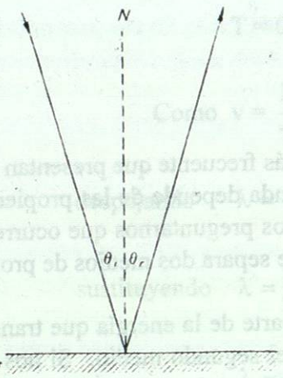

Figura 11. Reflexión

o sea $\theta i = \theta rx$

es la forma de escribir la ley de reflexión.

Debe señalarse que esta ley siempre se cumple, pero ocurre que sí la superficie es muy irregular (rugosa) no se observa exactamente su cumplimiento pues el rayo reflejado sale de puntos de la superficie con diferente orientación.

Refracción

La refracción es el fenómeno que se presenta cuando la onda pasa de un medio a otro de propiedades diferentes, o sea en este caso nos referimos a la parte de la energía que penetra al segundo medio.

Como los medios tienen diferentes propiedades, la velocidad de propagación de la onda será diferente en los dos medios. Así mismo será diferente también la longitud de onda, manteniendo constante la frecuencia. Debido al cambio en la velocidad ocurre una desviación en la dirección de propagación de la onda. Este cambio en la dirección de propagación viene determinado por la ley de la refracción.

Supongamos que un rayo de la onda llega a la superficie de separación entre dos medios con un ángulo de incidencia (θi), ver la siguiente figura12.

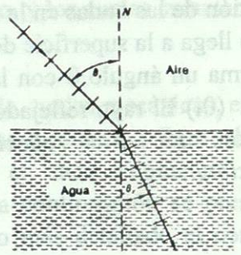

Figura 12. Refracción.

Al pasar al segundo medio, donde la onda se propaga con una velocidad(v_2), el rayo se desvía con respecto a la dirección que tenía en el primer medio, formando un ángulo con la normal a la superficie igual a θrc, llamado ángulo de refracción.

Si la velocidad de propagación en el primer medio es de v_1, entonces la relación entre los ángulos será

$$\frac{\operatorname{sen}\theta i}{\operatorname{sen}\theta rc} = \frac{v_1}{v_2}$$

y ésta es la expresión de la Ley de la refracción.

Como se ve el ángulo de refracción va a depender de las velocidades de propagación en los dos medios. Si v_1 es mayor que v_2 entonces, el ángulo de incidencia será mayor que el de refracción , que es el caso mostrado en la figura anterior.

Cuando estudiemos la Optica Geométrica, haremos un estudio más detallado de esta ley.

Superposición

En muchos casos ocurre que en un medio dado se están propagando al mismo tiempo más de una onda. Por ejemplo, que en un medio dado se estén propagando al mismo tiempo dos ondas. En este caso se observa que las ondas, pasan una por el mismo lugar donde pasa la otra, sin cambiar sus características.

En este caso surge la pregunta de ¿cual será el efecto resultante debido a la acción sobre los puntos del medio de ambas ondas a la vez?. Por ejemplo, sí en una cuerda se propagan al mismo tiempo dos ondas, ¿Cuál será el desplazamiento resultante de las partículas de la cuerda? A esta pregunta da respuesta el llamado *principio de superposición* que plantea:

Cuando dos o más ondas se propagan a través del mismo medio, el desplazamiento resultante en cualquier punto es la suma algebraica de los desplazamientos producidos por cada onda por separado.

Debe tenerse en cuenta que la suma de los desplazamientos es algebraica cuando los planos de oscilación de cada una de las ondas es el mismo.

El principio de superposición es el causante de que cuando la iluminación es baja en una habitación y encendemos otra lámpara, la iluminación resultante es mayor, ya que se

suman. Así mismo, cuando estamos escuchando la música que proviene de una bocina la intensidad será mayor sí conectamos otra bocina.

Interferencia

La interferencia es un caso de superposición, cuando las ondas que se superponen tienen las mismas características de frecuencia y longitud de onda.

En este caso puede ocurrir que sí las ondas se superponen de foma tal que las crestas y los valles de ambas ondas coinciden, la onda resultante tiene mayor amplitud, pues se suman los dos desplazamientos. Las ondas se dice que están en fase. A este caso se le denomina interferencia constructiva, ver figura 13.

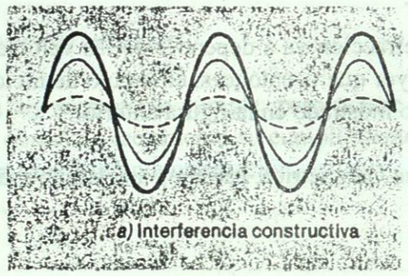

Figura 13. Interferencia constructiva.

Otro caso posible es que las crestas de una de las ondas coincidan con los valles de la otra y entonces, la onda resultante tiene una amplitud menor, pues los desplazamientos de cada onda se restan. Las dos ondas están en fases contrarias. A este caso se le denomina interferencia destructiva, ver figura 14.

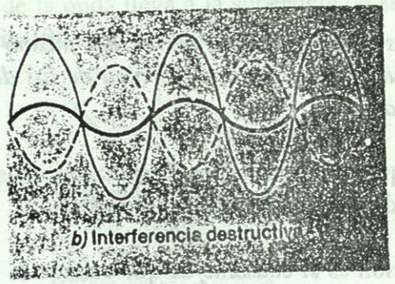

Figura 14. Interferencia destructiva.

La interferencia tiene mucha importancia para la aplicación práctica de las ondas, sobre todo en el caso de la interferencia de la luz, que se utiliza para mediciones de distancias, para construir filtros de colores, etc.

Difracción

La difracción es el fenómeno que se presenta cuando una onda encuentra un obstáculo, que no puede atravesar, y lo contornea o lo bordea, de modo que existe perturbación detrás del obstáculo. De esta forma la onda deja de propagarse en forma rectilínea y toma trayectorias curvas. Por ejemplo, las ondas producidas en el agua al pasar por una abertura, contornea los bordes de la misma, de forma que puede existir movimiento ondulatorio en la parte trasera de los bordes, ver figura 15.

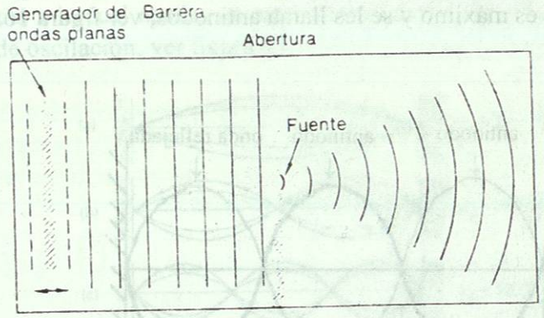

Figura 15. Difracción.

La difracción siempre ocurre pero se observa más claro sus efectos cuando las dimensiones del obstáculo son del mismo orden que la longitud de la onda. Esto puede comprobarse en el caso de las ondas sonoras que por tener longitud de onda del orden en metros puede apreciarse su difracción en puertas, ventanas, etc. Sin embargo las ondas luminosas sólo provocan difracción apreciable en obstáculos muy pequeños, ya que la longitud de onda es pequeña.

La difracción es un fenómeno típico de las ondas. Cuerpos materiales, que no tengan propiedades ondulatorias no pueden presentar difracción.

5. ONDAS ESTACIONARIAS

Vamos a analizar un caso particular de superposición de ondas, que es el caso de las ondas estacionarias.

Vamos a suponer que en un medio se propagan dos ondas de iguales características, (frecuencia, longitud de onda y amplitud), pero en sentido contrario. El medio puede ser por ejemplo una cuerda donde se propaguen dos ondas iguales, una hacia la derecha y otra hacia la izquierda.

En este caso ocurre que cada punto del medio va a tener una amplitud determinada, característica de cada punto. Así por ejemplo, existen puntos en los cuales el desplazamiento producido por una de las ondas es igual pero de signo contrario al producido por la otra, de forma tal que el desplazamiento resultante es cero. Entonces esos puntos no van a oscilar y se llaman nodos.

Existen puntos para los cuales el desplazamiento de ambas ondas tienen igual signo y por ello el desplazamiento resultante es máximo y se les llama antinodos, ver figura 16.

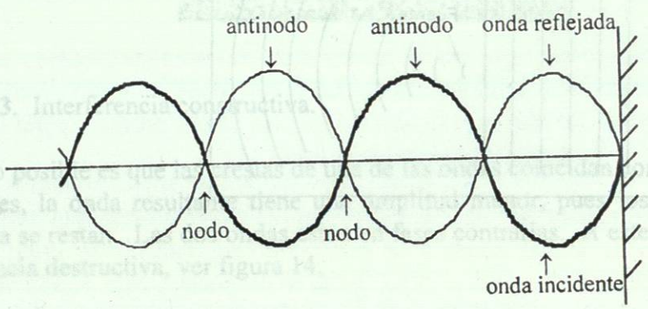

Figura 16. Onda estacionaria.

De esta forma que la onda estacionaria se produce al superponerse dos ondas de igual frecuencia y amplitud que se propagan en sentido contrario.

A la onda se le llama estacionaria porque parece como si no se desplazara. Debe tenerse en cuenta que en el medio no hay transporte neto de energía, ya que cada una de las ondas que se superponen transporta la misma cantidad de energía (ya que tienen iguales características), pero en sentido contrario.

La onda estacionaria resulta ser un método muy útil para la determinación experimental de la velocidad de propagación de las ondas en los medios, ya que la distancia entre dos nodos consecutivos es igual a la mitad de la longitud de onda, que así puede ser medida, y midiendo la frecuencia de oscilación de la onda se puede determinar la velocidad de propagación por la fórmula

$$v = \lambda f$$

Un método para producir ondas estacionarias es por reflexión. Se hace incidir una onda en una frontera y se superpone la onda incidente y la reflejada, que tienen iguales características y por ello se produce una onda estacionaria.

Este es el caso de una cuerda que tenga su extremo fijo y en la cual se propague una onda hacia el extremo. Cuando la onda incidente llegue al extremo, se refleja y se superponen la onda incidente y la reflejada, produciéndose la onda estacionaria.

Las oscilaciones de la cuerda en este caso puede ser de diferentes formas o modos, según la frecuencia a la cual oscile. A estas formas de oscilar de la cuerda se les llama modos normales de oscilación, ver figura 17.

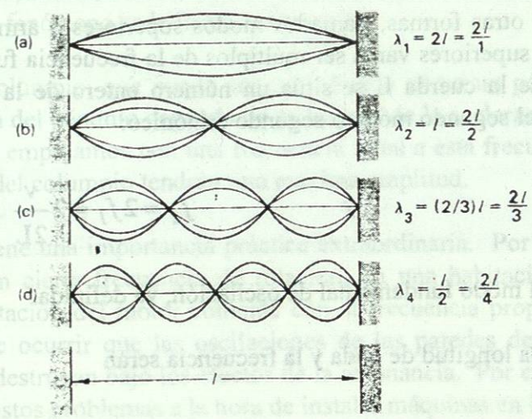

Figura 17. Modos de oscilación posibles para ondas estacionarias.

El modo fundamental de oscilación es aquél que tiene mayor amplitud y su longitud de onda es tal que en el largo de la cuerda L,está formada por una cresta o un valle (media longitud de onda)

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

La frecuencia de la onda siempre está relacionada con la longitud de onda por la fórmula:

$$v = \lambda f$$

despejando $f = \frac{v}{\lambda}$

por lo que la frecuencia del modo fundamental de oscilación será

$$f = \frac{v}{2L}$$

La cuerda puede oscilar en otras formas, llamados modos superiores o armónicos. Las frecuencias de estos modos superiores van a ser múltiplos de la frecuencia fundamental y en cada caso en el largo de la cuerda L se sitúa un número entero de la mitad de la longitud de onda. Así para el segundo modo o segundo armónico:

$$L = 2\frac{\lambda}{2} = \lambda \qquad \text{y} \qquad f_2 = 2f_1 = 2\frac{v}{2L}$$

Donde f_1 es la frecuencia del modo fundamental de oscilación, ya definida.

Para el modo de número n, la longitud de onda y la frecuencia serán

$$L = n\frac{\lambda}{2} \qquad f_n = nf_1 = n\frac{v}{2L}$$

Este es el caso de las oscilaciones de las cuerdas de los instrumentos musicales. Recuerda que las cuerdas de una guitarra, por ejemplo, está fija en ambos extremos y oscila a determinadas frecuencias de acuerdo a la música que se interpreta. Para variar la frecuencia el guitarrista varía el largo efectivo de la cuerda con lo cual, de acuerdo a las fórmulas anteriores, cambia la frecuencia del modo de oscilación.

Las ondas estacionarias en cuerdas pueden utilizarse para la determinación de la velocidad de propagación de las ondas, midiendo la longitud de onda y la frecuencia de oscilación.

6. RESONANCIA

Todos cuando niños tuvimos la oportunidad de empujar un columpio y sabemos que para determinada frecuencia de los impulsos que demos al columpio, éste se moverá con mayor o menor amplitud. Para determinada frecuencia el columpio oscilará con la máxima amplitud. Este es el fenómeno conocido con el nombre de resonancia.

Hemos analizado el movimiento armónico simple, en el cual suponíamos que el sistema no presenta agentes disipativos. Pero sabemos que en la práctica todos los sistemas presentan agentes que disipan energía por lo cual sí queremos que el sistema oscile durante mucho tiempo, tenemos que suministrarle energía periódicamente. Aquí ocurre que sí la energía es suministrada al sistema con una determinada frecuencia, la respuesta del sistema depende no sólo de la cantidad de energía suministrada sino también de la frecuencia con que se suministre.

Si la frecuencia del agente externo, que suministra la energía, coincide con una frecuencia propia del sistema, llamada frecuencia de resonancia, el sistema oscila con una máxima amplitud. A este fenómeno se le llama resonancia.

En el caso del columpio, que puede ser considerado como un péndulo, sabemos que la frecuencia propia del péndulo depende de su largo y de la aceleración de la gravedad, por lo que cuando lo empujamos con una frecuencia igual a esta frecuencia propia, entonces, las oscilaciones del columpio tendrán una máxima amplitud.

La resonancia tiene una importancia práctica extraordinaria. Por ejemplo, un motor que va a trabajar con cierta frecuencia de rotación, en una habitación determinada. Si la frecuencia de rotación del motor coincide con al frecuencia propia, de resonancia de la habtiación puede ocurrir que las oscilaciones de las paredes de la habitación sean tan grandes, que se destruyan bajo los efectos de la resonancia. Por ello los ingenieros deben tener en cuenta estos problemas a la hora de instalar máquinas en locales cerrados.

Así mismo en los aviones debe tenerse en cuenta que la frecuencia de giro de los motores no coincida con la frecuencia de resonancia de las otras partes del avión, pues de lo contrario lo destruiría.

Esto fue lo que ocurrió en el puente de Tacoma Narrows, en EE UU, en noviembre de 1940, un viento provocó que el puente comenzara a oscilar con una frecuencia de 36 Hz, el puente entró en resonancia con el viento, la amplitud de las oscilaciones se hizo muy grande y el puente se destruyó.

La resonancia también tiene efectos positivos. Por ejemplo, cuando sintonizamos una estación en nuestro radio o televisor, lo que estamos haciendo es hacer coincidir la frecuencia de resonancia de nuestro sistema (el radio) con la frecuencia del agente externo (la estación que queremos oír) y así logramos que la amplitud sea máxima o sea que se oiga bien. De hecho estamos provocando una resonancia del tipo eléctrica en este caso.

B.- SONIDO

1.- INTRODUCCIÓN

La acústica es la ciencia que estudia el sonido, en nuestro medio ambiente estamos rodeados por diferentes sonidos que percibimos o escuchamos, por ejemplo, el hablar o cantar, el golpear un diapasón, al tocar un instrumento musical, etc.

Si se coloca un dedo en el cuello al estar hablando, se sienten vibraciones de las cuerdas vocales; otro ejemplo es al golpear el diapasón, el cual vibra y al sumergir uno de sus extremos en el agua, ver fig. 18, se observa que salpican gotas de agua en todas direcciones, mostrando una fuente sonora (diapasón). El sonido es producido por una fuente en vibración.

En el sonido, la energía se transfiere desde la fuente en forma de ondas sonoras longitudinales. Por lo tanto, *el sonido es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico*. Para que se produzca una onda sonora se necesita: una fuente en vibración y un medio elástico a través del cual se pueda propagar la perturbación.

Un experimento sencillo que puede mostrar la necesidad de un medio elástico es cuando se coloca un reloj despertador en una campana de vacío y se pone a funcionar, extrayendo poco a poco el aire que hay dentro de la campana se observa que al accionar el timbre del reloj se va escuchando menos, conforme es menor la cantidad de aire, hasta que existe vacío y sólo se ve el reloj que está vibrando y no se escucha el timbre. Si se permite la entrada de aire, se vuelve a escuchar un poco el timbre del reloj y conforme se agrega más aire, se escuchará mejor, ver fig. 19. Por lo tanto el aire es el medio elástico que se necesita para transmitir el sonido.

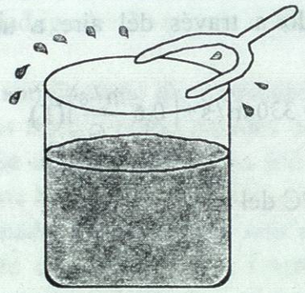

Figura 18. Salpicaduras del agua al introducir un diapasón vibrando.

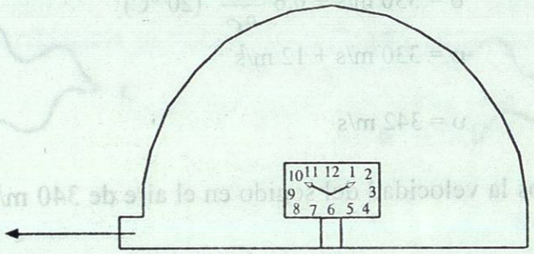

Figura 19. El timbre del reloj se escuchará cuando tenga aire la campana. El sonido no se propaga en el vacío.

El oído humano normal puede escuchar sonidos con frecuencia comprendida en el intervalo (audible) de 16 Hz a 20000 Hz. Si las ondas sonoras tienen una frecuencia menor a 16 Hz se les denomina infrasónicas. Si las ondas sonoras tienen una frecuencia mayor a 20000 Hz se denomina ultrasónicas.

2.- VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DEL SONIDO

Cuando observamos el destello de un relámpago, oímos después el trueno; si se observa a una persona a lo lejos hacer un movimiento de golpear un objeto, se oirá después el sonido causado, debido a que la velocidad de la luz es mayor (3×10^8 m/s) que la velocidad del sonido (340 m/s en el aire).

La velocidad del sonido es mayor en los sólidos (alrededor de 5000 m por segundo en el hierro) es menor en los líquidos (alrededor de 1500m por segundo en el agua) y mucho menor en los gases. En el aire el sonido viaja a 330 m/s a T = 0 °C, al aumentar la temperatura del aire, también aumenta la velocidad del sonido, alrededor de 0.6 m por segundo cada °C.