04.2-MOVIMIENTO ONDULATORIO

Las olas combinan propiedades de las ondas transversales y longitudinales. Con el equilibrio y el ritmo adecuados, un surfista puede capturar una ola y dar un paseo en ella.

INTRODUCCIÓN

Fenómenos *ondulatorios:* olas en el agua, sonidos musicales, temblores sísmicos de un terremoto, ondas en una cuerda o un resorte.
Ondas: perturbación del estado de equilibrio de un sistema, la cual se *propaga* de una región del sistema a otra transportando energía.

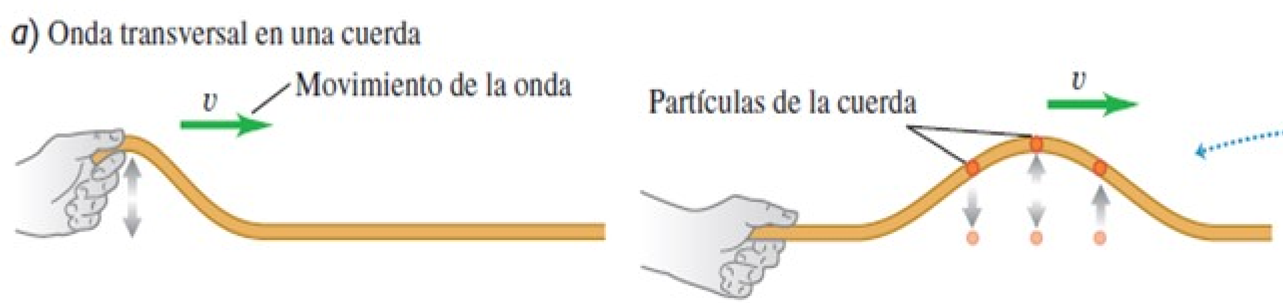
Ondas mecánicas: las que viajan por un medio material.

Ondas *electromagnéticas* (luz, ondas de radio, radiaciones infrarroja y ultravioleta, rayos X) se pueden propagar incluso en el espacio vacío, donde *no* hay un medio material.

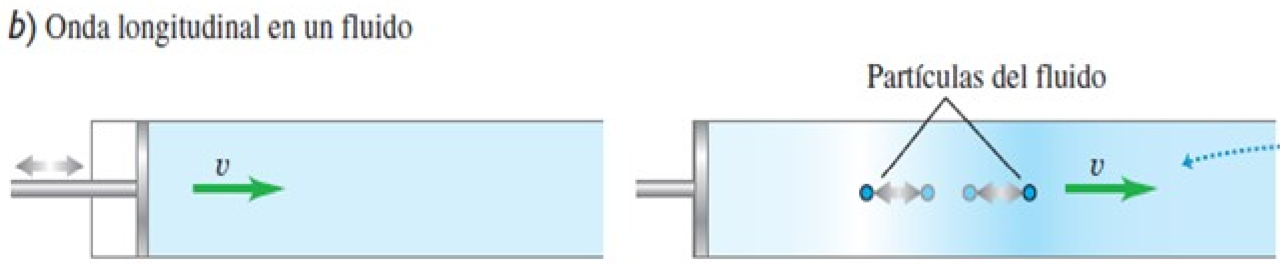
Veremos ecuaciones básicas que describen las ondas, en especial las **ondas *sinusoidales*** donde el patrón de la onda es una función repetitiva seno o coseno.
Ejemplo más sencillo: ondas periódicas que viajan por una cuerda estirada.
Para el caso de una **onda plana unidimensional**, como en el de una cuerda tensa, su ecuación característica es:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\delta x^2}$$

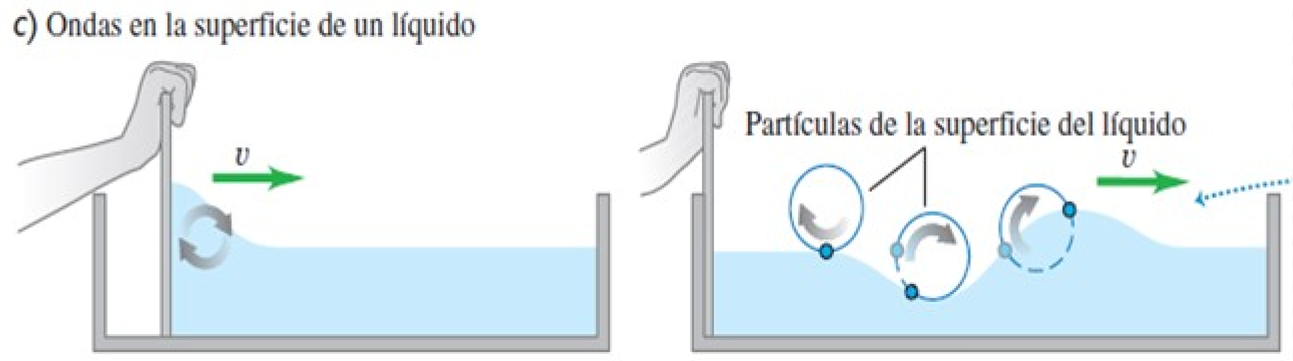
TIPOS DE ONDAS MECÁNICAS



Medio: cuerda tensa. Los desplazamientos del medio son perpendiculares o *transversales a* la dirección en que la onda viaja por el medio, e trata de una **onda transversal**.

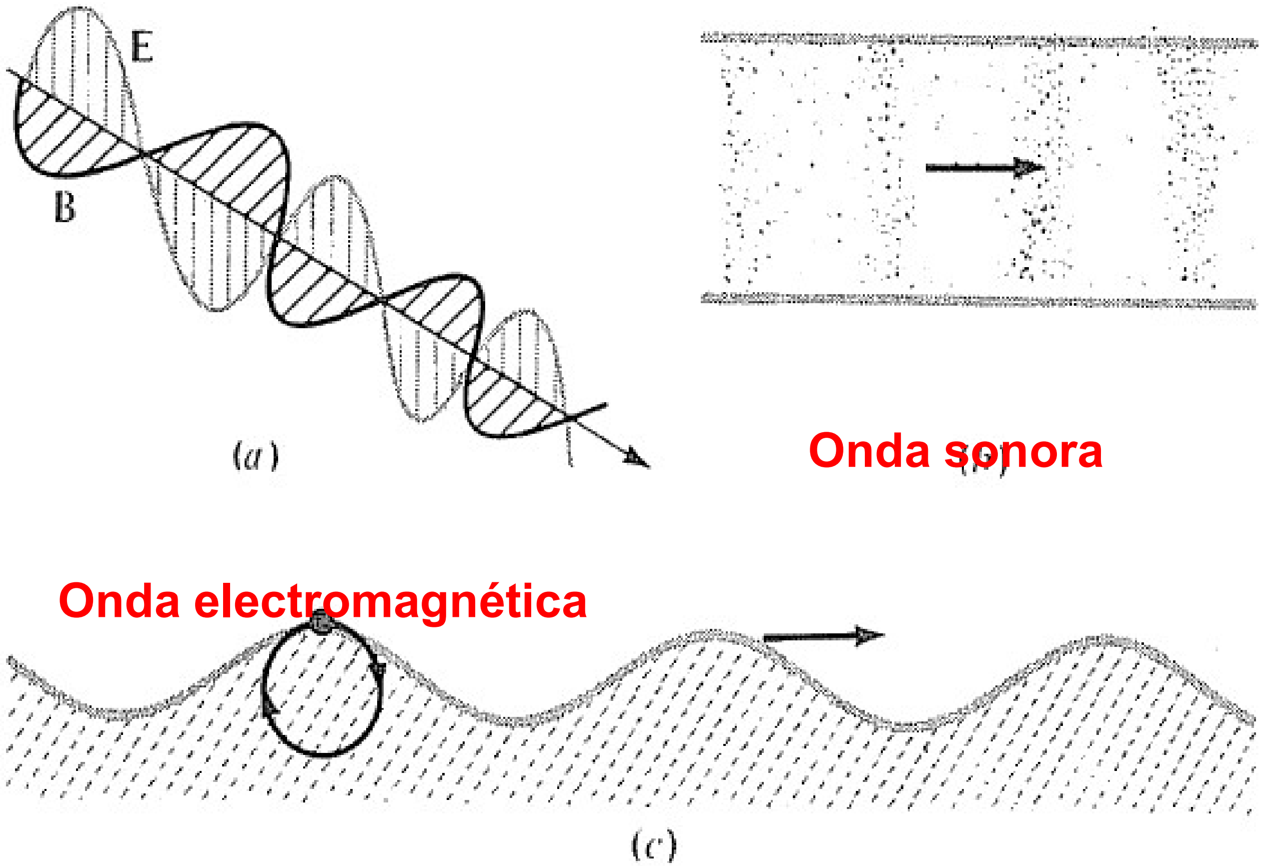


***Medio: líquido o gas en un tubo con pared rígida* en un extremo derecho y un pistón en el otro**. Los movimientos de las partículas del medio son hacia adelante y hacia atrás en la *misma dirección en que viaja la onda,* se trata de una **onda longitudinal**.



Medio: líquido en un canal**, agua en una zanja.* Desplazamientos del agua tienen componentes ***tanto longitudinales como transversales.

TIPOS DE ONDAS



Onda sonora

Onda electromagnética

Onda en el agua (ola)

TIPOS DE ONDAS

Onda mecánica: perturbación que viaja a través de un material o una sustancia (medio de la onda).

1) Se ***propaga por el medio con una rapidez definida llamada*** *rapidez* de propagación o, **velocidad de propagación de la onda o de fase (v),** su valor se determina por las propiedades mecánicas del medio.

Atención: Esta a velocidad de la onda *no es la velocidad con que se mueven las* partículas cuando son perturbadas por la onda.

2) El medio mismo no viaja en el espacio; sus partículas individuales realizan movimientos hacia atrás y hacia adelante, o hacia arriba y hacia abajo, respecto de sus posiciones de equilibrio.
Lo que viaja es el patrón completo de la perturbación ondulatoria.

3) Las ondas transportan energía (y cantidad de movimiento o ímpetu), pero no materia, de una región a otra.

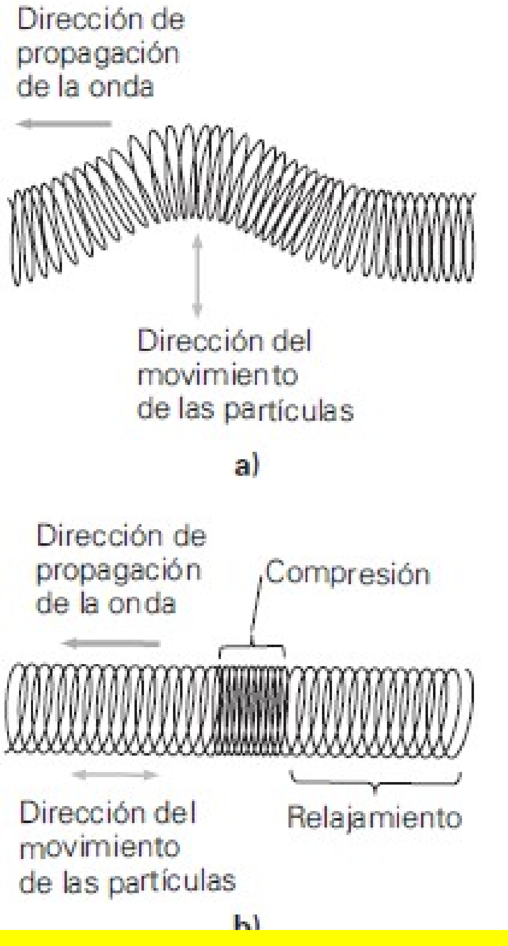
Para generar ondas se debe aportar energía (trabajo) sobre el sistema. El movimiento de la onda transporta esta energía de una región del medio a otra.

Tipos de ondas mecánicas

Cada uno de los sistemas anteriores tiene un **estado de equilibrio.**

En la cuerda: el sistema está en reposo con la cuerda estirada en línea recta; para el fluido en un tubo, es el estado en que el fluido está en reposo con presión uniforme; y para el agua en una zanja, es una superficie lisa y horizontal.

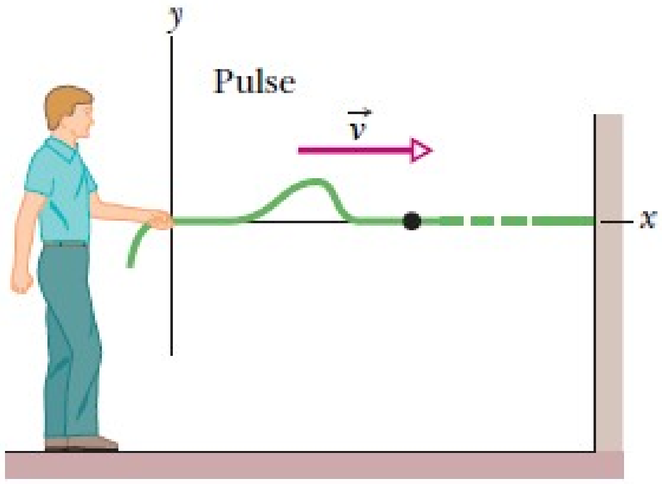
"Hacer la ola" en un estadio deportivo es un ejemplo de onda mecánica: la perturbación se propaga en la multitud, pero no transporta materia (ninguno de los espectadores se mueve de un asiento a otro).



Onda longitudinal y transversal en un resorte

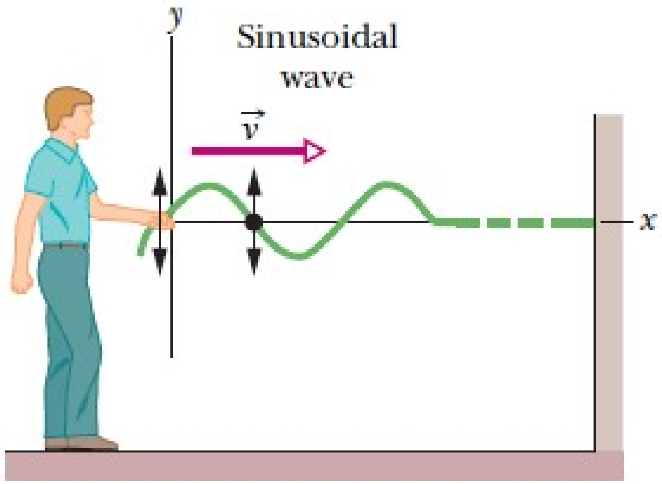
Tipos de ondas mecánicas

La caída de una piedra en un estanque o cuando se agita brevemente una cuerda por un extremo, son un solo **pulso ondulatorio** que viaja a partir de la perturbación.



(a)

También se presentan de forma continua (trenes de ondas) y otras además en forma regular: **ondas periódicas**

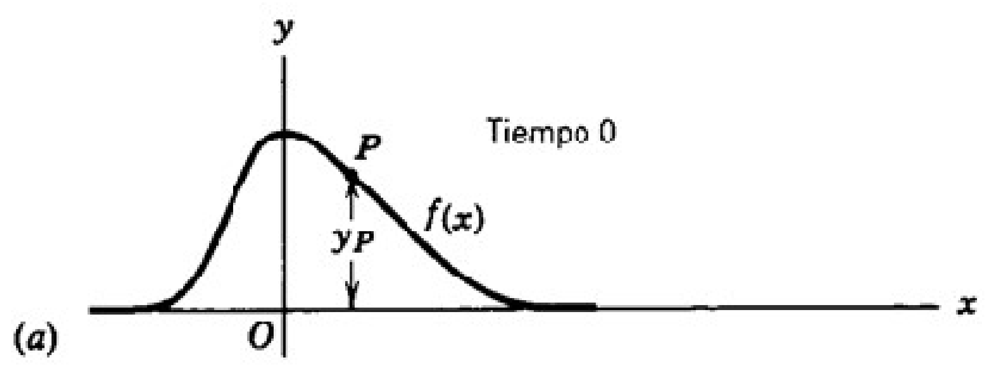


(b)

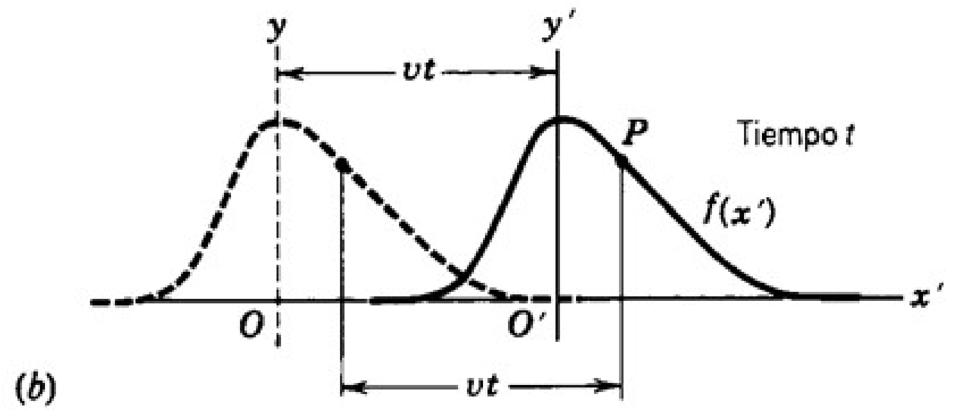
La función que representa a la onda (para el caso unidimensional) la vamos a expresar como una función ***y*** que depende de dos variables: la posción *x* y el instante de tiempo *t.*

Función de onda: y(x,t)

Movimiento de un pulso de onda



a) Forma del pulso de onda:
y(x,0)= f(x).
En un *t* posterior la forma del pulso se sigue describiendo por la función *f*.



b) O' marco de referencia que viaja con el pulso, hacia la derecha con velocidad *v*.
La forma se describe como *f(x')*.
Pero: *x'= x-vt*.
Entonces en un tiempo *t*, el pulso se describe como:
y(x,t)= f(x')= f(x-vt).

Es decir, la **función *f(x-vt)*** tiene la misma forma relativa en *x=vt* en el tiempo *t* que la función f(*x*) la tiene en el punto *x=0* en *t=0*.

$$y(x,t) = f(x - vt)$$

Se prueba que cualquier función del tipo *f(x-vt)* es solución de la ecuación de onda

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

Movimiento de un pulso de onda

$$y(x,t) = f(x - vt)$$

Pulso que viaja hacia la derecha

Pulso que viaja hacia la izquierda

$$y(x,t) = f(x + vt)$$

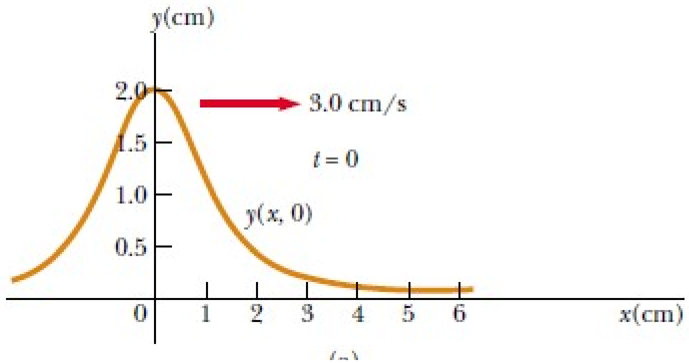
La función *y, se llama* ***función de onda****, depende de las dos variables x y t,* y se escribe ***y(x, t)****.*
Pero la relación entre x y t no es cualquiera… depende de u= x $\pm$ vt

La función de onda *y(x, t) representa la coordenada y, la posición transversal,* de cualquier elemento ubicado en la posición *x en cualquier tiempo t.*

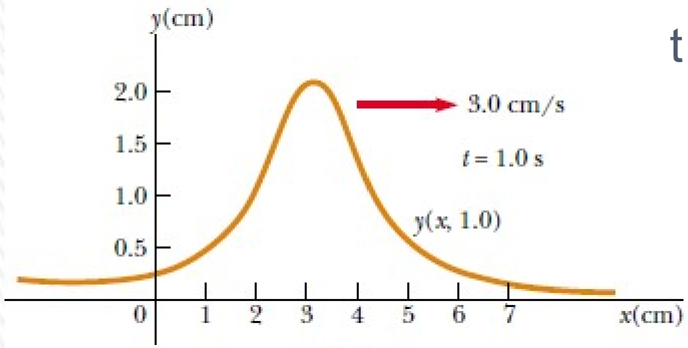
Además si t es fijo (como en el caso de tomar una instantánea del pulso), la función de onda *y(x), a veces* llamada **forma de onda, define una curva que representa la forma geométrica del pulso** en dicho tiempo.

Ejemplo: movimiento de un pulso de onda

Un pulso de onda dado por la expresión: $$y(x,t) = \frac{2}{(x-3{,}0t)^2+1}$$
(x, y en cm y t es s)
Representar el pulso, para los instantes t =0,0 s, t = 1,0 s y t = 2,0 s

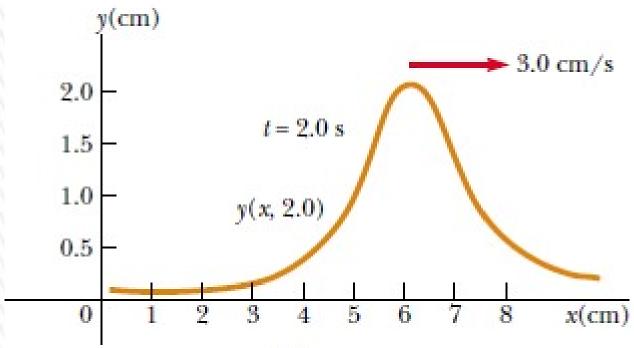


t = 0 $$y(x,0) = \frac{2}{x^2+1}$$



(b)

t = 1,0 s $$y(x,1.0) = \frac{2}{(x-3{,}0)^2+1} = \frac{2}{x^2-6{,}0x+10}$$



(c)

t = 2,0 s $$y(x,2.0) = \frac{2}{(x-6{,}0)^2+1} = \frac{2}{x^2-12{,}0x+37}$$

Movimiento de un pulso de onda

Veamos que cualquier función del tipo *f*(*x*±*vt*) es solución (verifica) la ecuación de ondas unidimensional

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\delta x^2}$$

Regla de la cadena para la derivación: f(u) = f'(u).u'

En este caso *u*= *x-vt* y tenemos derivadas parciales:

$$y(x,t) = f(x - vt)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = f'(x - vt).\frac{\partial(x - vt)}{\partial x} = f'(x - vt).1 = f'(x - vt)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} f'(x - vt) = f''(x - vt)$$

$$\frac{\partial y}{\partial t} = f'(x - vt).\frac{\partial(x - vt)}{\partial t} = f'(x - vt).(-v) = -vf'(x - vt)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left(-vf'(x - vt)\right) = v^2 f''(x - vt)$$

¿Qué representan?

$$\frac{\partial y}{\partial x}, \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

La pendiente y la concavidad de la función (perturbación de la cuerda)

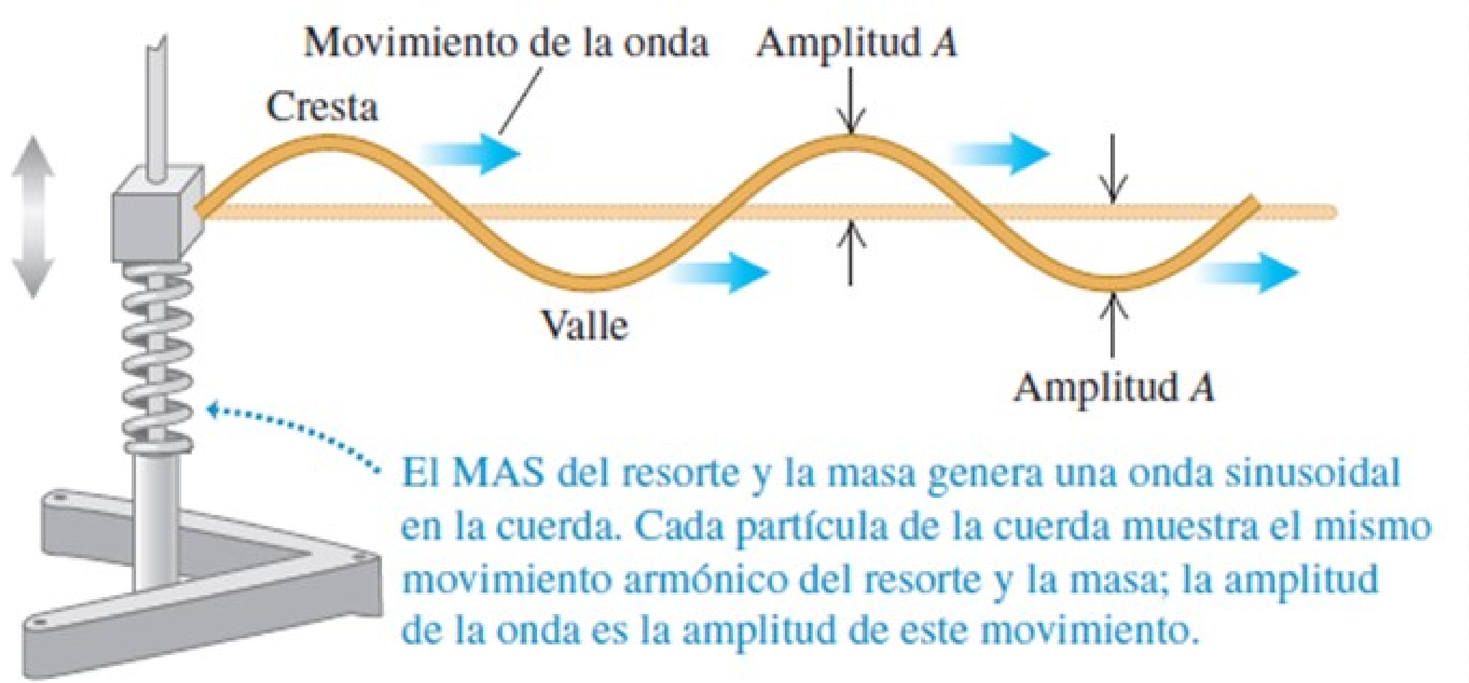
$$\frac{\partial y}{\partial t}, \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

La velocidad y la aceleración transversal de un punto de la cuerda

Ondas transversales periódicas

Excitación mediante movimiento repetitivo, o *periódico, al extremo libre de la cuerda:* cada partícula de la cuerda también experimenta un movimiento periódico al propagarse la onda, y tenemos una:

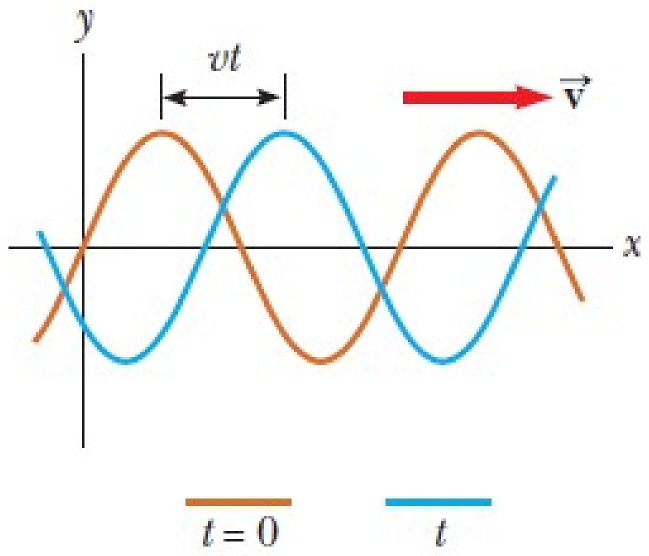
onda transversal periódica.



Bloque con masa *m* unido a un resorte tiene un movimiento armónico simple y produce una onda sinusoidal que viaja hacia la derecha por la cuerda.
En un sistema real, se tendría que aplicar una fuerza impulsora al bloque para renovar la energía transportada por la onda.

Ondas transversales periódicas

Ejemplo: excitación de la cuerda mediante movimiento hacia arriba y hacia abajo con un ***movimiento armónico simple (MAS) de amplitud A, frecuencia f, frecuencia angular ω = 2πf y periodo T = 1/f = 2 π/ω.***
La onda producida es una sucesión simétrica de *crestas y valles:*
onda progresiva sinusoidal



La forma de onda completa se mueve hacia la derecha de modo que la curva café se mueve hacia la derecha y al final llega a la posición de la curva azul.
Este es el **movimiento de la *onda***.
Si vemos un elemento del medio, como el elemento en *x = 0, se tiene que cada* elemento se mueve hacia arriba y hacia abajo a lo largo del eje *y en MAS.*
Este es el **movimiento de los *elementos del medio***.

Hay que diferenciar entre el **movimiento de la onda y el movimiento de los elementos del medio.**

Ondas transversales periódicas

Las ondas periódicas generadas a través de un MAS son fáciles de analizar; las llamamos **ondas sinusoidales.**

Y muy importantes.., más adelante verán que *cualquier onda* periódica puede representarse como una combinación de ondas sinusoidales (análisis de Fourier).

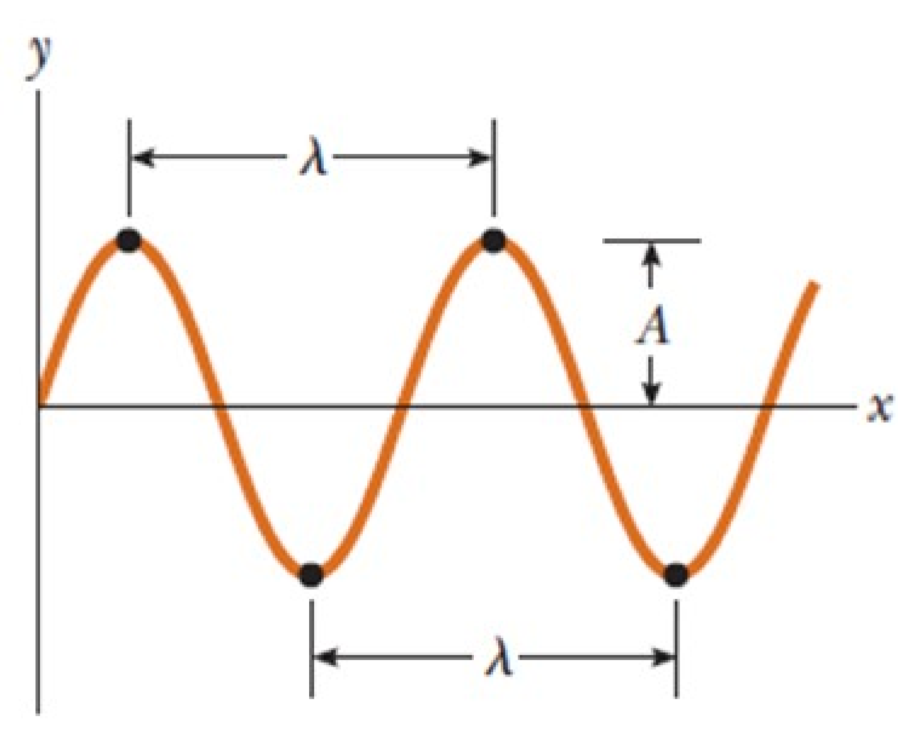
Cuando una onda sinusoidal pasa a través de un medio, todas las partículas del medio experimentan movimiento armónico simple en el sentido transversal con la misma frecuencia.

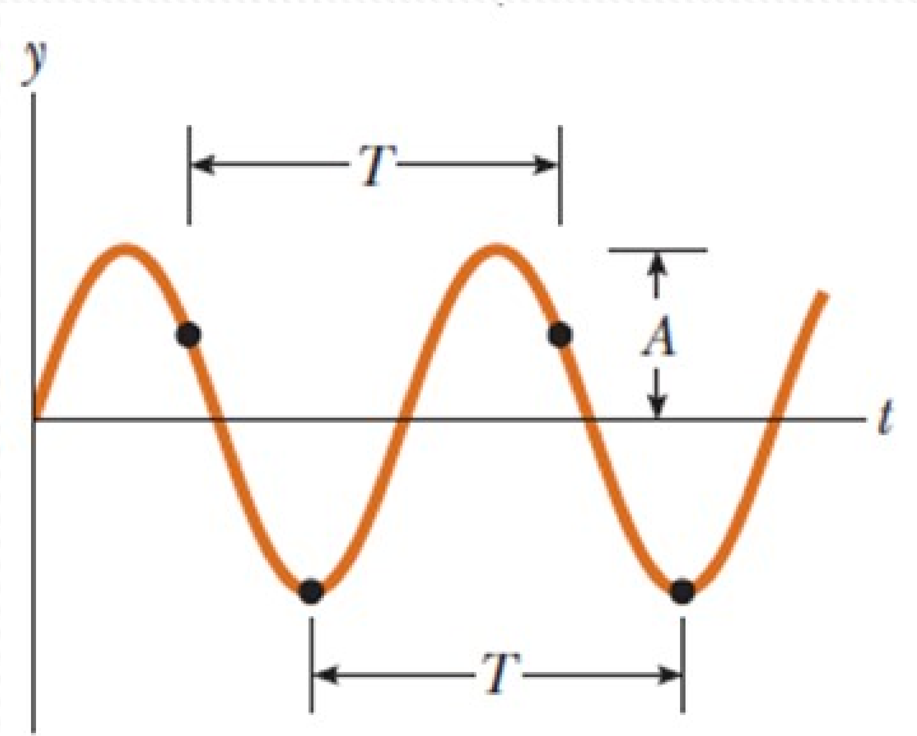
ATENCIÓN: Movimiento ondulatorio contra movimiento de las partículas

No se debe confundir el movimiento de la *onda transversal a lo largo de la cuerda con el de una partícula de la cuerda.*

La onda avanza con rapidez constante *v a lo largo de la cuerda; mientras que el movimiento de* la partícula es armónico simple y *transversal (perpendicular) a la longitud de la cuerda.*

Ondas transversales periódicas



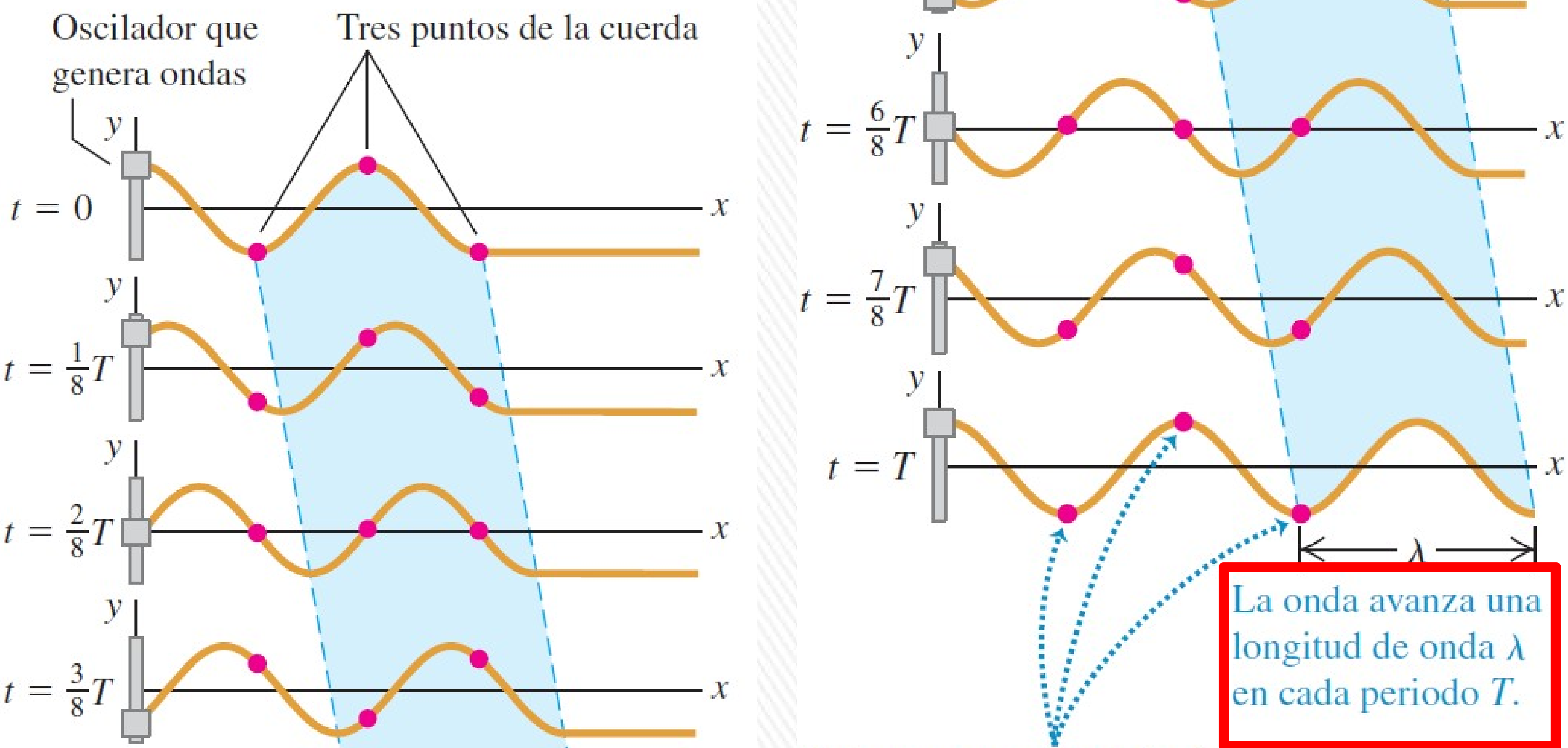


Instantánea (foto) de una onda sinusoidal.
La **longitud de onda λ** de una onda es la distancia entre crestas o valles adyacentes.

Posición de un elemento del medio como función del tiempo.
El **periodo *T*** *de una onda es el intervalo de* tiempo requerido para que el elemento complete un ciclo de su oscilación y para que la onda viaje una longitud de onda.

Ondas transversales periódicas

La cuerda se muestra a intervalos de $\frac{1}{8}$ de periodo en un total de un periodo T. El área sombreada presenta el movimiento de una longitud de onda.



Cada punto se mueve hacia arriba y hacia abajo en su lugar. Las partículas separadas una longitud de onda se mueven en fase entre sí.

Ondas transversales periódicas

Longitud de onda (λ): distancia entre una cresta y la siguiente, o bien, entre un valle y el siguiente, o de cualquier punto al punto correspondiente en la siguiente repetición de la forma de la onda.

Una cresta de onda viaja una distancia de una longitud de onda, λ, en un tiempo igual a un periodo, *T.*
Por lo tanto, la velocidad de la onda es $v = \lambda / T$.

Como $f = 1/T$,

$$v = \lambda f$$

La rapidez de propagación es igual al producto de la longitud de onda por la frecuencia.
La frecuencia es una propiedad de *toda la onda periódica, porque todos los puntos* de la cuerda oscilan con la misma frecuencia *f.*

DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE UNA ONDA

Ondas en una cuerda estirada (onda transversal periódica).

Despreciamos la curvatura de la cuerda por la gravedad:
posición de equilibrio es una línea recta (eje *x de un sistema de coordenadas)*

Ondas transversales: *durante el movimiento ondulatorio una partícula en* la posición de equilibrio *x se desplaza cierta distancia y en la dirección perpendicular* al eje *x.*

El valor de y depende de cuál partícula estemos considerando (es decir, y depende* de *x) y del instante t en que la consideremos:

y = y(x, t).   función de onda que describe la onda.

Conociendo la función y(x,t), podemos calcular el desplazamiento de cualquier partícula en cualquier instante, así como la velocidad y la aceleración de cualquier partícula, la forma de la cuerda y todo lo que nos interese acerca del comportamiento de la cuerda en cualquier instante.

$$y(x,t) = f(x \pm vt)$$

Función de onda de una onda sinusoidal

Supongamos que el desplazamiento de una partícula en el extremo izquierdo de la cuerda (*x = 0), donde la onda se origina, está dado por*

$$y(x = 0, t) = A\cos \omega t = A\cos 2\pi f t$$

La partícula oscila con MAS de amplitud *A, frecuencia f y ω = 2πf.*
En *t = 0, la partícula en x = 0 tiene su máximo desplazamiento* positivo (*y = A)*
La perturbación viaja de *x = 0 a algún punto x a la derecha del origen* en un tiempo dado por *t = x/v, (v rapidez de la onda).*

El movimiento del* punto *x en t es el mismo que el movimiento del punto x = 0 en el instante* anterior *t – x/v.
Por lo tanto, obtenemos el desplazamiento del punto x en el instante t con solo sustituir t por (t – x/v).
***Al hacerlo, obtenemos la* siguiente expresión para la función de onda:**

$$y(x,t) = A\cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right]$$

Como cos(-θ) = cos θ, podemos rescribir la función de onda así:

$$y(x,t) = A\cos\left[\omega\left(\frac{x}{v} - t\right)\right] = A\cos\left[2\pi f\left(\frac{x}{v} - t\right)\right]$$

$$y(x,t) = A\cos\left[\frac{2\pi f}{v}(x - vt)\right] = A\cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]$$

onda sinusoidal que avanza en la dirección +*x (el coseno es un seno con un desfasaje de π/2*

Función de onda de una onda sinusoidal

Vamos a elegir una función de onda apropiada $y(x,t) = f(x \pm vt)$

$$y(x,t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x \pm vt)\right)$$

Se puede hacer más general la ecuación anterior considerando diferentes valores del ángulo de fase, como se hizo para el MAS.

$$y(x,t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x \pm vt) + \varphi\right)$$

Y teniendo en cuenta que las funciones seno y coseno son iguales con la diferencia de un desfasaje de 90º o $\pi/2$

$$\cos\alpha = \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2}\right) \text{ o que } \sin\alpha = \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right)$$

Podemos considerar en forma indistinta , funciones de ondas sinusoidales tanto de la forma de seno o coseno

$$y(x,t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x \pm vt)\right) \qquad y(x,t) = A\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x \pm vt)\right)$$

Función de onda de una onda sinusoidal

$$y(x,t) = A\cos\left[\omega\left(\frac{x}{v} - t\right)\right] = A\cos\left[2\pi f\left(\frac{x}{v} - t\right)\right]$$

Se puede hacer más general la ecuación anterior considerando diferentes valores del ángulo de fase, como se hizo para el MAS.

Es posible reescribir la función de onda dada por la ecuación anterior de varias formas distintas pero útiles.
Una es expresarla en términos del periodo *T = 1/f y la longitud* de onda λ = *v/f:*

$$y(x,t) = A\cos\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right]$$

Se define el **número de onda k** como: $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$

Con este se puede reescribir la función de onda como: $y(x,t) = A\cos(kx - \omega t)$

$$y(x,t) = A\cos\left[\omega\left(\frac{x}{v} + t\right)\right] = A\cos\left[2\pi f\left(\frac{x}{v} + t\right)\right] = A\cos\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right] = A\cos(kx + \omega t)$$

La función y(x,t) también se puede describir como una función coseno en lugar de una función seno, y además puede tener una constante de fase Φ

Función de onda de una onda sinusoidal

número de onda k $$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Consideremos diferentes formas la ecuación de onda, que viaja hacia la izquierda

$$y(x,t) = A\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right) = A\cos\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{v}{\lambda}t\right)\right)$$

$$y(x,t) = A\cos\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - ft\right)\right) = A\cos\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right) = A\cos(kx - \omega t)$$

Onda que viaja en la dirección *x negativa*.

$$y(x,t) = A\cos\left[\omega\left(\frac{x}{v} + t\right)\right] = A\cos\left[2\pi f\left(\frac{x}{v} + t\right)\right] = A\cos\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T}\right)\right] = A\cos(kx + \omega t)$$

Función de onda de una onda sinusoidal

($kx \pm \omega t$) es la ***fase,*** ***desempeña el papel de una cantidad*** **angular (siempre en radianes**).

Para una cresta (donde *y = A y la función coseno* vale 1), la fase podría ser 0, 2π, *4π… ; para un valle (donde y = -A y el coseno* tiene el valor -1), podría ser π, 3π, 5π….

Para una onda que viaja en la dirección +*x, eso implica kx - ωt = constante. Derivando con respecto a t, obtenemos kdx/dt = ω , o bien,*

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} = \lambda f = v$$

Por esta razón a veces *v se denomina la velocidad de fase de la onda.* (Aunque *rapidez de fase sería más correcto).*

Función de onda de una onda sinusoidal

Las **ondas periódicas** de cualquier tipo se caracterizan por las mismas magnitudes.

Frecuencia (f): es la cantidad de ondas que pasan por segundo en un punto y viene determinado por la fuente de la onda.

Periodo (T): es el tiempo entre sucesivas crestas y coincide con el inverso de la frecuencia $T = 1/f$.

Velocidad (v ó c): es la velocidad con que viaja la cresta de la onda.

Longitud de onda (λ): es la distancia entre dos crestas sucesivas.

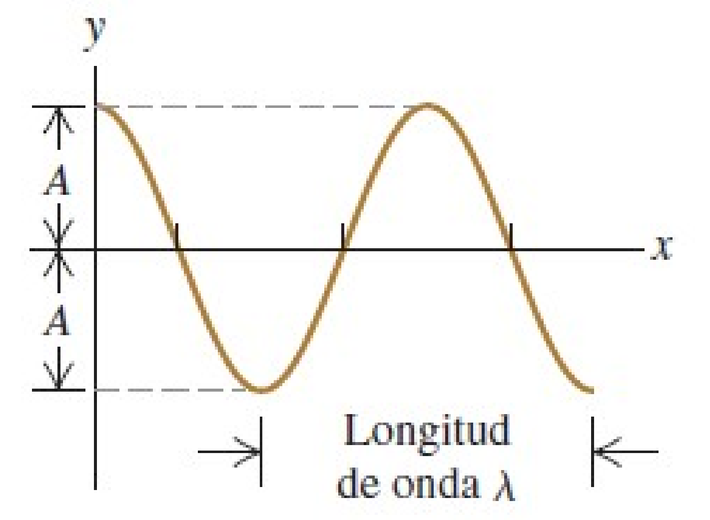
Amplitud (A): valor máximo del desplazamiento, el desplazamiento de una onda periódica varía entre –A y +A.

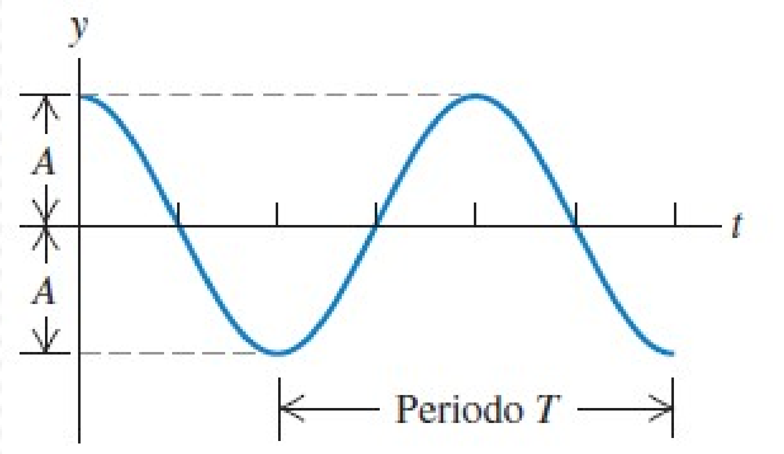
Número de onda k:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Analizaremos ondas periódicas sinusoidales, cuyas gráficas son funciones como las del seno y del coseno. Recordar que seno y coseno son funciones idénticas desfasadas π/2: $\operatorname{sen}(\varphi) = \cos(\varphi + \pi/2)$

Gráficos de la función de onda





a): función de onda y(x, t) en función de x para un* instante específico *t:
Da ***el desplazamiento y de una partícula con respecto* a su posición de equilibrio, en función de la coordenada *x de la partícula*** (como una fotografía instantánea de la cuerda). En *t = 0:*

$$y(x, t = 0) = A\cos kx = A\cos 2\pi\frac{x}{\lambda}$$

b) función de onda contra el tiempo t para una coordenada x específica*.*
Da *el desplazamiento y de la partícula en* esa coordenada en función del tiempo; es decir, describe el movimiento de la partícula, en particular, en la posición *x = 0,*

$$y(x = 0, t) = A\cos(-\omega t) = A\cos\omega t = A\cos 2\pi\frac{t}{T}$$

Velocidad y aceleración de partículas en una onda sinusoidal

Velocidad transversal de cualquier *partícula en una onda transversal, que llamaremos* v_y *para distinguirla de la* rapidez *v de propagación de la onda. Para calcular* v_y *en un punto x dado, derivamos* la función de onda *y(x, t) con respecto a t, manteniendo x constante , es decir calculamos una derivada parcial.*

$$y(x,t) = A\cos(kx - \omega t)$$

$$v_y(x,t) = \frac{\partial y\,(x,t)}{\partial t} = A(-\sin(kx - \omega t))(-\omega) = \omega A \sin(kx - \omega t)$$

La velocidad transversal de una partícula varía con el tiempo, como se espera en movimiento armónico simple.
La rapidez máxima de una partícula es ω*A; la cual puede ser mayor, menor o igual que la rapidez de onda v, según* la amplitud y la frecuencia de la onda.

La *aceleración de cualquier partícula es la segunda derivada parcial de y(x, t) con* respecto a *t:*

$$a_y(x,t) = \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} = -\omega^2 A\cos(kx - \omega t) = -\omega^2 y(x,t)$$

La aceleración transversal de una partícula es igual a $-\omega^2$ veces su desplazamiento, que es el resultado que se obtuvo para el movimiento armónico simple.

Velocidad y aceleración de partículas en una onda sinusoidal

Derivadas parciales de *y(x, t) con respecto a x, manteniendo t constante.*
La primera derivada ∂y(x, t)/∂x es la pendiente de la cuerda en el punto *x en el tiempo t.*

$$\frac{\delta y(x,t)}{\delta x} = A(-\sin(kx-\omega t)k) = -kA\sin(kx-\omega t)$$

La segunda derivada parcial con respecto a x es la concavidad de la cuerda

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = -k^2 A\cos(kx-\omega t) = -k^2 y(x,t)$$

Para determinar la denominada ecuación de ondas hacemos:

$$\frac{\dfrac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}}{\dfrac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2}} = \frac{-\omega^2 y(x,t)}{-k^2 y(x,t)} = \frac{\omega^2}{k^2} = v^2$$

$$\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2}$$

Ecuación de onda unidimensional

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - v^2\frac{\partial^2 y}{\delta x^2}$$

Dedujimos esta ecuación para una onda que viaja en la dirección +*x.*
Análogamente se puede mostrar para una onda sinusoidal que se propaga en la dirección *x negativa, y(x, t) = A cos(kx + ωt).*

Es una de las ecuaciones más importantes en física.
Siempre que se presenta, sabemos que una perturbación puede propagarse como onda a lo largo del eje *x con rapidez v.*
La perturbación no tiene que ser una onda sinusoidal: se puede ver que *cualquier onda en una cuerda* cumple la ecuación, sea periódica o no.

LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS

Cada tipo de onda tiene un origen físico específico y una velocidad característica.

Ondas electromagnéticas no necesitan un medio material para propagarse: se originan en campos eléctricos y magnéticos mutuamente inducidos.
Su velocidad en el vacío vale: $c_0 = 2{,}998 \times 10^8$ m/s (en medios materiales, su velocidad siempre es menor).

$$c_o = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$$

Sonido: perturbación mecánica, intervienen gran número de moléculas: se mueven y chocan cuando pasa la perturbación, pero en promedio, no experimentan ningún cambio neto en su posición. Su velocidad en un determinado medio, depende de cómo varía la presión con la densidad.
En el aire a 30ºC es de 344 m/s, pero por ejemplo en el aluminio vale 6.400 m/s.
En los sólidos pueden haber ondas sonoras longitudinales y transversales, y ambos tipos de ondas, tiene velocidades diferentes.

La velocidad de una onda puede deducirse a partir de las leyes físicas que describen los diferentes fenómenos, depende del tipo de onda, de las propiedades del medio en el que se propaga y algunas veces de la frecuencia.

LA VELOCIDAD DE LAS ONDAS

VELOCIDAD DE UNA ONDA EN UNA CUERDA

Cuando una parte de una onda se desplaza, la fuerza restauradora es proporcional a la tensión en la cuerda T y también depende de la masa por unidad de longitud de la cuerda μ

$$c_{cuerda} = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

EJEMPLO: La tensión en la cuerda más larga de un piano de cola es de 1098 N, y la masa por unidad de longitud es de 0,065 kg/m. ¿Cuál es la velocidad de una onda en esta cuerda?

$$c_{cuerda} = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{1098\ N}{0{,}065\ kg/m}} = 1{,}3 \times 10^2\ m/s$$

En este caso se ha representado a la tensión de la cuerda con T , no confundir con el periodo!!!

RAPIDEZ DE LAS ONDAS MECÁNICAS

La ecuación $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ da la rapidez de onda únicamente para el caso especial de las ondas mecánicas en un alambre o una cuerda estirados.

Para muchos tipos de ondas mecánicas, incluidas las ondas en una cuerda, la expresión para la rapidez de la onda tiene la misma forma general:

$$v = \sqrt{\frac{\text{Fuerza de restitución que vuelve el sistema al equililbrio}}{\text{Inercia que se opone a volver al equilibrio}}}$$

La tensión *F en la cuerda desempeña el papel de la fuerza* de restitución; tiende a hacer que la cuerda vuelva a su configuración de equilibrio: sin perturbación.
La masa de la cuerda, o mejor dicho, la densidad lineal de masa μ, proporciona la inercia que se opone a que la cuerda regrese instantáneamente al equilibrio.

Existe una expresión similar para la rapidez de las ondas sonoras en un gas.
A grandes rasgos, la presión del gas proporciona la fuerza que tiende a volver al gas a su estado no perturbado, después de que una onda sonora pasa por él.
La inercia proviene de la densidad, o masa por unidad de volumen, del gas.

RAPIDEZ DE UNA ONDA TRANSVERSAL

Una onda periódica que entra a un determinado medio es consecuencia de la acción de un agente externo que perturba al medio a una cierta frecuencia.
La onda que viaja a través de ese medio tendrá la misma frecuencia que la fuente de la onda.
La velocidad de la onda, está determinada por las propiedades del medio.
Dadas la frecuencia f y su velocidad v en el medio, la longitud de onda queda determinada por $\lambda = v/f$.

Si la onda pasa de un medio a otro, por ejemplo de densidades de masa distintas, la frecuencia de la onda en ambas cuerdas será la misma (pues de lo contrario habría una discontinuidad en el punto que se unen las cuerdas) pero cambian las longitudes de onda:

$$f = \frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$$