Por consiguiente, la energía potencial elástica es proporcional al cuadrado del estiramiento

$$EP\ elástica = \frac{1}{2}kx^2$$

Si se comprime un resorte una distancia x de su longitud normal (ver fig. 8c), también tiene la energía potencial dada por la ecuación anterior. Así, x puede ser tanto la cantidad comprimida o la estirada con respecto a la posición de equlibrio (ver fig.8).

En este ejemplo, en la conservación de la energía mecánica se considera la masa del resorte despreciable. La masa (m) tiene la velocidad (v) en cualquier momento, despreciando la fricción y que no existe otra fuerza, entonces, la energía mecánica total (E) es la suma de las energías cinética y potencial, o sea

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$$

A partir de la figura 8 en el inciso b) al estirarlo el cuerpo tiene velocidad cero y la energía cinética por lo tanto es cero, toda la energía mecánica es la energía potencial elástica. En el inciso c) tiene velocidad cero al comprimirse y su energía cinética es cero y sólo tiene energía potencial elástica. En el inciso a) en donde se encuentra en su posición de equilibrio, la distancia (x) es cero, siendo su energía potencial elástica igual a cero y como lleva el cuerpo una velocidad (v) sólo tiene energía cinética en ese punto. Cuando la masa oscila para la izquierda y para la derecha, la energía se intercambia continuamente de energía potencial a energía cinética y viceversa.

B.- MOVIMIENTO ONDULATORIO

1.- Introducción

Analicemos algunos ejemplos de movimiento: Un vaso cae de una mesa y al golpear el piso, se rompe. Una piedra golpea el vidrio de una ventana y lo rompe. Un automóvil a gran velocidad choca contra una pared y se destruye.

En estos ejemplos de movimiento podemos ver que hay transporte de energía, que es lo que provoca que se rompa o deforme el cuerpo, pero este transporte de energía está asociado al transporte de materia, el vaso que cae, la piedra o el automóvil.

Veamos otros ejemplos: La campana de la iglesia toca y el sonido se escucha en todo el pueblo. Una estación de radio transmite un programa y nosotros lo escuchamos en nuestra casa. Se produce un terremoto en una isla del Océano Pacífico y la estación sismológica de Ciudad México lo detecta.

En estos ejemplos de movimiento hay transporte de energía, pues de lo contrario no escucharíamos el sonido, o no podríamos oír el programa de radio o no detectaríamos el terremoto, pero no hay transporte de materia, no hay desplazamiento neto de materia entre la campana y los oídos o entre la estación de radio y nuestro aparato receptor o entre el centro del terremoto y la estación sismológica. Estos son ejemplos de movimiento ondulatorio y se señala la característica fundamental de este tipo de movimiento que consiste en que hay transporte de energía pero no hay transporte de materia.

En todos los casos de movimiento ondulatorio analizados se presentan las siguientes características: una fuente, que provoca la aparición del fenómeno, y la propagación de energía en el espacio, que provoca que ésta pueda ser detectada en otro punto distante del espacio.

Podemos definir una onda como la propagación de una perturbación en el espacio sin que exista transporte de materia. La perturbación es la variación de una magnitud física en un punto del espacio, como puede ser la presión, la densidad, la intensidad del campo eléctrico, la posición de las partículas de un medio, etc.

2.- Tipos de Onda

De acuerdo al medio por donde se propagan las ondas pueden dividirse en mecánicas y electromagnéticas.

Ondas mecánicas son aquéllas que necesitan de un medio mecánico elástico para propagarse. Por ello pueden definirse como la propagación de una perturbación mecánica en un medio elástico.

Las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio para su propagación. Por ello podemos transmitir ondas electromagnéticas en el vacío, a través del espacio, por ejemplo desde una nave espacial hacia la Tierra. Consisten en la propagación de una perturbación electromagnética o sea una variación de la intensidad del campo eléctrico y magnético en el espacio.

Analicemos el mecanismo de propagación de una onda mecánica en un medio elástico. Por medio elástico entendemos aquél en el cual las partículas están unidas por fuerzas elásticas o sea fuerzas que tienden a regresar al medio a la posición inicial una vez que cesa la fuerza deformadora sobre él. Recordemos cuando estudiamos el sistema cuerpo resorte las fuerzas elásticas del resorte. Imaginemos ahora un medio como el que se muestra en la figura 9,

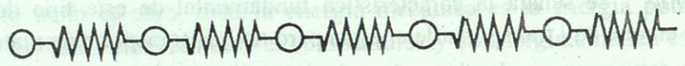
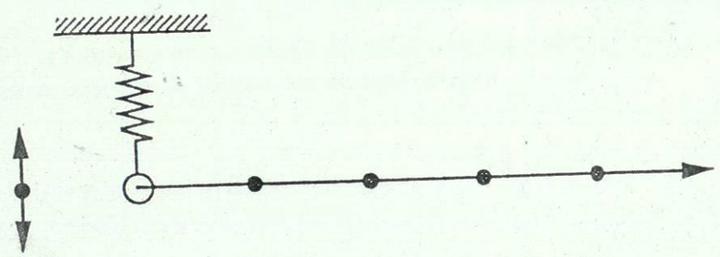


Figura 9. Medio elástico.

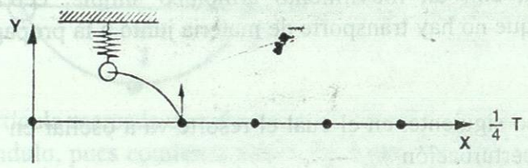
donde las partículas están enlazadas por resortes imaginarios. Está claro que si sacamos de la posición de equilibrio a una de las partículas del medio, sobre ella aparecerán fuerzas que tienden a hacer que la partícula regrese a su posición inicial.

Imaginemos ahora que la partícula del extremo está unidad a un resorte de la forma que se muestra en la siguiente figura

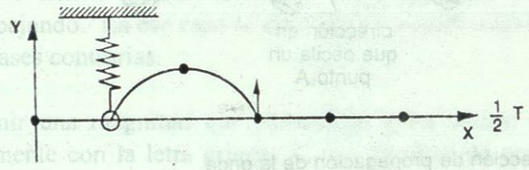


donde ya no se muestran los resortes que unen a las partículas entre sí, pero que siguen existiendo. Por otra parte supongamos que las partículas solo pueden moverse en la dirección mostrada, o sea hacia arriba o hacia abajo pero no a la derecha o a la izquierda.

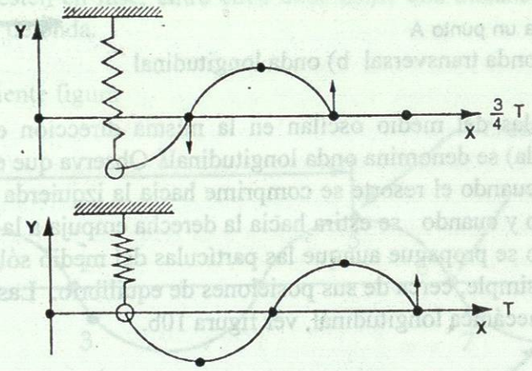
Supongamos que el resorte es sacado de su posición de equilibrio por un impulso hacia arriba. Está claro, de lo estudiado en el tema anterior que el resorte va a realizar un movimiento armónico simple, pero que este movimiento se va a transmitir por todo el medio, como se muestra en la figura



Al transcurrir 1/4 de período del **MAS** del resorte, éste se encuentra en su posición superior y está ejerciendo una fuerza sobre la siguiente partícula del medio debido a los enlaces elásticos que existen entre ellos. El resorte comienza ahora un movimiento hacia abajo, como se muestra enseguida



y al pasar 1/2 período de su **MAS**, la perturbación llegó hasta la tercera partícula del medio. Luego el proceso continúa, como se muestra enseguida



O sea cuando el resorte realiza una oscilación completa, al cabo de un período (T)de su MAS, la perturbación se ha propagado una distancia determinada. Observa que las partículas del medio se mueven en una dirección perpendicular (hacia arriba y abajo) a la dirección de propagación (hacia la derecha). En este caso, en que las partículas del medio se mueven en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación, se dice que tenemos una onda transversal. Es el caso de una cuerda que hacemos oscilar con nuestra mano, ver figura 10a.
Es importante que se vea que las partículas del medio no se desplazan junto con la perturbación sino que oscilan, con un movimiento armónico simple, cerca de sus posiciones de equilibrio, o sea que no hay transporte de materia junto a la propagación de energía.

Podemos imaginar ahora el caso siguiente, en el cual el resorte va a oscilar en la misma dirección en que se propaga la perturbación

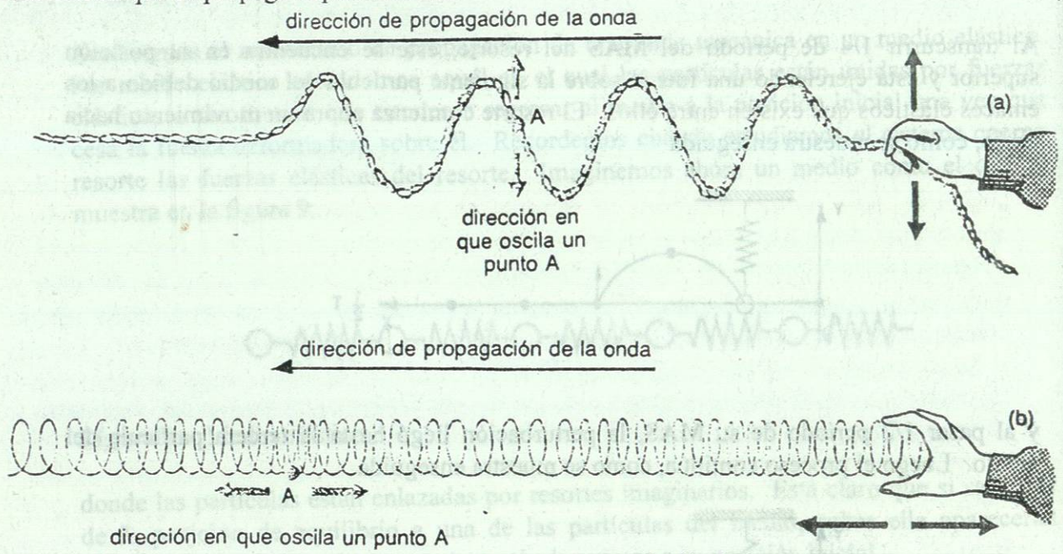


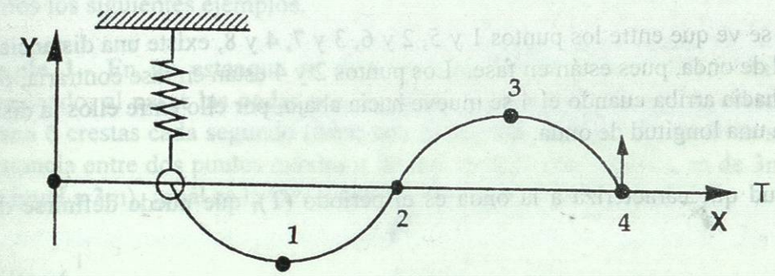
Figura 10. Tipos de onda: a) onda transversal b) onda longitudinal

Este caso, en que las partículas del medio oscilan en la misma dirección en que se propaga la perturbación (la onda) se denomina onda longitudinal. Observa que el carácter del movimiento es el mismo, cuando el resorte se comprime hacia la izquierda arrastra a la siguiente partícula del medio y cuando se estira hacia la derecha empuja a la partícula, provocando que el movimiento se propague aunque las partículas del medio sólo oscilan, con un movimiento armónico simple, cerca de sus posiciones de equilibrio. Las ondas de sonido, son ejemplo de onda mecánica longitudinal, ver figura 10b.

De este modo las ondas se clasifican, de acuerdo al tipo de movimiento que realizan las partículas del medio, en ondas transversales y ondas longitudinales.

3.- Magnitudes que caracterizan a las ondas

Analicemos de nuevo la figura, de la propagación de la perturbación en el espacio

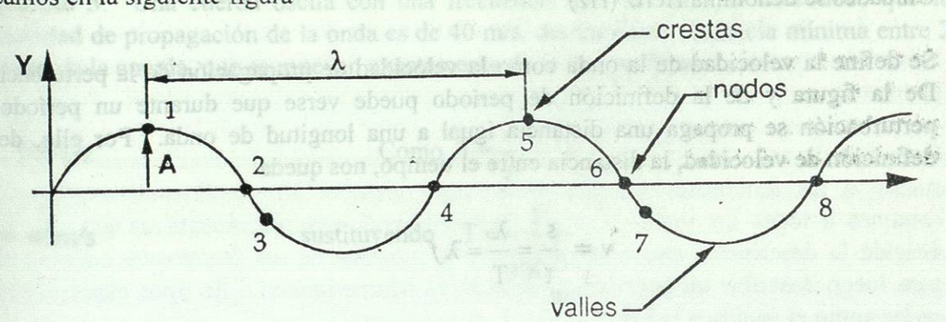


Observa que la partícula marcada con el número 4 va a realizar el mismo movimiento que la partícula del péndulo, pues comienza a moverse hacia arriba igual que el péndulo. Las partículas del medio que tienen, en todo momento del tiempo idéntico estado de movimiento se dice que están en fase. La fase es una magnitud, que depende del tiempo y de la posición, que caracteriza el estado de movimiento. Por eso, igual fase significa igual estado de movimiento.

Las partículas 1 y 3 tienen estados contrarios de movimiento, pues cuando la 1 está subiendo la 3 está bajando. En ese caso se dice que estas partículas están en oposición de fase, o que tienen fases contrarias.

Así podemos definir una magnitud que caracteriza a las ondas: la longitud de onda, designada generalmente con la letra griega λ. La longitud de onda se define como la distancia mínima entre dos puntos que tengan idéntico estado de movimiento, o sea que estén en fase. Recuerda que la longitud de onda es la distancia mínima, pues está claro que puntos que estén a distancias iguales a un número entero de longitudes de onda también tienen idéntico estado de movimiento. Por ello también se dice que para que dos puntos del medio estén en fase, entre ellos debe haber una distancia igual a un número entero de longitud de onda.

Veamos en la siguiente figura



que a las partes superiores de la onda se les llama crestas y a las partes inferiores valles. Los puntos que están en la posición de equilibrio, o sea cuyo desplazamiento es cero, se les llama nodos. La amplitud de la onda (A) es el máximo desplazamiento que alcanzan los puntos del medio, medido a partir de la posición de equilibrio.

En la figura se ve que entre los puntos 1 y 5, 2 y 6, 3 y 7, 4 y 8, existe una distancia igual a la longitud de onda, pues están en fase. Los puntos 2 y 4 están en fase contraria, pues el 2 se mueve hacia arriba cuando el 4 se mueve hacia abajo, por ello entre ellos la distancia no es igual a una longitud de onda.

Otra magnitud que caracteriza a la onda es el período (T), que puede definirse de dos formas:

1) Es el período del movimiento armónico simple que realizan las partículas del medio donde se propaga la onda.

2) Es el tiempo necesario para que la perturbación se propague una distancia igual a una longitud de onda.

Así mismo, la frecuencia de la onda puede definirse como:

1) Es la frecuencia del movimiento armónico simple que realizan las partículas del medio.

2) Es el número de crestas que pasan por un punto del medio en la unidad de tiempo.

De igual manera que para el MAS, la frecuencia y el período están relacionados así:

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

La unidad de la frecuencia son ciclos por segundo que en el Sistema Internacional de Unidades se denomina Hertz (Hz).

Se define la velocidad de la onda como la velocidad de propagación de la perturbación. De la figura y de la definición de período puede verse que durante un período la perturbación se propaga una distancia igual a una longitud de onda. Por ello, de la definición de velocidad, la distancia entre el tiempo, nos queda

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

La velocidad de propagación de la onda depende de las propiedades del medio. Así por ejemplo, en una cuerda, la velocidad de propagación depende de la tensión de la cuerda y de su densidad lineal de masa.

Veamos los siguientes ejemplos.

Ejemplo 1.- En un estanque se deja caer un objeto y se fija la vista en un punto determinado, al pasar las ondas por ese punto y contar el número de crestas, se observa que son 6 crestas cada segundo (tiene una frecuencia de 6 hertz); también se observa que la distancia entre dos puntos máximos de dos crestas consecutivas, es de 3m (longitud de onda igual a 3m), ¿cuál es la velocidad de propagación de la onda?

$f = 6\text{Hz} = 6\frac{1}{s}$ $\qquad v = \lambda f$

$\lambda = 3\text{m}$ $\qquad v = (3\text{m})\left(6\frac{1}{s}\right)$

$v = 18\text{m/s}$

Ejemplo 2. Si la velocidad del sonido es 340 m/s, ¿Cuál es la longitud de una onda sonora, cuya frecuencia es de 500 Hz?

$v = 340\frac{m}{s}$ $\qquad v = \lambda f$

$f = 500\text{ Hz} = 500\frac{1}{s}$ $\qquad \lambda = \frac{v}{f}$

$$\lambda = \frac{340\text{m/s}}{500\ 1/\text{s}}$$

$$\lambda = 0.68\text{m}$$

Ejemplo 3. Una cuerda oscila con una frecuencia de 100 Hz. Si se conoce que la velocidad de propagación de la onda es de 40 m/s, determina la distancia mínima entre 2 puntos de la cuerda, que se mueven exactamente de la misma forma.

$f = 100\text{ Hz}$ $\qquad$ Como $T = \frac{1}{f}$

$v = 40\text{m/s}$ $\qquad$ sustituyendo $T = \frac{1}{100\frac{1}{s}}$

$$T = 0.01\,s$$

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

$$\text{despejando} \quad \lambda = vT$$

$$\text{sustituyendo} \quad \lambda = \left(40\frac{m}{s}\right)(0.01\,s)$$

$$\lambda = 0.4\,m$$

Ejemplo 4. Una persona se coloca en el borde de un muelle y cuenta las ondas que golpean a cierto poste de dicho muelle en 30 s, contando 50 ondas. Si una cresta en particular viaja 8 m en 4 s. ¿Cuál es la longitud de onda de las ondas?

$$f = \frac{50 \text{ ondas}}{30\,s} \qquad \text{como} \quad v = \lambda f$$

$$f = 1.6\,Hz \qquad \text{despejando} \quad \lambda = \frac{v}{f}$$

$$v = \frac{8\,m}{4\,s} \qquad \text{sustituyendo} \quad \lambda = \frac{2\,m/s}{1.61/s}$$

$$v = 2\,m/s \qquad \lambda = 1.2\,m$$

4.- FENÓMENOS ONDULATORIOS

Los fenómenos ondulatorios son aquéllos en los cuales participan las ondas, independientemente de su tipo, y los cuales caracterizan la interacción de las ondas con la materia.

Cada tipo de onda, luz, sonido, ondas mecánicas, etc., tiene características específicas en cuanto a los fenómenos que presenta. Pero siempre hay características generales, comunes a todas las ondas en cada fenómeno. A estas características generales irá dirigida la descripción que a continuación se presenta de los fenómenos ondulatorios, para luego describir un poco más detallado el comportamiento de tipos específicos de ondas como el sonido o la luz.

Reflexión

Comencemos por el fenómeno más frecuente que presentan las ondas. Ya sabemos que la velocidad de propagación de la onda depende de las propiedades del medio por el cual se propaga. Es por esto que debemos preguntarnos que ocurre cuando la onda en su camino se encuentra con una frontera que separa dos medios de propiedades diferentes.

Cuando la onda llega a la frontera, una parte de la energía que transporta la onda, regresa al primer medio y otra parte penetra en el segundo medio. Si nos referimos a la energía que regresa al medio de donde viene la onda, estamos hablando del fenómeno de reflexión.

La reflexión siempre se presenta, cuando la onda llega a la superficie de separación entre dos medios de propiedades diferentes. Lo que varía de un caso a otro es la cantidad de energía que se refleja al primer medio. Se puede demostrar que mientras más diferentes sean las propiedades de los medios en contacto, mayor cantidad de energía se refleja.

Podemos comprobar la existencia del fenómeno cuando sujetamos una cuerda a una pared y desde el extremo contrario la hacemos oscilar, vemos que al llegar el pulso al extremo sujeto se refleja y regresa hacia nosotros. En este caso tenemos una onda que se desplaza en una sola dirección y por lo tanto la línea de propagación de la onda incidente y la onda reflejada es la misma.

En el caso de ondas, como por ejemplo las ondas en la superficie del agua, que se desplazan en dos dimensiones, se define el concepto de frente de onda como la superficie que une a los puntos a donde llega la perturbación al mismo tiempo. Los frentes de onda tienen las formas más diversas, pueden ser esféricos, o pueden ser planos, o de otra forma.

Asociado al concepto de frente de onda se define el concepto de rayo que es la dirección de propagación de la energía de la onda y es perpendicular al frente de onda, cuando el medio tiene las mismas propiedades en todos los puntos.

Así podemos enunciar la ley de reflexión de las ondas en la superficie de separación entre dos medios. Supongamos que el rayo llega a la superficie de separación entre dos medios ver figura 11, de tal manera que forma un ángulo θ con la normal a la superficie, este ángulo se llama ángulo de incidencia (θi). El rayo reflejado forma un ángulo θrx con la normal, que es el ángulo de reflexión. *La ley de reflexión señala que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.*