14. Ondas mecánicas

Introducción

Las ondas son un fenómeno natural común e importante. Las ondas de choque, las ondas en el agua, las ondas de presión así como las ondas de sonido son ejemplos cotidianos de ondas.

El fenómeno ondulatorio ha sido investigado por siglos, siendo una de las preguntas más controversiales en la historia de la ciencia, la naturaleza corpuscular u ondulatoria de la luz.

De hecho Isaac Newton utilizó sus conocimientos de las propiedades ondulatorias para reforzar su creencia de que la luz no podía ser una onda. Su error era originado por su incapacidad de medir las longitudes de onda extremadamente pequeñas de la luz visible, además de no haber comprendido correctamente los fenómenos de interacción de la luz con la materia.

No fue sino hasta los experimentos de doble rendija realizados por Thomas Young que se modificó el paradigma, transformándose de un modelo de partículas a un modelo ondulatorio, mismo modelo que fue apoyado posteriormente por la descripción matemática de la luz que realizó James Clerk Maxwell.

Sin embargo la teoría ondulatoria electromagnética de Maxwell, no explicaba correctamente la radiación del llamado "cuerpo negro". No fue sino hasta principios del siglo XX que *Max Planck* introdujo el concepto de "cuanto de luz", mismo que tiene una energía proporcional a la frecuencia, y que permitió explicar en forma exitosa la radiación del "cuerpo negro".

De igual forma *Albert Einstein* consideró una teoría corpuscular de la luz para explicar el efecto fotoeléctrico. Aproximadamente 20 años después Louis *de Broglie* obtuvo una expresión matemática que compara la longitud de onda de una onda, con el ímpetu (cantidad de movimiento lineal) de una partícula. En este proceso él dió una explicación confiable de la suposición de *Bohr* acerca de que los electrones de los átomos sólo podían existir en determinadas órbitas.

Posteriormente, en un refinamiento de esta idea, *Erwin Schródinger* desarrolló el modelo de nubes electrónicas del átomo. Finalmente la dualidad onda partícula para toda la materia se manifiesta en el llamado 'Principio de Incertidumbre" de Heisenberg y en la hipótesis de *de Broglie.*

Características de las ondas

Dentro de los diferentes tipos de ondas que aparecen en la naturaleza, se denominan *ondas mecánicas* aquellas que se desplazan a través de un medio deformable o elástico, a diferencia de aquellas que no requieren de ningún medio para su propagación. Formalmente podemos definir las ondas mecánicas como *aquellas que viajan de un lugar a otro a través de un medio material, originando una perturbación temporal en este medio, sin que el medio a su vez se transporte de un lugar a otro.*

Otro aspecto muy importante que caracteriza a las ondas, es el hecho de que todo movimiento ondulatorio tiene una energía asociada a él. Con relación a esto hasta ahora sólo se han visto diferentes formas de energía, que se transportan de un lugar a otro debido al movimiento de los cuerpos o de las partículas (como en las diferentes formas de energía mecánica), pero en el caso de las ondas nos encontramos con un *fenómeno físico en el cual se presenta un fenómeno de transporte de energía sin que las partículas o cuerpos materiales se desplacen.*

¿Cómo se podría probar experimentalmente el transporte de energía por una onda mecánica?

Las ondas mecánicas pueden clasificarse de diferentes maneras. Inicialmente lo haremos considerando la dirección del movimiento de las partículas de materia, con respecto a la dirección de propagación de la onda.

Si el movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. diremos que se trata de una *onda transversal* (Ej. ondas en una cuerda). **NOTA**: Las ondas de luz aunque no son ondas mecánicas, también son ondas transversales.

Por otro lado, si el movimiento de las partículas de una onda mecánica es en un sentido y otro a lo largo de la dirección de propagación, estaremos hablando de una *olida longitudinal.* (Ej. ondas de sonido en un gas).

NOTA: *Algunas ondas no son ni puramente longitudinales ni puramente transversales; como es el caso de las ondas que se aprecian sobre la superficie del agua, ya que las partículas se mueven hacia abajo y hacia arriba, pero también hacia delante y hacia atrás, de tal manera que la trayectoria final es una elipse. Por otra parte, el estudio de las ondas mecánicas es de vital importancia para la comprensión de una gran cantidad de fenómenos físicos debido a que la descripción matemática de las ondas mecánicas y de las demás ondas es muy semejante.*

Ondas periódicas

Figura 50. Si tomamos una cuerda estirada y le aplicamos un movimiento vertical en su extremo, estaremos generando un *pulso* que viajará por la cuerda. En este caso cada partícula permanece en reposo hasta que el pulso llega hasta ella, se mueve durante un instante y vuelve a permanecer en reposo.

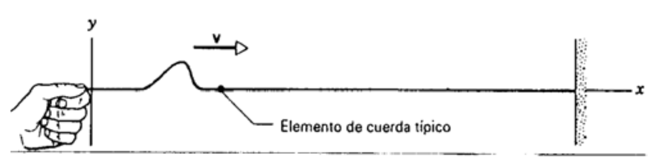
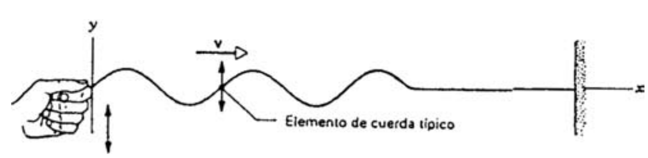


Figura 51. Si mantenemos el movimiento al extremo de la cuerda, generaremos un *tren de ondas* que se propagará a lo largo de la cuerda. Si el movimiento es periódico, generaremos un *tren de ondas periódico*, en el cual cada partícula mantendrá un movimiento periódico. El caso más sencillo de una onda periódica es una onda armónica, en el cual cada partícula se mueve con un MAS.



Ondas armónicas o senoidales

En el caso de las ondas armónicas además de que las partículas del medio se mueven con un movimiento armónico simple, tienen la forma de la función seno.

NOTA: *Cualquier onda periódica puede representarse por una combinación de ondas senoidales.*

Cuando una onda senoidal viaja por un medio, todas las partículas del medio experimentan un Movimiento Armónico Simple de la misma frecuencia.

Algunos elementos que caracterizan a éstas ondas son:

- **Longitud de onda (λ)**: En una onda periódica es la distancia entre dos crestas, dos valles, o dos nodos no consecutivos.
- **Amplitud (A)**: Magnitud del máximo desplazamiento.
- **Periodo (T)**: En una onda periódica es el intervalo de tiempo necesario para formar una onda completa.
- **Frecuencia (f)**: Es el número de ciclos que se forman por unidad de tiempo.
- **Frecuencia angular (ω)**: Análogo en el movimiento ondulatorio a la frecuencia angular del movimiento armónico simple.
- **Rapidez de onda (v)**: Magnitud de la velocidad de propagación de la onda (depende únicamente de las características del medio).

Considerando que las ondas se propagan con rapidez constante podemos determinar una expresión para esta rapidez en términos de la longitud de onda y el periódo. El tiempo necesario para que un punto en cualquier coordenada x, realice un ciclo completo de movimiento transversal es el período T. Durante este tiempo , la onda recorre una distancia vT, correspondiente a una longitud de onda, así que:

$$\lambda = vT$$

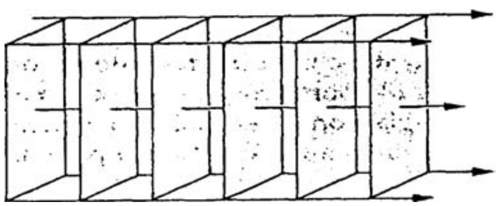
$$v = \frac{\lambda}{T}$$

$$v = \lambda f$$

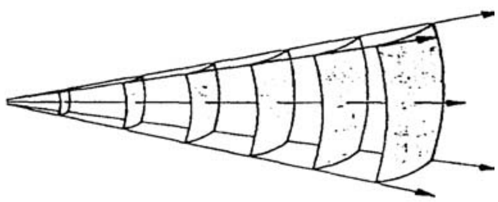
NOTA: *Es importante recalcar que la* rapidez *de onda NO es la rapidez con que se mueven las* partículas *del medio.*

Frente de onda

Si arrojamos un objeto a una piscina, observaremos las ondas que se forman en la superficie del agua y notaremos una serie de círculos que se alejan del punto donde cayó el objeto. En cada uno de éstos círculos, todos los puntos están en el mismo estado de movimiento o *fase,* (concepto que se define más adelante) y definen una superficie denominada *frente de onda.* Si la densidad del medio es uniforme, la dirección de propagación de las ondas será perpendicular al frente de onda. Una línea perpendicular a los frentes de onda, en la dirección del movimiento de las ondas, se denomina rayo. Cuando las perturbaciones viajan en una sola dirección, tendremos una onda plana, la cual se caracteriza porque en un determinado instante, las condiciones son las mismas en todas las partes d: un plano cualquiera perpendicular a la dirección de propagación.



Onda plana. Cada plano representa un *frente de onda* espaciado una longitud de onda, en tanto que las flechas representan rayos.



Onda esférica. En este caso los frentes de *onda,* también espaciados una longitud de onda, son superficies esféricas en tanto que *los rayos* aparecen en dirección radial.

En el caso de las ondas esféricas, tenemos una situación tridimensional originada por una perturbación que se propaga en todas direcciones, desde una fuente de ondas puntual.

Propagación de las ondas

Para describir el movimiento de las ondas mecánicas, partiremos de una onda transversal que viaja en una cuerda que se mantiene horizontal. Supondremos una cuerda "ideal", en la que la perturbación, ya sea un pulso o un tren de ondas, conservan su forma mientras se propagan. Esto implica que las pérdidas de energía deben ser despreciables. La perturbación viaja a lo largo de x mientras se mantiene en el plano *xy*.

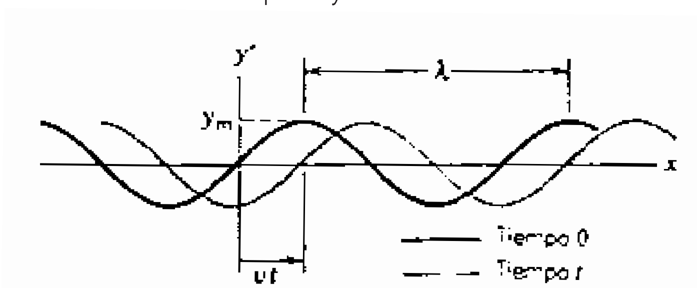


Figura 53. Consideremos un pulso cualquiera en $t = 0$, que viaja a lo largo de una cuerda en la dirección + x con una velocidad v. Un instante t más tarde el pulso se habrá movido una distancia vt. Sin embargo la forma del pulso no se habrá modificado.

La coordenada y representa el desplazamiento vertical de un punto específico de la cuerda. Este valor depende tanto de la posición como del tiempo, podemos indicar esta dependencia de las dos variables como $y\,(x,\,t)$. En general la forma de la onda en $t = 0$ se puede representar como

$$y\,(x,o) = f\,(x)$$

Después de un instante *t*, la forma de onda se deberá describir por la misma función *f*, ya que hemos considerado que la forma no cambia al viajar la onda. Si analizamos el movimiento con respecto al origen *O'* de un sistema de referencia que se traslade con el pulso, la forma se describirá por la función $f\,(x\,)$, como se muestra en la figura. La relación entre las abscisas de los dos sistemas de referencia es $x' = x - vt$. Entonces, al tiempo t, la onda se describe por

$$y\,(x,\ t) = f\,(x')$$

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

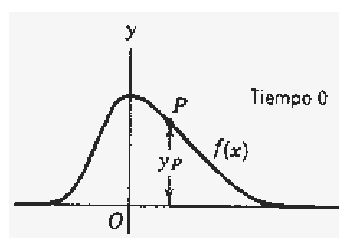
la cantidad *x - vt* se denomina la fase de la onda.

Evidentemente para describir por completo la onda, habrá que especificar la función *f*.

Si la onda se mueve en la dirección -x, se reemplazará *v* por *-v*, así se tendrá

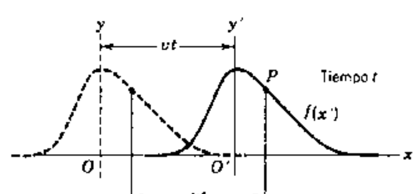
$$y\,(x,\ t) = f\,(x + vt)$$

Figura 54. Si seguimos el movimiento de determinada parte (o fase) de la onda, como el punto *P* de la onda de la figura. Si la onda va a mantener su forma mientras se traslada, entonces la coordenada y_p del punto *P* no debe variar. El único modo de que esto pueda suceder es que la coordenada *x* de P aumente conforme aumenta *t*, de tal manera que *x* − *vt* se mantenga constante.



(a)

Figura 55. El valor de *x* − *v t* es el mismo en *P* de la figura (b) que *P* de la figura (a). Esto se mantiene en cualquier posición de la forma de onda y para cualquier valor de *t*. *Consecuentemente para el movimiento de cualquier fase particular de la onda se debe cumplir que x − vt = constante.*



(b)

La expresión $x - vt = constante$ caracteriza el movimiento de la fase de la forma de onda ya que al derivar respecto al tiempo,

$$\frac{dx}{dt} - v = 0 \quad \text{esto es} \quad \frac{dx}{dt} = v$$

La velocidad dx/dt describe al movimiento de la fase de la onda y se conoce como *velocidad de fase.* El signo de la velocidad es positivo, lo que indica que la onda se propaga hacia la derecha, como lo indica la ecuación:

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

Ondas senoidales

La descripción que se ha hecho es válida para formas de onda arbitrarias y se cumple tanto para ondas longitudinales como transversales. Consideraremos ahora una onda con forma senoidal, escogemos esta forma por tener importantes aplicaciones.

Si para el tiempo t = t tenemos un tren de ondas a lo largo de una cuerda de la forma:

$$y\,(x = 0,t) = A \text{ sen } \omega t$$

$$y\,(0,\ t) = A \text{ sen } 2\pi ft$$

donde A representa la amplitud, ω representa la frecuencia angular; y la onda se propaga en dirección +x con velocidad de fase v, entonces la ecuación de la onda será

$$y\,(x,t) = A \text{ sen } \omega \left(t - \frac{x}{v}\right)$$

$$y\,(x,t) = A \text{ sen } 2\pi f \left(t - \frac{x}{v}\right)$$

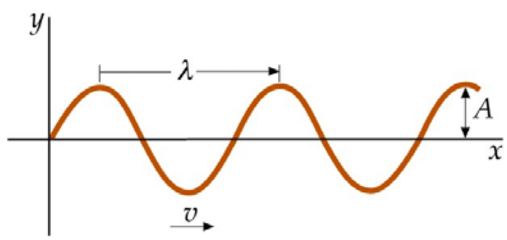


Figura 56. Onda senoidal perturbada en t = 0 con amplitud A

El tiempo necesario para que un punto en cualquier posición x realice un ciclo completo de movimiento transversal, es el período T (mismo que equivale a un cambio de 2π radianes en la fase). Durante ese tiempo, la onda recorre una distancia vT correspondiente a una longitud de onda λ así que

$$\lambda = vT$$

y recordando que

$$f = \frac{1}{T}$$

podemos encontrar otra expresión para la onda

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

y de acuerdo con esta última forma se ve claramente que y, en cualquier instante, toma el mismo valor en x, $x+\lambda$, $x+2\lambda$, etc. Además, dada una posición, este valor se repite en los tiempos t, $t+T$, $t + 2T$, etc.

Todavía es posible reducir aún más la ecuación anterior, introduciendo el número de onda "k" que se define como:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\text{rad}}{\text{m}}\right)$$

de tal manera que podemos reescribir la ecuación general de las ondas senoidales como

$$y\,(x,t) = A \text{ sen } (\omega t - kx)$$

Derivando ésta última expresión con respecto al tiempo podremos obtener expresiones que permitirían obtener **la velocidad y la aceleración de las partículas** del medio (no *de propagación de la onda "v").*

NOTA: *Es importante recordar que ta velocidad de la onda no depende de la frecuencia o de la longitud de onda, sino de las* ***propiedades del medio*** *en que se trasmite. Este es uno de los errores conceptuales más frecuentes.*

Superposición de ondas

Dos objetos materiales no pueden coexistir en el mismo lugar del espacio, esto es, dos libros o dos lápices no pueden ocupar el mismo lugar en el espacio. Sin embargo dos o más ondas sí pueden existir en el mismo espacio en el mismo tiempo. Si arrojamos un par de piedras al agua, las ondas generadas se superponen y forman un patrón llamado patrón de interferencia. Los efectos de las ondas pueden aumentar, disminuir o neutralizarse en el patrón de interferencia.

• El **principio de superposición** nos dice que, cuando varias ondas se combinan en un punto, el desplazamiento de cualquier partícula en un instante dado, es la sorna vectorial de los desplazamientos que produciría cada onda individual actuando por sí sola.

El principio de superposición es válido para las ondas mecánicas cuando la fuerza de restitución varía linealmente con el desplazamiento, esto es: La fuerza ejercida por el material es de la forma

$$F = Bx$$

donde B sería una constante que dependería de las características del material.

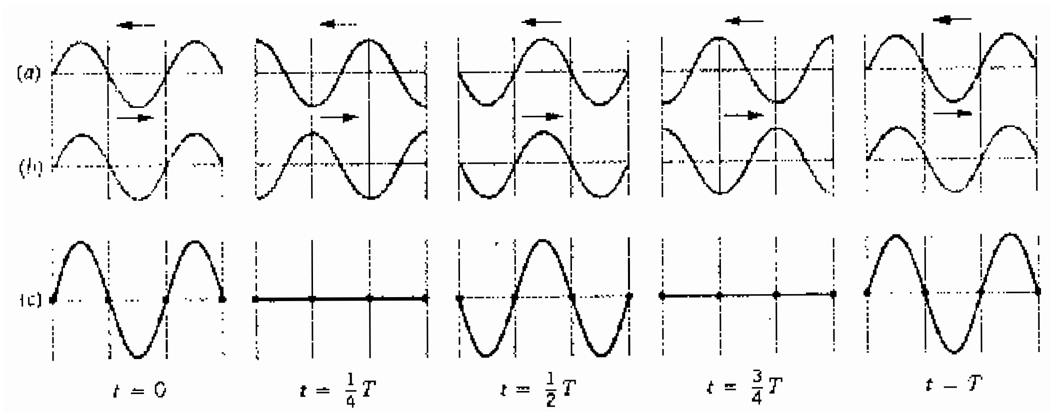


Figura 57. Dos ondas viajeras de la misma amplitud y longitud de onda moviéndose en direcciones opuestas. *(c)* superposición de las dos ondas en instantes diferentes. Los nodos de la onda estacionaria se representan por puntos gruesos. Las ondas viajeras no tienen nodos.

Ondas estacionarias

Atando una cuerda a una pared y agitando el extremo libre de arriba abajo se produce una onda en la cuerda. La onda se refleja y se regresa desplazándose por la cuerda. Agitando la cuerda de cierta forma se puede lograr que la onda incidente y la onda reflejada formen una *onda estacionaria* ,en la que ciertos puntos de la cuerda llamados *nodos* permanecen inmóviles.

Este fenómeno es consecuencia del efecto de superposición de dos ondas de igual amplitud y frecuencia que se mueven en una misma cuerda en direcciones opuestas.

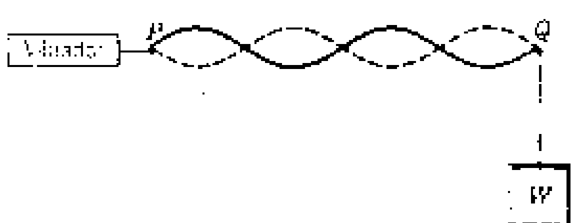


Figura 58. Una cuerda sometida a una tensión por el cuerpo W está conectada a un vibrador. A una frecuencia fija, los patrones de la onda estacionaria se formarán para ciertos valores de la tensión en la cuerda.