haciendo sonar la bocina. Cuando el auto se aproxima, el tono es más alto que lo normal (esto es, más alto en la escala musical). Esto se debe a que las crestas de las ondas sonoras llegan a ti con mayor frecuencia. Cuando el auto pasa y se aleja, el sonido se hace más grave porque las crestas de las ondas llegan a ti con menor frecuencia.

La luz también está sujeta al efecto Doppler. Cuando una fuente de luz se aproxima aumenta la frecuencia medida, y cuando la fuente se aleja disminuye su frecuencia. El aumento de frecuencia se conoce como **desplazamiento hacia el azul**, porque el incremento se produce hacia el extremo de altas frecuencias, o azul, del espectro de la luz visible. Una disminución de la frecuencia se describe como un **desplazamiento hacia el rojo**, en referencia al extremo de bajas frecuencias, o rojo, del espectro

Ondas de proa

Cuando la rapidez de la fuente en un medio es igual a la rapidez de las ondas que produce, las ondas se apilan.

En los primeros días de los aviones a reacción se pensaba que este apilamiento de las ondas sonoras frente a la aeronave presentaba una “barrera de sonido”, y que para avanzar a una rapidez mayor que la del sonido el avión tenía que romper esa barrera. Lo que sucede en realidad es que las crestas de onda que se superponen trastornan el flujo del aire sobre las alas, de tal manera que es difícil controlar la aeronave cuando ésta vuela a una rapidez cercana a la del sonido. Pero la barrera no es real.

Un avión con la potencia suficiente puede viajar sin dificultad con una rapidez mayor que la del sonido (rompe la barrera del sonido). Decimos entonces que el avión es supersónico, eso es, más rápido que el sonido. Un avión supersónico vuela tranquilo y sin perturbaciones porque las ondas sonoras no se propagan frente a él. De forma análoga, un insecto que nadase con una rapidez mayor que la de las ondas que genera, se encontraría siempre entrando en aguas cuya superficie está lisa

Cuando el avión viaja a mayor velocidad que el sonido, se adelanta a las ondas que genera. Los bordes de las crestas se superponen y forman un patrón en forma de V, llamado **onda de proa**.

Ondas de choque

Un bote rápido de motor que hiende las aguas genera una onda de proa en dos dimensiones. Análogamente, un avión supersónico genera una onda de choque en tres dimensiones. Así como se produce una onda de proa cuando los círculos que se superponen forman una V, se genera una **onda de choque** cuando las ondas esféricas se superponen y forman un cono. Y de igual manera que la onda de proa de un bote rápido se propaga hasta llegar a la orilla del lago, la onda de choque cónica que genera un avión supersónico se propaga hasta llegar al suelo.

Cuando la capa cónica de aire comprimido que deja tras de sí un avión supersónico llega a un observador en tierra, éste escucha un violento chasquido que se conoce como **estruendo sónico**.

Un avión subsónico no produce un estruendo sónico porque las crestas de las ondas sonoras llegan a nuestros oídos una por una y las percibimos como un sonido continuo. No es necesario que la fuente en movimiento emita sonido para que produzca una onda de choque. Una vez que un objeto se mueve con más rapidez que el sonido, produce sonido. Una bala supersónica que pasa volando produce un chasquido que es un pequeño estruendo sónico. Cuando un domador de leones hace chasquear su látigo, el chasquido es en realidad un estruendo sónico generado por la punta del látigo al moverse más aprisa que el sonido. Si haces chasquear una toalla, su extremo puede sobrepasar la rapidez del sonido y producir un miniestruendo sónico. La bala, el látigo y la toalla no son en sí fuentes de sonido, pero cuando se mueven con rapidez supersónica producen su propio sonido porque se generan ondas de aire (las ondas de choque) hacia los costados del objeto en movimiento.

Bibliografía consultada


- Física conceptual, P. Hewitt
- CNICE. Ministerio de Educación y Ciencia de España, **Coordinador del Proyecto Newton:** Carlos Palacios Gómez, **Coordinación desde el CNICE:** Agustín Muñoz Núñez. http://newton.cnice.mecd.es/
- Apuntes de acústica musical, Leonardo Fiorelli, Luis Jure, Martín Rocamora. eMe - estudio de Música electroacústica (Abril de 2006) Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Artes, Escuela Universitaria de Música

- Física Preuniversitaria (Tomo I y II); Paul A. Tipler. Editorial Reverté S.A..
- Física en perspectiva; Eugene Hecht. Addison – Wesley Iberoamérica.
- Física (Tomo I y II); Paul A. Tipler. Editorial Reverté S.A..