

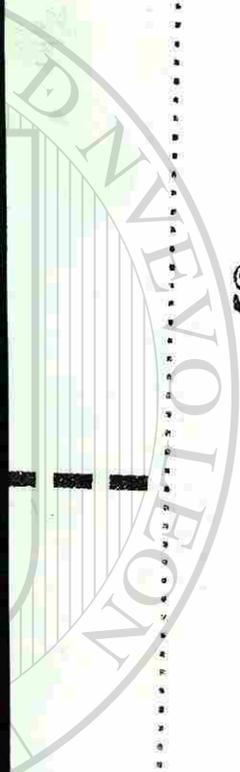
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
Secretaría Académica

M8

SEGUNDA PARTE

Texto

FISICA, PRIMERA EDICION 1995



JUAN

AD. AUTÓNOMA DE NUEVO

ÓN GENERAL DE BIBLIOTECA

Física

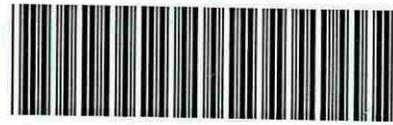
f

21
30
95
8
e.2

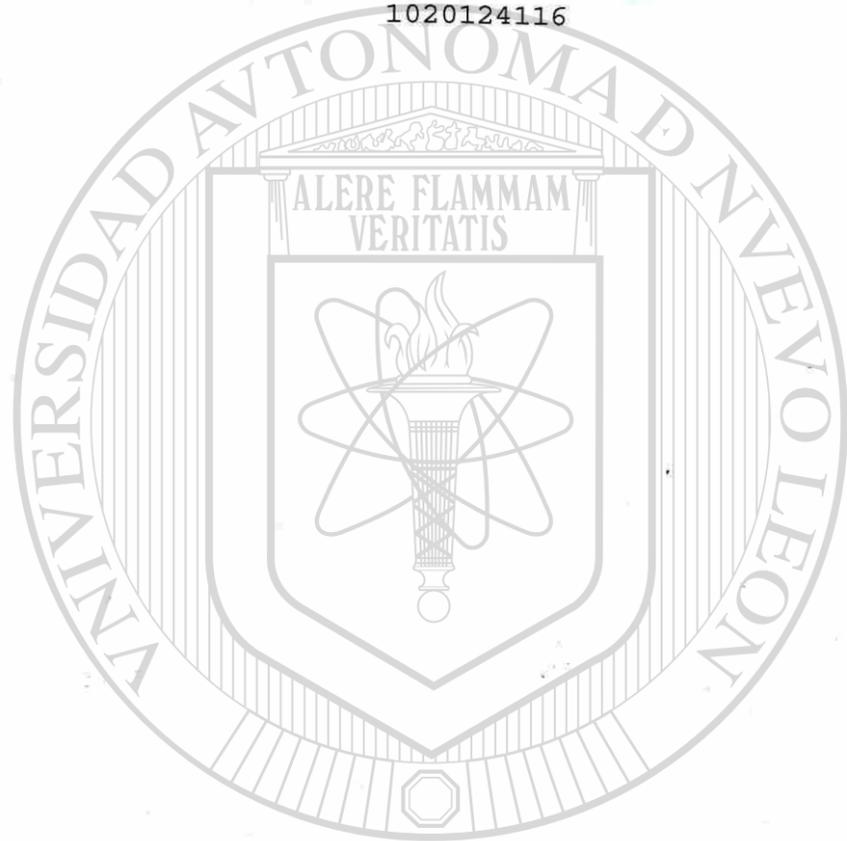
00
U5
19
v.
pt

Qc21
U530
1995
v.8
pte.2

0120-21160



1020124116



INDICE

A - MOVIMIENTO OSCILATORIO

Página	Contenido
1	Introducción
2	Movimiento periódico
3	Movimiento armónico simple
4	El péndulo simple
5	Corrosión

UNIDAD IV

MOVIMIENTO ONDULATORIO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



ÍNDICE

A.- MOVIMIENTO OSCILATORIO

	Página
1 Introducción	7
2 Movimiento periódico	7
3 Movimiento armónico simple	10
4 El péndulo simple	16
5 Cuerpo-resorte	20

B.- MOVIMIENTO ONDULATORIO

1 Introducción	25
2 Tipos de onda	26
3 Magnitudes que caracterizan a las ondas	29
4 Fenómenos ondulatorios	32
Reflexión	33
Refracción	34
Superposición	35
Interferencia	36
Difracción	37
5 Ondas estacionarias	38
6 Resonancia	41

C.- SONIDO

1 Introducción	42
2 Velocidad de propagación del sonido	43
3 Efecto Doppler	47
4 Ruido	52

D.- OPTICA

1 Introducción	53
2 Naturaleza de la luz	54
3 Velocidad de la luz	56
4 Fotometría	59
Flujo luminoso	61
Intensidad luminosa	62
Iluminación	63
5 Espectro electromagnético y espectro visible	67
6 Reflexión de la luz	71
7 Espejos planos	72
8 Espejo esférico	73
9 Rayos principales en espejos. Obtención de imágenes	75
10 Ecuación del espejo	76
11 Refracción de la luz	80
12 Reflexión interna total	83
13 Lentes	85
14 Rayos principales en lentes. Obtención de imágenes	87
15 Ecuación de las lentes	89
16 Dispositivos ópticos	91
17 Interferencia, Difracción y Polarización	94
Autoevaluación	100

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

IV.- MOVIMIENTO ONDULATORIO

OBJETIVO:

Al término de la unidad, el alumno:

- Explicará el comportamiento de las ondas
- Caracterizará las ondas
- Definir los siguientes tipos de movimiento
 - a) Periódico
 - b) Oscilatorio
 - c) Amortiguado
 - d) Forzado
 - e) Armónico simple.
- Explicará la forma en que se originan las ondas sonoras
- Comprenderá la propagación de las ondas sonoras
- Comprenderá la naturaleza de la luz
- Representará la formación de imágenes en los diferentes tipos de lentes
- Representará la combinación de las lentes en dispositivos ópticos.

METAS:

- Caracterizar el movimiento armónico simple
- Enunciar la Ley de Hooke
- Definir onda mecánica
- Diferenciar entre ondas longitudinales y transversales
- Explicar los conceptos:
 - a) longitud de onda
 - b) frecuencia
 - c) período
 - d) amplitud
 - e) desplazamiento

- f) fase
- g) reflexión
- h) refracción
- i) difracción
- j) interferencia
- k) polarización

- Resolver como mínimo cinco problemas relacionados con velocidad, período, longitud de onda y frecuencia.
- Caracterizar las ondas sonoras.
- Resolver como mínimo cinco problemas en donde se calcule la intensidad de la onda sonora.
- Identificar el efecto Doppler en situaciones cotidianas.
- Describir mediante esquemas el comportamiento y propagación de la luz
- Relacionar las características generales de las ondas con el comportamiento de las ondas de la luz.
- Describir los experimentos de Galileo, Roemer, Fizeau y Michelson para medir la velocidad de la luz.
- Explicar los conceptos de:
 - a) flujo luminoso.
 - b) intensidad luminosa
 - c) iluminación.
- Resolver un mínimo de seis problemas relacionados con el cálculo de flujo luminoso, intensidad luminosa e iluminación.
- Describir el espectro de la luz visible tomando como referencia la frecuencia y la longitud de la onda.
- Resolver como mínimo tres problemas relacionados con la frecuencia y la longitud de onda de la luz.
- Explicar el fenómeno de la polarización de la luz.
- Explicar con un dibujo las leyes de la reflexión de la luz.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

- Aplicar las leyes de la reflexión de la luz en la solución de un mínimo de cuatro problemas típicos.
- Establecer la Ley de Snell.
- Resolver como mínimo tres problemas en donde se aplique la Ley de Snell.
- Explicar algunos fenómenos naturales en donde se observe la reflexión y la refracción de la luz.
- Construir diagramas de rayos para determinar la posición de la imagen, caracterizándola como real o virtual, mediante el uso de lentes o espejos.
- Resolver un mínimo de seis problemas relacionados con lentes y espejos, en donde se determine la posición de la imagen, indicando si es real o virtual.
- Explicar el funcionamiento de algunos dispositivos ópticos.

A.-MOVIMIENTO OSCILATORIO

1.- Introducción:

En esta unidad consideraremos un tipo de movimiento en el cual la fuerza resultante que actúa sobre un objeto varía periódicamente. La fuerza puede variar en magnitud o en dirección.

Existen en la naturaleza acontecimientos cotidianos de este tipo de movimiento, por ejemplo: el movimiento de un péndulo, un satélite alrededor de la Tierra, el día y la noche, las fases de la luna, las estaciones del año, las mareas, el movimiento de un cuerpo suspendido en un resorte, el respirar y el latir del corazón

En el ejemplo del latir del corazón, cada 0.5s aproximadamente, se contrae, o sea cada vez que transcurre un tiempo igual a 0.5s el corazón se encuentra en iguales condiciones de movimiento.

Existen movimientos en los cuales el cuerpo va y viene por la misma trayectoria, repitiéndola todo el tiempo, por ejemplo el movimiento de un cuerpo suspendido de un resorte, el movimiento de los iones en un cristal, el movimiento de las cargas eléctricas en un circuito oscilador, etc.

El movimiento de un péndulo es un caso ideal, cuando consideramos despreciable la fuerza de fricción, de tal forma que oscilará indefinidamente. *Cuando actúa la fuerza de fricción en el péndulo que oscila, es el caso real, decae o disminuye el movimiento conforme se disipa la energía debido a la fricción, se le llama a este movimiento amortiguado. Cuando un agente externo por ejemplo una fuerza impulsora, suministra energía y el movimiento del péndulo es uniforme, a este movimiento se le llama forzado.*

Analizaremos el movimiento del péndulo que oscila, en donde los extremos de la oscilación están igualmente separados de la posición de equilibrio. ®

2.- Movimiento periódico

En muchos casos existen movimientos o procesos que tienen la característica de que al cabo de un tiempo fijo, repiten sus condiciones o estado de movimiento.

- Aplicar las leyes de la reflexión de la luz en la solución de un mínimo de cuatro problemas típicos.
- Establecer la Ley de Snell.
- Resolver como mínimo tres problemas en donde se aplique la Ley de Snell.
- Explicar algunos fenómenos naturales en donde se observe la reflexión y la refracción de la luz.
- Construir diagramas de rayos para determinar la posición de la imagen, caracterizándola como real o virtual, mediante el uso de lentes o espejos.
- Resolver un mínimo de seis problemas relacionados con lentes y espejos, en donde se determine la posición de la imagen, indicando si es real o virtual.
- Explicar el funcionamiento de algunos dispositivos ópticos.

A.-MOVIMIENTO OSCILATORIO

1.- Introducción:

En esta unidad consideraremos un tipo de movimiento en el cual la fuerza resultante que actúa sobre un objeto varía periódicamente. La fuerza puede variar en magnitud o en dirección.

Existen en la naturaleza acontecimientos cotidianos de este tipo de movimiento, por ejemplo: el movimiento de un péndulo, un satélite alrededor de la Tierra, el día y la noche, las fases de la luna, las estaciones del año, las mareas, el movimiento de un cuerpo suspendido en un resorte, el respirar y el latir del corazón

En el ejemplo del latir del corazón, cada 0.5s aproximadamente, se contrae, o sea cada vez que transcurre un tiempo igual a 0.5s el corazón se encuentra en iguales condiciones de movimiento.

Existen movimientos en los cuales el cuerpo va y viene por la misma trayectoria, repitiéndola todo el tiempo, por ejemplo el movimiento de un cuerpo suspendido de un resorte, el movimiento de los iones en un cristal, el movimiento de las cargas eléctricas en un circuito oscilador, etc.

El movimiento de un péndulo es un caso ideal, cuando consideramos despreciable la fuerza de fricción, de tal forma que oscilará indefinidamente. *Cuando actúa la fuerza de fricción en el péndulo que oscila, es el caso real, decae o disminuye el movimiento conforme se disipa la energía debido a la fricción, se le llama a este movimiento amortiguado. Cuando un agente externo por ejemplo una fuerza impulsora, suministra energía y el movimiento del péndulo es uniforme, a este movimiento se le llama forzado.*

Analizaremos el movimiento del péndulo que oscila, en donde los extremos de la oscilación están igualmente separados de la posición de equilibrio. ®

2.- Movimiento periódico

En muchos casos existen movimientos o procesos que tienen la característica de que al cabo de un tiempo fijo, repiten sus condiciones o estado de movimiento.

Se denomina movimiento periódico, a aquél en el que el sistema repite sus condiciones de movimiento, al cabo de cierto intervalo de tiempo, que va a ser constante, por ejemplo, el movimiento circular uniforme (estudiado en el Módulo VI), el movimiento del péndulo, el movimiento de un cuerpo suspendido en un resorte, el latir del corazón, etc.

Las magnitudes que describen el movimiento periódico son: el período (T) y la frecuencia (f). El período es el tiempo mínimo al cabo del cual se repiten las condiciones del proceso. En particular en el movimiento circular uniforme es el tiempo que tarda en dar una revolución completa. En general, en el movimiento periódico las condiciones del proceso se repiten cuando han realizado un ciclo o una oscilación completa. Siendo un ciclo o una oscilación completa cuando el cuerpo va de una posición extrema a otra y regresa a la posición inicial (o sea de la posición A a C y regresa a A, ver figura No. 1).

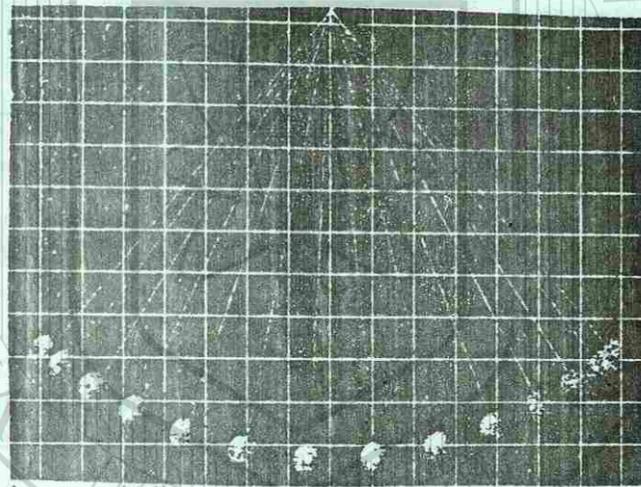


FIGURA 1 Movimiento periódico

La frecuencia se define como el número de veces que el proceso repite sus condiciones en la unidad de tiempo. Para calcular la frecuencia se necesita conocer las veces ciclos que el proceso repite sus condiciones en un tiempo cualquiera, entonces

$$f = \frac{\text{Número de ciclos}}{\text{tiempo}}$$

dado que f y T son magnitudes que caracterizan el mismo proceso, de tal forma que se relacionan entre sí

para un ciclo, nos quedaría $f = \frac{1}{\text{tiempo}}$

como el tiempo es el período (T), entonces $f = \frac{1}{T}$

quedando las dos magnitudes relacionadas de esta manera.

En el Sistema Internacional, la unidad de período es el segundo (s). La unidad de la frecuencia es el inverso del segundo ($\frac{1}{s}$), que se interpreta como ciclo/segundo u

oscilación/segundo. A la unidad del inverso del segundo se le llama Hertz (Hz), en honor del físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) descubridor de las ondas electromagnéticas. De tal manera que si un sistema tiene una frecuencia de 50 Hz, esto quiere decir que el proceso se repite 50 veces por segundo.

Ejemplo 1. El médico determina que el corazón del paciente está latiendo 120 pulsaciones en un minuto. Determina la frecuencia y el período de las pulsaciones.

Solución:

El corazón es el proceso, en este caso particular y realiza 120 pulsaciones (ciclos) en un minuto, interpretándose que repite sus condiciones 120 veces por minuto. Este dato es la frecuencia, pero expresada en ciclos por minuto

entonces $f = \frac{\text{numero de ciclos}}{\text{tiempo}}$

$$\text{sustituyendo } f = \frac{120 \text{ ciclos}}{60 \text{ segundos}} = 2 \frac{1}{s}$$

$$f = 2 \text{ Hz}$$

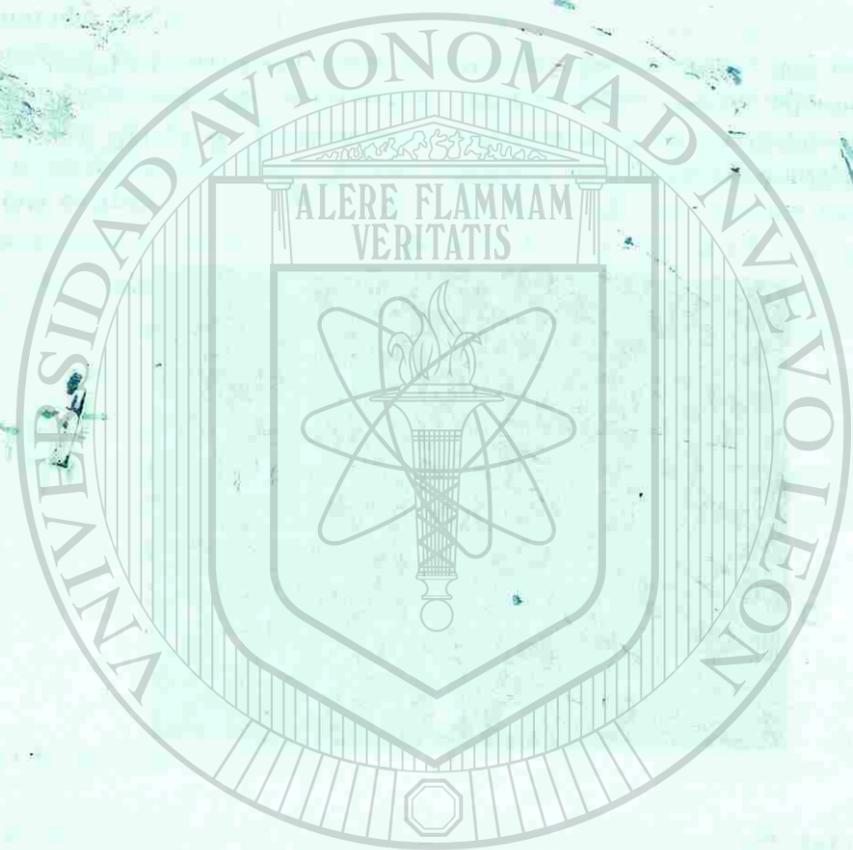
Como $T = \frac{1}{f}$

$$\text{sustituyendo } T = \frac{1}{2 \frac{1}{s}}$$

$$T = 0.5s$$

Ejemplo 2. Un cuerpo suspendido de un resorte tiene un período de oscilaciones de 4 segundos. Calcula la frecuencia de las oscilaciones de dicho cuerpo.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA

DIRECCIÓN GENERAL

externa, y lo soltamos, el cuerpo comienza a moverse hacia la posición de equilibrio, pero cuando llegue a ella va a seguir su movimiento por inercia, debido a la velocidad que posee, por lo cual el cuerpo va a moverse alejándose de la posición de equilibrio, hacia el otro lado, hasta que su velocidad sea cero, en los extremos de la oscilación, cuando su amplitud es máxima, ver fig.1 en la posición A o en B. Entonces cambia el sentido de movimiento y regresa hacia la posición, de equilibrio, pero de nuevo la pasa, llegando al extremo de la oscilación, realizando así una oscilación completa o ciclo. De este análisis se puede concluir que existe una fuerza que tiende a regresar al cuerpo a la posición de equilibrio y que provoca las variaciones de su velocidad. A la fuerza que hace oscilar a un cuerpo se le llama fuerza restauradora o de restitución.

De todos los procesos oscilatorios que existen vamos a estudiar el caso más sencillo. Si un sistema cualquiera, cumple con las siguientes condiciones:

1) Presenta una fuerza proporcional al desplazamiento y dirigida siempre hacia la posición de equilibrio, o sea que tiende a regresar al cuerpo a la posición de equilibrio, con un sentido contrario al desplazamiento:

$$F = -kx$$

donde x es el desplazamiento, medido desde la posición de equilibrio, k es la constante de proporcionalidad, que puede ser un valor o una expresión, que tenga un valor constante para el sistema dado, y el signo menos indica que la fuerza F y el desplazamiento x tienen sentido contrario.

2) No presente agentes disipativos, o sea, agentes que disipen energía por fricción u otra causa.

Entonces el sistema realiza un movimiento oscilatorio llamado movimiento armónico simple, lo abreviaremos por MAS.

El movimiento del péndulo que oscila a lo largo de un plano único en un arco pequeño es un ejemplo de movimiento armónico simple. Esto se puede visualizar considerando que, del objeto suspendido se hace escapar arena, al encontrarse oscilando trazará una línea recta de corta longitud una y otra vez, ver fig.2. Si hacemos oscilar el péndulo arriba de una banda que se mueve uniformemente en dirección perpendicular al plano del péndulo oscilante, trazará una curva senoidal o sinuosidad, en donde se considera el movimiento de la banda como la variable tiempo y el péndulo realizando un movimiento armónico simple, formándose una gráfica que nos representa la posición del péndulo con respecto al tiempo, entonces, la gráfica de posición contra tiempo del movimiento armónico simple es una curva senoidal, ver fig.2b.

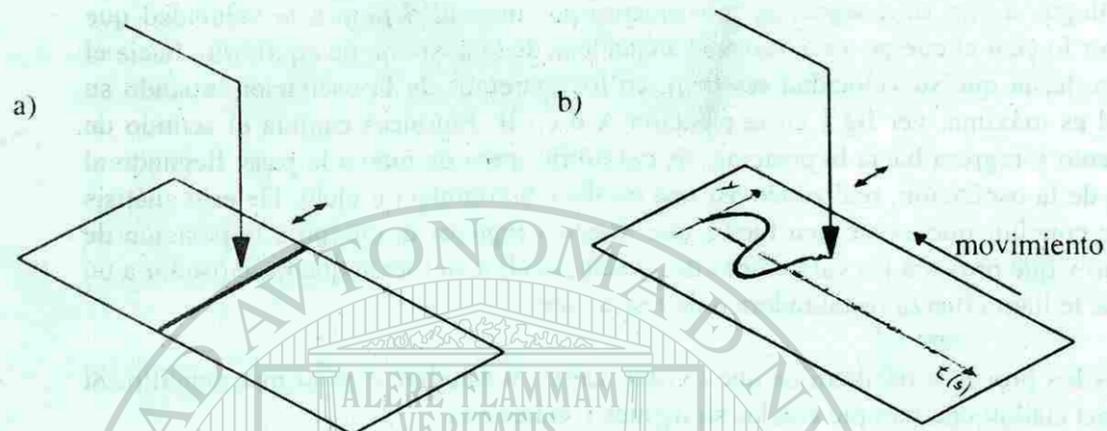


Figura 2. a) Línea recta de arena trazada por el péndulo al oscilar sobre la banda sin moverse. b) Curva senoidal o sinuoidal trazada por el péndulo cuando la banda se mueve uniformemente y en dirección perpendicular al plano de oscilación.

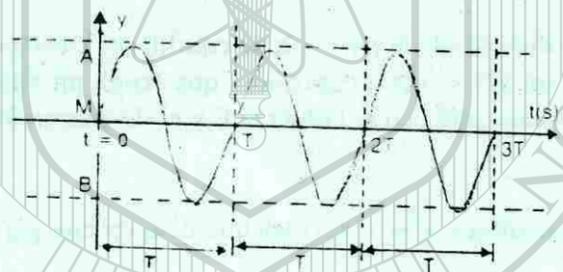


Figura 3. Gráfica de posición contra tiempo del movimiento armónico simple.

El nombre **MAS** proviene del hecho de que la posición del cuerpo queda determinada por una función armónica (seno o coseno) del tiempo.

Es importante destacar que en este caso, por primera vez, estudiamos el movimiento de un cuerpo bajo la acción de una fuerza variable. Por otra parte, a pesar de que la segunda condición, de la no presencia de agentes disipativos, puede parecer demasiado ideal, sí existen muchos sistemas que cumplen aproximadamente estas condiciones y por ello la importancia del estudio de este movimiento.

Ejemplos de estos sistemas, que pueden realizar un movimiento armónico simple, son: un péndulo cuando su desplazamiento desde la posición de equilibrio no es grande, un cuerpo suspendido de un resorte despreciando la fricción, las variaciones de la carga de un capacitor en un circuito compuesto por un inductor y un capacitor (sin resistencia), etc.

Analicemos el caso de un sistema mecánico, a partir de la Segunda Ley de Newton

$$F = ma$$

la fuerza debe ser proporcional al desplazamiento y en sentido contrario, entonces

$$F = -kx$$

sustituyendo

$$-kx = ma$$

despejando

$$a = -\frac{k}{m}x$$

A partir de la ecuación se observa que la aceleración del cuerpo no es constante, sino que depende de la magnitud del valor del desplazamiento x .

Dado que tanto k como m son positivas, se puede expresar el cociente k/m como una magnitud al cuadrado, o sea entonces

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

y por tanto

$$a = -\omega_0^2 x$$

a la magnitud ω_0^2 , se le llama frecuencia cíclica, o sea que un sistema, que tenga su aceleración en función del desplazamiento en la forma

$$a = -\omega_0^2 x$$

siempre que ω_0^2 sea una magnitud positiva y constante, realizará un movimiento armónico simple (MAS).

Analicemos el por qué de la magnitud llamada frecuencia cíclica, que nos recuerda el movimiento circular uniforme (módulo VI).

Suponiendo que tenemos un cuerpo realizando un movimiento circular uniforme, con velocidad angular constante ω_0 , en un círculo de radio R . Vamos a analizar la proyección de este movimiento en un eje cualquiera, por ejemplo el eje x . Esto sería lo mismo que si iluminamos el cuerpo en movimiento, a lo largo del plano del círculo, y observamos el movimiento de la sombra del cuerpo en una pantalla, (ver fig. 4). Lo anterior lo podemos obtener en un plato giratorio (tocadiscos) y colocando cuatro monedas sobre el borde e iluminando el aparato con una linterna colocada a la misma altura, de tal manera que la dirección del eje del rayo de luz de la linterna pase por el centro del plato giratorio. Al utilizar una pared como pantalla para proyectar la sombra del plato y las monedas. Se hace girar el plato a razón de 33 1/3 r.p.m. observando el movimiento de las monedas de la posición A a la B como un péndulo y la proyección en la pantalla como un movimiento armónico simple.

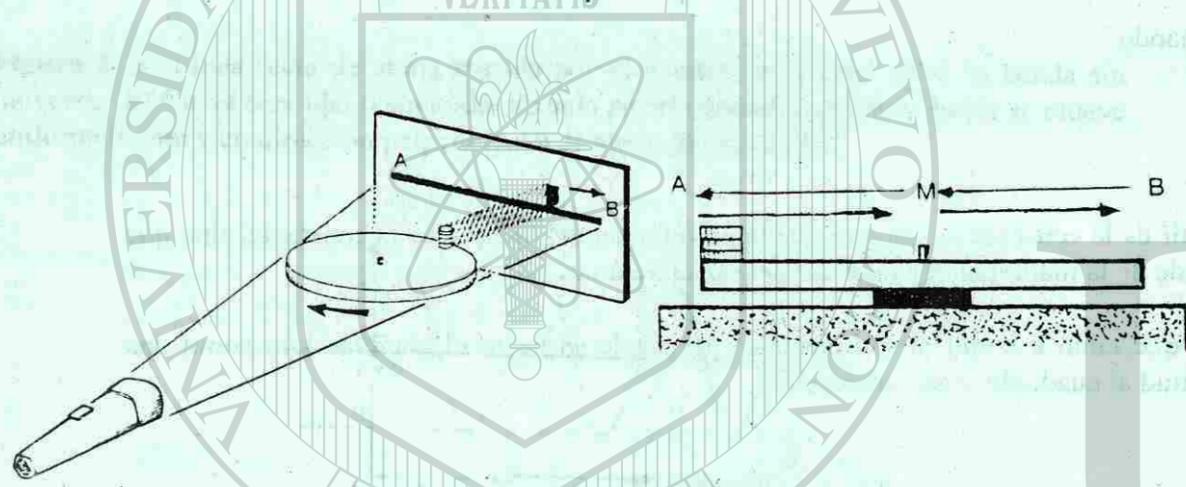


Figura 4. La sombra de las monedas colocadas sobre el borde del plato giratorio describe, sobre la trayectoria AB, un movimiento armónico simple.

Por lo anterior podemos interpretar un movimiento armónico simple como la proyección de un movimiento circular uniforme a lo largo de uno de sus diámetros. Esta interpretación es otra de las contribuciones hechas por Galileo, quien concluyó lo anterior al analizar el movimiento de una de las lunas de Jupiter en el año 1610. Tomando en cuenta esta analogía, determinaremos el período de oscilación de un péndulo simple.

A partir de la figura 5, se considera el plato giratorio como círculo de referencia, en donde la posición de la proyección del cuerpo, queda en función del radio R y del ángulo θ , como:

$$x = R \cos \theta$$

La aceleración a_x de la proyección del cuerpo, en función de la aceleración centrípeta ac y el ángulo θ será: $a_x = -ac \cos \theta$ donde el signo indica que el sentido de la aceleración es contrario al desplazamiento.

Analicemos el caso de un sistema mecánico, a partir de la Segunda Ley de Newton

$$F = ma$$

la fuerza debe ser proporcional al desplazamiento y en sentido contrario, entonces

$$F = -kx$$

sustituyendo

$$-kx = ma$$

despejando

$$a = -\frac{k}{m}x$$

A partir de la ecuación se observa que la aceleración del cuerpo no es constante, sino que depende de la magnitud del valor del desplazamiento x .

Dado que tanto k como m son positivas, se puede expresar el cociente k/m como una magnitud al cuadrado, o sea entonces

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

y por tanto

$$a = -\omega_0^2 x$$

a la magnitud ω_0 , se le llama frecuencia cíclica, o sea que un sistema, que tenga su aceleración en función del desplazamiento en la forma

$$a = -\omega_0^2 x$$

siempre que ω_0^2 sea una magnitud positiva y constante, realizará un movimiento armónico simple (MAS).

Analicemos el por qué de la magnitud llamada frecuencia cíclica, que nos recuerda el movimiento circular uniforme (módulo VI).

Suponiendo que tenemos un cuerpo realizando un movimiento circular uniforme, con velocidad angular constante ω_0 , en un círculo de radio R . Vamos a analizar la proyección de este movimiento en un eje cualquiera, por ejemplo el eje x . Esto sería lo mismo que si iluminamos el cuerpo en movimiento, a lo largo del plano del círculo, y observamos el movimiento de la sombra del cuerpo en una pantalla, (ver fig. 4). Lo anterior lo podemos obtener en un plato giratorio (tocadiscos) y colocando cuatro monedas sobre el borde e iluminando el aparato con una linterna colocada a la misma altura, de tal manera que la dirección del eje del rayo de luz de la linterna pase por el centro del plato giratorio. Al utilizar una pared como pantalla para proyectar la sombra del plato y las monedas. Se hace girar el plato a razón de 331/3 r.p.m. observando el movimiento de las monedas de la posición A a la B como un péndulo y la proyección en la pantalla como un movimiento armónico simple.

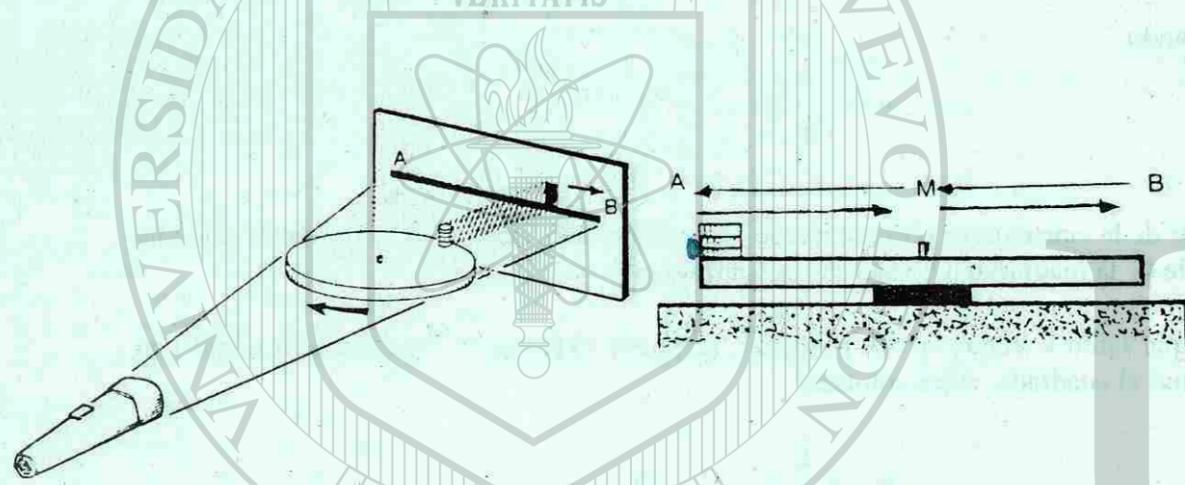


Figura 4. La sombra de las monedas colocadas sobre el borde del plato giratorio describe, sobre la trayectoria AB, un movimiento armónico simple.

Por lo anterior podemos interpretar un movimiento armónico simple como la proyección de un movimiento circular uniforme a lo largo de uno de sus diámetros. Esta interpretación es otra de las contribuciones hechas por Galileo, quien concluyó lo anterior al analizar el movimiento de una de las lunas de Jupiter en el año 1610. Tomando en cuenta esta analogía, determinaremos el periodo de oscilación de un péndulo simple. A partir de la figura 5, se considera el plato giratorio como círculo de referencia, en donde la posición de la proyección del cuerpo, queda en función del radio R y del ángulo θ , como:

$$x = R \cos \theta$$

La aceleración a_x de la proyección del cuerpo, en función de la aceleración centrípeta a_c y el ángulo θ será: $a_x = -a_c \cos \theta$ donde el signo indica que el sentido de la aceleración es contrario al desplazamiento.

Recordemos que la aceleración centrípeta, en función de la velocidad angular es:

$$a_c = \omega_0^2 R$$

sustituyendo

$$a_x = -\omega_0^2 R \cos \theta$$

sustituyendo

$$x = R \cos \theta$$

nos queda

$$a_x = -\omega_0^2 x$$

que coincide con la expresión de la aceleración del MAS, o sea que la proyección del movimiento circular uniforme de un cuerpo en un eje cualquiera, es un movimiento armónico simple. A este círculo se le denomina círculo de referencia, ver figura 5.

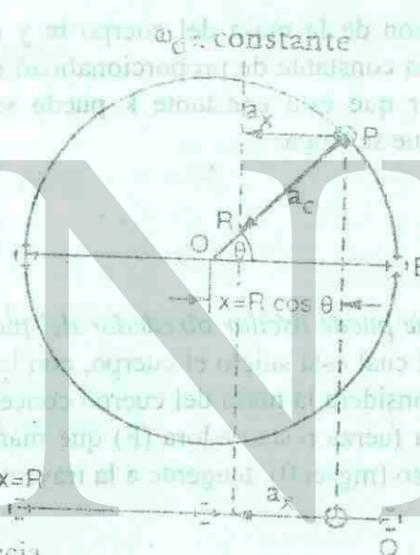


Figura 5. Círculo de referencia.

Ya podemos ver que la magnitud ω_0 es la velocidad angular del movimiento circular uniforme del círculo de referencia.

De este análisis vamos a obtener una expresión para el periodo del MAS. Recordemos del movimiento circular que

$$\omega_0 = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

donde f es la frecuencia y T es el periodo.

Como el período del movimiento circular uniforme del círculo de referencia y del MAS asociado son iguales podemos obtener

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

y como

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

por lo cual nos queda que al sustituir el período del MAS será

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

El período del MAS queda en función de la masa del cuerpo m y de la constante de proporcionalidad (k), siendo la misma constante de proporcionalidad entre la fuerza y el desplazamiento ($F = -kx$). Recordar que esta constante k puede ser un valor o una expresión, dependiendo del sistema que se tenga.

4.- El péndulo simple

El péndulo es todo cuerpo que puede oscilar alrededor del punto de suspensión. Es simple si consideramos el hilo del cual está sujeto el cuerpo, con longitud constante y de masa despreciable. También se considera la masa del cuerpo concentrada en un punto y oscilando en un plano vertical. La fuerza restauradora (F) que mantiene al cuerpo en oscilación es la componente de su peso ($mg \sin \theta$), tangente a la trayectoria. La fricción se considera despreciable.

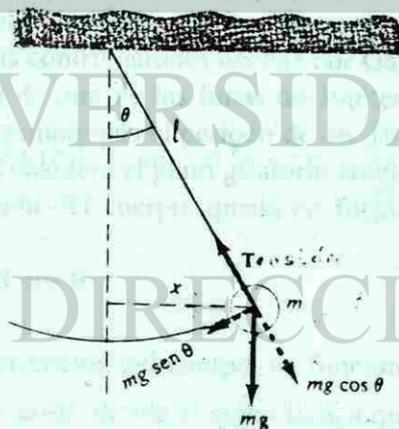


Figura 6. Péndulo simple.

Como $F = -mg \sin \theta$, entonces, se observa que la fuerza no es proporcional al desplazamiento, lo cual es necesario para el MAS.

Si θ es menor a 12° , entonces, los valores de $\sin \theta$ y θ rad son aproximadamente iguales, por lo tanto

$$\sin \theta \approx \theta \text{ rad} = \theta$$

entonces

$$F = -mg \theta$$

observándose que la fuerza es proporcional al desplazamiento (θ), por lo cual es un MAS

en donde

$$\theta = \frac{x}{l} \text{ de la figura 6.}$$

sustituyendo

$$F = -mg \frac{x}{l}$$

como m, g, l son constantes

$$\text{entonces } k = \frac{mg}{l}$$

como se dijo anteriormente, k puede ser una expresión como es este caso.

En el análisis del movimiento armónico simple se obtiene que el período (T) está en función de la masa (m) y la constante (k)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

sustituyendo

$$k = \frac{mg}{l}$$

se tiene

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\frac{mg}{l}}}$$

quedando

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

De este análisis se concluye que:

1) Si la longitud del péndulo es mayor, mayor será su período.

2) El período del péndulo no depende de su masa ni de la amplitud de oscilación, siempre que el ángulo sea pequeño ya que en la expresión de período no aparecen estas magnitudes.

El péndulo se aplica en geología, para determinar la aceleración de la gravedad la cual cambia por irregularidades en la superficie. Para un determinado lugar, se usa un péndulo de diseño especial para obtener con precisión el valor de la gravedad.

Ejemplo 4. Un péndulo simple de un geólogo tiene 37.10 cm de longitud y 0.8190 Hz de frecuencia en determinado lugar de la Tierra. ¿Cuál es la aceleración de la gravedad en ese lugar?

$f = 0.8190 \text{ Hz} = 0.8190 \frac{1}{\text{s}}$ Como $f = \frac{1}{T}$
 $l = 37.10 \text{ cm} = 0.371 \text{ m}$ entonces $T = \frac{1}{f}$
 sustituyendo $T = \frac{1}{0.8190} = 1.22 \text{ s}$
 entonces $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$
 despejando g, nos queda $g = \frac{4l\pi^2}{T^2}$

sustituyendo $g = \frac{4(0.371 \text{ m})(3.14)^2}{(1.22 \text{ s})^2}$
 $g = 9.83 \text{ m/s}^2$

Ejemplo 5. En el aeropuerto del Norte, en Monterrey, el valor de la aceleración de la gravedad reportado es de 9.7886 m/s^2 . Si se quiere construir un péndulo que tenga un período de oscilaciones de 2 segundos, determina que largo deberá tener el péndulo.

$g = 9.7886 \text{ m/s}^2$

$T = 2 \text{ s}$

Como

$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

despejando l , nos queda

$l = \left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 g$

sustituyendo

$l = \left(\frac{2 \text{ s}}{2(3.14)}\right)^2 (9.7886 \text{ m/s}^2)$

$l = 0.992 \text{ m}$

Ejemplo 6. Un péndulo de 2m de longitud está situado en un lugar donde $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Determine el período y la frecuencia de las oscilaciones

$l = 2 \text{ m}$

$g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Como

$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

sustituyendo

$T = 2(3.14) \sqrt{\frac{2 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2}}$

$T = 2.837 \text{ s}$

Como

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

sustituyendo

$f = \frac{1}{2.837 \text{ s}}$

$f = 0.352 \text{ Hz}$

5.- Cuerpo -resorte

El movimiento armónico simple se representa con un objeto que oscila en el extremo de un resorte, ver fig. 7. A continuación se analiza este tipo de movimiento, al considerar despreciable la masa del resorte, el movimiento es horizontal de tal forma que el objeto de masa (m) se desliza sin fricción sobre la superficie horizontal; en la dirección vertical la fuerza normal está en equilibrio con el peso (mg), por lo tanto no se consideran estas fuerzas. El resorte (en general) tiene una longitud determinada, la cual no ejerce fuerza sobre la masa (m), ver fig. 7 a, siendo la posición de equilibrio. Si la masa se mueve hacia la izquierda, comprimiendo el resorte, o hacia la derecha, estirándolo, el resorte ejerce una fuerza (F) sobre la masa que actúa en tal sentido que ésta trata de regresarlo a la posición de equilibrio; denominada fuerza de restitución. Se ha observado que la magnitud de la fuerza de restitución (F) es directamente proporcional al desplazamiento (x) en que se ha estirado o comprimido el resorte y de sentido contrario, o sea

$$F = -kx$$

en donde x es el desplazamiento que recorre el objeto cuando el resorte se estira o se comprime. Cuando su desplazamiento es máximo desde la posición de equilibrio, entonces, es igual a la amplitud (A) del movimiento y la constante de proporcionalidad (k) es la constante elástica del resorte, determinada por la rigidez del mismo.

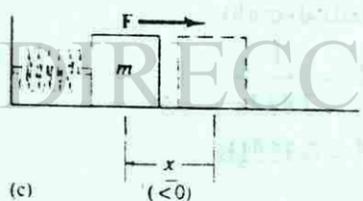


Figura 7. Movimiento armónico simple.

La ecuación $F = -kx$ es una relación que se conoce como la Ley de Hooke. Fue descubierta por Robert Hooke (1635-1703), se aplica en el comportamiento de resortes y otros cuerpos elásticos, siempre que su deformación no sea muy grande.

El resorte se estira y si en un momento dado ya no recupera su forma original, a este punto se le llama límite elástico. Todos los materiales elásticos, tienen su propio límite elástico.

A partir de la figura 7, se observa que al estirar el resorte una distancia $x=A$ inicialmente (fig 7b) y al soltarlo el resorte ejerce una fuerza sobre el objeto que tira de él hacia la posición de equilibrio conforme el objeto se acerca a la posición de equilibrio, la fuerza va disminuyendo. Pero debido a que la fuerza ha acelerado el objeto, pasa por la posición de equilibrio con cierta velocidad.

En realidad, cuando el objeto alcanza la posición de equilibrio, la fuerza que actúa sobre el objeto es cero, pero su velocidad en ese punto es máxima (fig. 7a). Al moverse más hacia la izquierda, la fuerza que actúa sobre el objeto trata de desacelerarlo, deteniéndolo en forma momentánea en $x=-A$. A continuación empieza a moverse hacia la posición de equilibrio, pasando de nuevo hasta alcanzar el punto donde $x=A$. Después repite el movimiento, de un lado a otro, en forma simétrica entre $x=A$ y $x=-A$. El objeto realizará un ciclo en su movimiento completo de ida y vuelta desde un punto inicial, por ejemplo desde $x=A$ hasta $x=-A$, y regresa $x=A$. El período (T) se define como el tiempo necesario para un ciclo completo y la frecuencia es el número de ciclos completos por segundo, es decir

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

Recordando que el período (T), en el MAS, también se puede expresar como

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Veamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo 7. Un resorte, está sujeto en uno de los extremos de la pared y del otro extremo tiene un objeto cuya masa es 0.300 kg. A continuación se estira 10 cm a partir del punto de equilibrio, aplicando una fuerza de 1.96 N. Calcula a) la constante elástica (k) del resorte b) El período del sistema c) La frecuencia del sistema

$$m = 0.300 \text{ kg}$$

$$x = 10 \text{ cm} = 0.10 \text{ m}$$

$$F = 1.96 \text{ N}$$

a) Como

$$F = kx$$

despejando

$$k = \frac{F}{x}$$

sustituyendo

$$k = \frac{1.96 \text{ N}}{0.10 \text{ m}}$$

$$k = 19.6 \text{ N/m}$$

b) Como

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

sustituyendo

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{0.300 \text{ kg}}{19.6 \text{ N/m}}}$$

$$T = 0.78 \text{ s}$$

c) Como

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

sustituyendo

$$f = \frac{1}{0.78 \text{ s}}$$

$$f = 1.28 \text{ Hz}$$

La energía potencial asociada con un objeto sujeto en el extremo de un resorte, es debido a que cuando se comprime o se estira el resorte y al soltarlo puede efectuar un trabajo sobre el objeto.

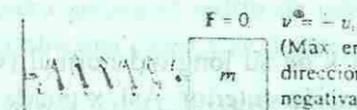
Para calcular la energía potencial del resorte comprimido, sólo se necesita calcular el trabajo necesario para comprimirlo, o el trabajo que efectúa al soltarlo. En ambos casos el trabajo efectuado es

$$W = Fx$$

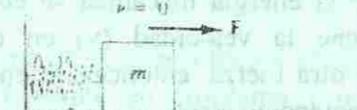
siendo la fuerza (F), la fuerza de restauración o de restitución del resorte ($F = -kx$); x es el desplazamiento que se estira desde su posición de equilibrio.



(a) $x=0$ $x=A$



(b) $x=0$



(c) $x=0$ $x=A$



(d) $x=0$



(e) $x=0$ $x=A$

Figura 8. La energía cambia de cinética a potencial, y viceversa, al oscilar el resorte con el objeto.

La Fuerza (F) varía con esa distancia x, siendo mayor F cuando más se estira el resorte. La fuerza varía desde cero cuando el resorte no está estirado, su posición de equilibrio (ver fig.8a), hasta kx cuando está completamente estirado, la fuerza promedio se considera

como $\frac{1}{2} kx$. El trabajo efectuado, entonces es

$$W = \left(\frac{1}{2} kx \right) (x)$$

$$W = \frac{1}{2} kx^2$$

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

$$EP \text{ elástica} = \frac{1}{2} kx^2$$

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 equilibrio (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.

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

$$EP \text{ elástica} = \frac{1}{2} kx^2$$

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 equilibrio (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 aquellas 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.

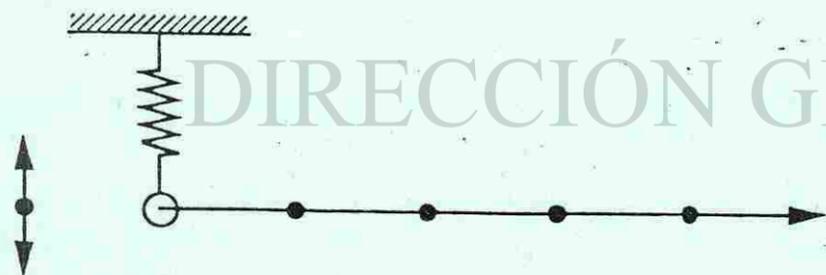
Analicemos el mecanismo de propagación de una onda mecánica en un medio elástico. Por medio elástico entendemos aquél en el cual las partículas están unidas por fuerzas elásticas o sea fuerzas que tienden a regresar al medio a la posición inicial una vez que cesa la fuerza deformadora sobre él. Recordemos 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.

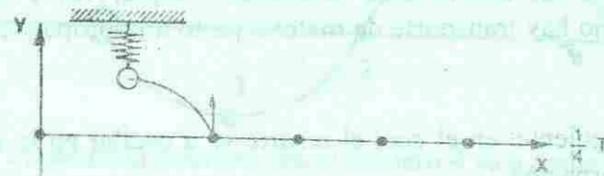
donde las partículas están enlazadas por resortes imaginarios. Está claro que si sacamos de la posición de equilibrio a una de las partículas del medio, sobre ella aparecerán fuerzas que tienden a hacer que la partícula regrese a su posición inicial.

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

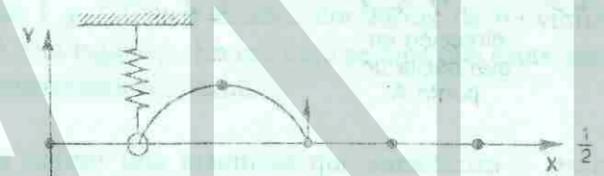


donde ya no se muestran los resortes que unen a las partículas entre sí, pero que siguen existiendo. Por otra parte supongamos que las partículas solo pueden moverse en la dirección mostrada, o sea hacia arriba o hacia abajo pero no a la derecha o a la izquierda.

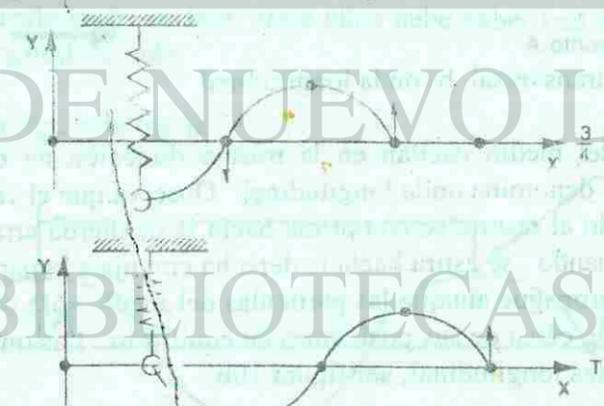
Supongamos que el resorte es sacado de su posición de equilibrio por un impulso hacia arriba. Está claro, de lo estudiado en el tema anterior que el resorte va a realizar un movimiento armónico simple, pero que este movimiento se va a transmitir por todo el medio, como se muestra en la figura



Al transcurrir $1/4$ de periodo 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 $1/2$ periodo 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

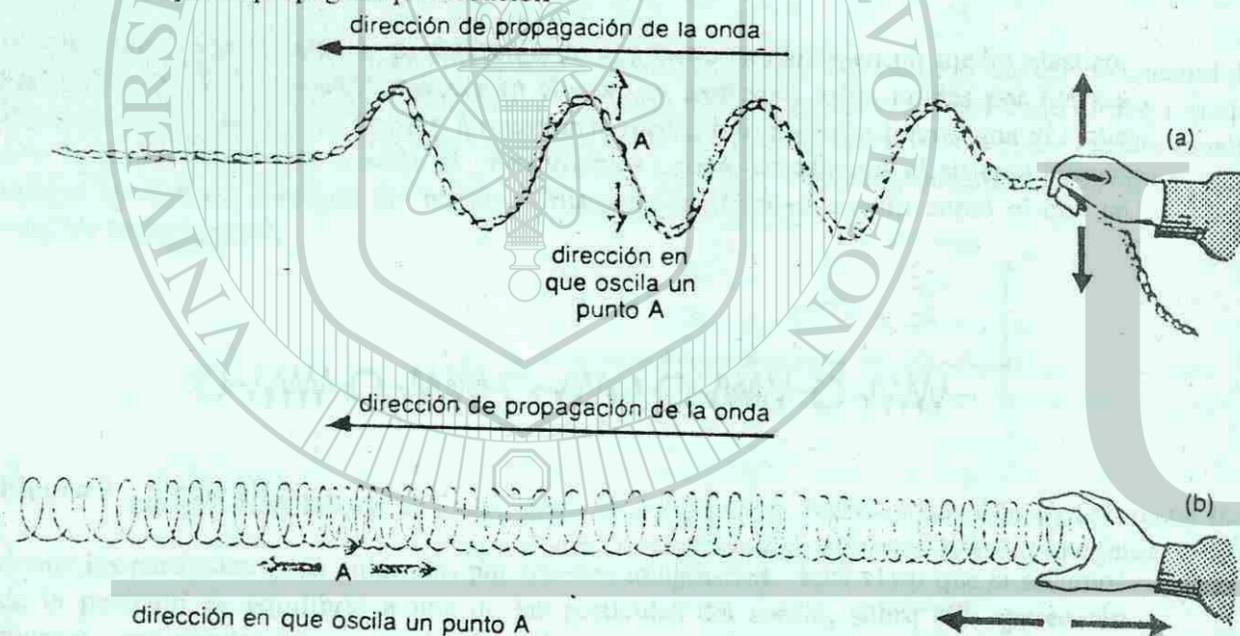


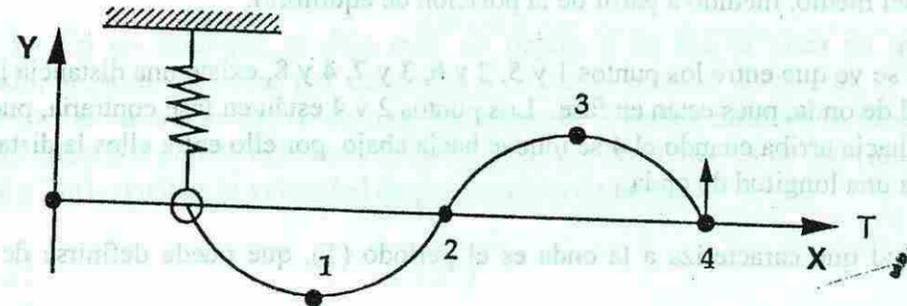
Figura 10. Tipos de onda: a) onda transversal b) onda longitudinal

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

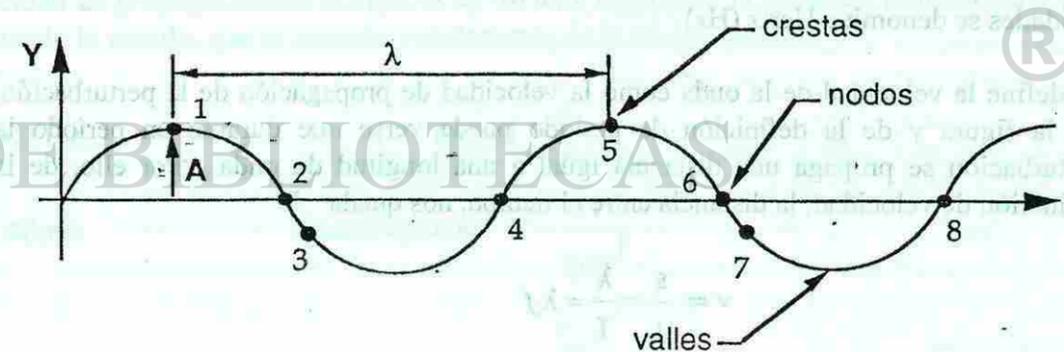


Observa que la partícula marcada con el número 4 va a realizar el mismo movimiento que la partícula del péndulo, pues comienza a moverse hacia arriba igual que el péndulo. Las partículas del medio que tienen, en todo momento del tiempo idéntico estado de movimiento se dice que están en fase. La fase 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?

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

$$v = \lambda f$$

$$\lambda = 3\text{m}$$

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

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

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?

$$v = 340 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = \lambda f$$

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

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

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

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

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.

$$f = 100\text{ Hz}$$

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

$$v = 40\text{m/s}$$

$$\text{sustituyendo } T = \frac{1}{100 \frac{1}{s}}$$

$$T = 0.01s$$

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

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

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

$$\lambda = 0.4m$$

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?

$$f = \frac{50 \text{ ondas}}{30 \text{ s}}$$

$$f = 1.6 \text{ Hz}$$

$$v = \frac{8 \text{ m}}{4 \text{ s}}$$

$$v = 2 \text{ m/s}$$

$$\text{como } v = \lambda f$$

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

$$\text{sustituyendo } \lambda = \frac{2 \text{ m/s}}{1.61/s}$$

$$\lambda = 1.2 \text{ m}$$

4.- FENÓMENOS ONDULATORIOS

Los fenómenos ondulatorios son aquellos 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 (θ_i). El rayo reflejado forma un ángulo θ_r 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.*

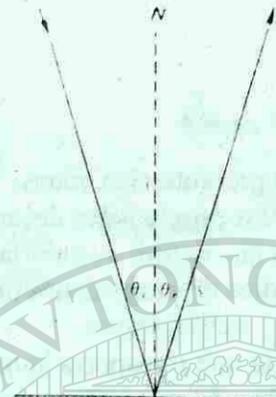


Figura 11. Reflexión

o sea

$$\theta_i = \theta_r$$

es la forma de escribir la ley de reflexión.

Debe señalarse que esta ley siempre se cumple, pero ocurre que si 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 (θ_i), ver la siguiente figura 12.

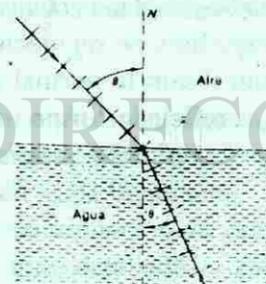


Figura 12. Refracción.

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 θ_r , llamado ángulo de refracción.

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

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

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.

Quando estudiemos la Óptica 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, si 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:

Quando 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 si 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 si las ondas se superponen de forma 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.

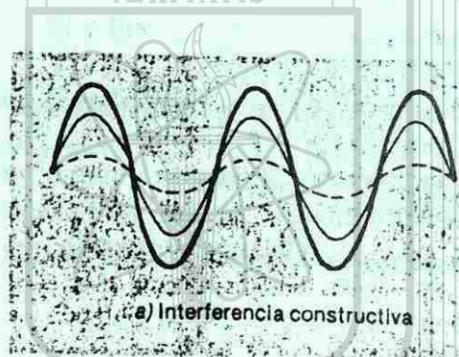


Figura 13. Interferencia constructiva.

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.

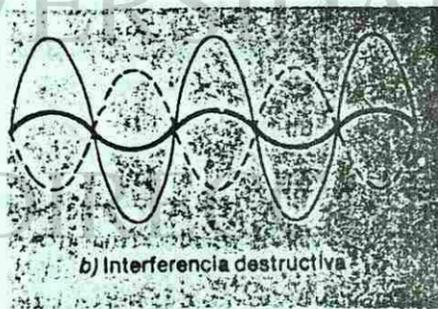


Figura 14. Interferencia destructiva

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.

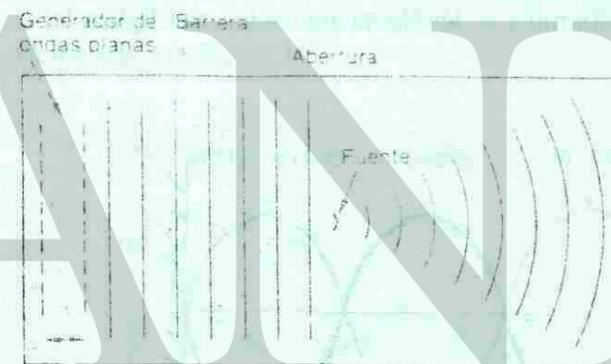


Figura 15. Difracción.

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.

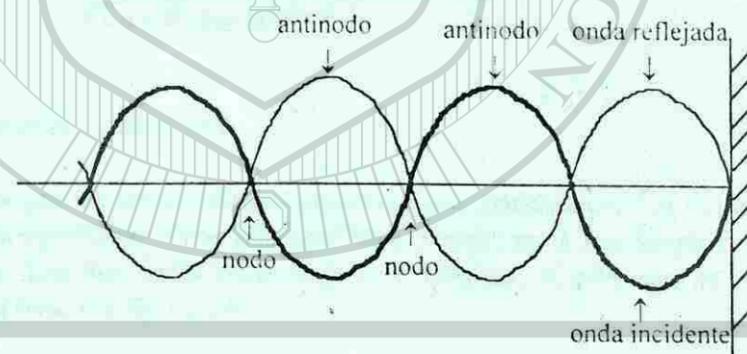


Figura 16. Onda estacionaria.

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

$$v = \lambda \cdot f$$

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.

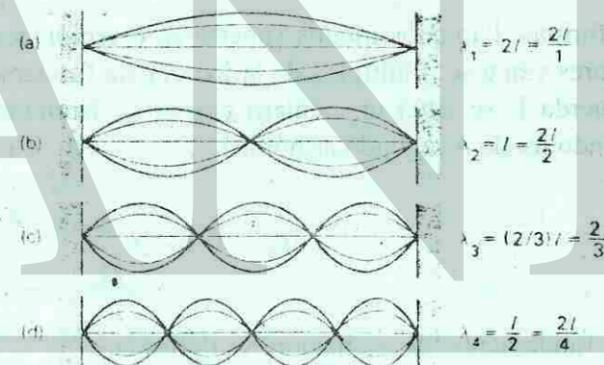


Figura 17. Modos de oscilación posibles para ondas estacionarias.

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:

$$v = \lambda \cdot f$$

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:

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

$$f_2 = 2f_1 = 2 \cdot \frac{v}{2L}$$

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

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

$$f_n = n f_1 = n \cdot \frac{v}{2L}$$

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 si queremos que el sistema oscile durante mucho tiempo, tenemos que suministrarle energía periódicamente. Aquí ocurre que si 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 la frecuencia propia, de resonancia de la habitación puede ocurrir que las oscilaciones de las paredes de la habitación sean tan grandes, que se destruyan bajo los efectos de la resonancia. Por eso 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 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.

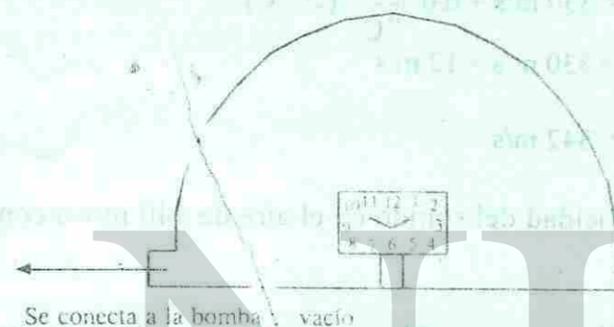


Figura 19. El timbre del reloj se escuchará cuando tenga aire la campana. El sonido no se propaga en el vacío.

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 infrasonicas. 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, se ve el objeto primero y se oír 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 $T = 0^\circ\text{C}$. al aumentar la temperatura del aire, también aumenta la velocidad del sonido, alrededor de 0.6 m por segundo cada $^\circ\text{C}$.

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 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.

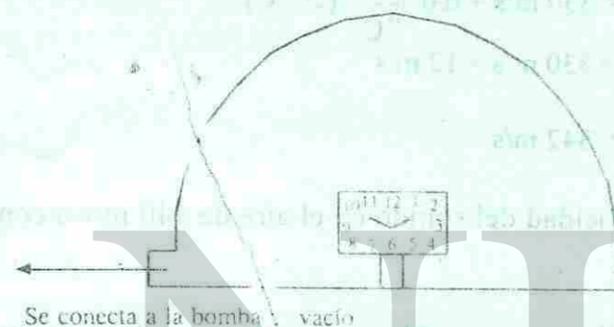


Figura 19. El timbre del reloj se escuchará cuando tenga aire la campana. El sonido no se propaga en el vacío.

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 infrasonoras. 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, se ve el objeto primero y se oír 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 1500 m por segundo en el agua) y mucho menor en los gases. En el aire el sonido viaja a 330 m/s a $T = 0^\circ\text{C}$. al aumentar la temperatura del aire, también aumenta la velocidad del sonido, alrededor de 0.6 m por segundo cada $^\circ\text{C}$.

La velocidad del sonido a través del aire a una temperatura T puede calcularse a partir de

$$v = 330 \text{ m/s} + \left(0.6 \frac{\text{m/s}}{^\circ\text{C}}\right)(T)$$

donde T es la temperatura en $^\circ\text{C}$ del aire.

Veamos el siguiente ejemplo

Ejemplo 1. Calcular la velocidad del sonido en el aire a una temperatura de 20°C .

$$v = 330 \text{ m/s}$$

$$v = 330 \text{ m/s} + 0.6 \frac{\text{m/s}}{^\circ\text{C}} (20^\circ\text{C})$$

$$T = 20^\circ\text{C}$$

$$v = 330 \text{ m/s} + 12 \text{ m/s}$$

$$v = 342 \text{ m/s}$$

Consideraremos la velocidad del sonido en el aire de 340 m/s a condiciones normales.

Un experimento sencillo que se puede realizar para medir la velocidad del sonido es colocándose una persona a 1 Km de distancia con una pistola (usada para las marcas de salida en pruebas atléticas) con cartuchos de salva para poder ver el fogonazo y medir el tiempo que tarda el sonido en llegar se repite el experimento 3 veces para obtener el tiempo promedio, con la fórmula de $v = d/t$ se obtiene un valor muy aproximado al valor teórico de la velocidad del sonido. Se puede usar el sonido para calcular la profundidad de un desfiladero, si se mide el tiempo que tarda un sonido (aplaudir, gritar) en recorrer la distancia hasta el fondo y regresar.

Los barcos usan el aparato sonar para medir a que distancia se encuentran objetos abajo del agua, si se produce una señal sonora de frecuencia alta. A partir del tiempo entre la emisión de la señal y su regreso, se calcula la distancia al objeto. Cuando se utiliza para medir la profundidad, a menudo se le da el nombre de sonda acústica.

Los cohetes y aviones de propulsión a chorro tienen velocidades mayores que la velocidad del sonido. A veces su velocidad se mide en "número de mach". El número de mach de un objeto se obtiene al dividir su velocidad entre la

velocidad del sonido en el aire. Si su velocidad fuera mach 2, significa que el objeto viaja con una velocidad igual a 2 veces la velocidad del sonido en el aire.

Por su naturaleza el sonido tiene las propiedades de las ondas. Se reflejan las ondas sonoras en objetos rígidos como paredes de una habitación, llamándose eco al reflejo del sonido. Se difractan las ondas sonoras a través de una abertura pequeña (una ventana) de una habitación, esparciéndose el sonido. La interferencia de dos ondas de sonido puede ejemplificarse con dos bocinas colocadas como muestra la figura 20a, para una interferencia constructiva, se escuchará mejor. Para una interferencia destructiva, se escucha menor o no se escucha, ver figura 20b.



Figura 20. Las bocinas A y B interfieren en sus ondas sonoras. a) constructivamente b) destructivamente. La línea continua representa el sonido resultante.

El oído humano detecta las características de las ondas sonoras y se conocen como: tono, timbre y sonoridad.

El tono es la frecuencia de la onda. es decir a mayor frecuencia el sonido es más alto o agudo, a menor frecuencia el sonido es más bajo o grave.

El timbre es la calidad de las ondas sonoras (combinación de frecuencias) y es característico de cada instrumento o de cada persona.

La sonoridad o intensidad describe la amplitud de la onda. se mide en decibeles y determina si un sonido es fuerte o débil.

La intensidad (I) de la onda es la relación de la potencia por unidad de área y expresa el flujo de transferencia de energía acústica a través de un área de sección transversal a la dirección de propagación. Sus unidades en el Sistema Internacional de la potencia son watts (W) y el área en metros cuadrados (m^2).

El intervalo de intensidad audible por el oído humano es entre $1 W/m^2$ y $10^{-12} W/m^2$, llamándose los extremos umbral de dolor y umbral audible, respectivamente. Si la intensidad es mayor a $1 W/m^2$, el oído tiene una sensación dolorosa en lugar de captar las ondas de sonido, ver figura 21. Es frecuente que en Acústica al umbral audible lo nombren el cero estándar de la intensidad del sonido ($I_0 = 10^{-12} W/m^2$ para una frecuencia de 1000 Hz). El nivel de intensidad (NI) es la medida de la intensidad del sonido en relación con el cero standard de la intensidad, es decir, es el volumen sonoro con una escala arbitraria en relación con la sensación de sonoridad. Su unidad es el bel (B).



Figura 21. Niveles de intensidad de algunos sonidos.

Se representa el nivel de intensidad (NI) por la fórmula $NI = \text{Log} \frac{I}{I_0}$ en bel.

Por ser el bel una unidad grande, la unidad decibel es la más usada y $1 \text{ bel} = 10 \text{ decibeles (dB)}$, quedando

$$NI = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0} \text{ en decibeles}$$

Veamos los siguientes ejemplos.

Ejemplo 2. Si un sonido tiene una intensidad de $5 \times 10^{-8} W/m^2$. ¿Cuál es el nivel de intensidad en dB?

$$I = 5 \times 10^{-8} W/m^2 \quad NI = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0}$$

$$I_0 = 1 \times 10^{-12} W/m^2 \quad NI = 10 \text{Log} \frac{(5 \times 10^{-8} W/m^2)}{(1 \times 10^{-12} W/m^2)}$$

$$NI = 10 \text{Log} (5 \times 10^4) = 10 (4 + \text{Log} 5)$$

$$NI = 10 (4 + 0.699) = 46.99 \text{ dB}$$

Ejemplo 3. Calcular el nivel de intensidad en decibeles un sonido, si su intensidad está en el umbral de dolor ($1 W/m^2$).

$$I = 1 W/m^2 \quad NI = 10 \text{Log} \frac{I}{I_0}$$

$$I_0 = 1 \times 10^{-12} W/m^2 \quad NI = 10 \text{Log} \frac{(1 W/m^2)}{(1 \times 10^{-12} W/m^2)}$$

$$NI = 10 \text{Log} 10^{12}$$

$$NI = 10 (12)$$

$$NI = 120 \text{ dB}$$

3.- EFECTO DOPPLER

Si una fuente sonora está inmóvil y un observador (receptor) inmóvil también está a una cierta distancia, la frecuencia con la que percibirá las ondas el observador será la misma con la que fueron emitidas por la fuente. Si tomamos como ejemplo una sirena de una ambulancia y un observador que están inmóviles, la frecuencia del sonido emitido por la sirena es igual a la percibida por el observador durante el tiempo que permanezcan sin moverse, ver figura 22.



Figura 22. Primer caso. La fuente sonora y el receptor están inmóviles, la frecuencia de las ondas sonoras emitidas por la fuente es igual a la percibida por el observador.

En este caso la frecuencia (f) percibida por el observador será la misma que la emitida por la fuente y está dada por $f = \frac{v}{\lambda}$, siendo "v" la velocidad del sonido en el aire y " λ " la longitud de onda de las ondas sonoras emitidas por la sirena.

Segundo Caso. Si la sirena se acerca al observador, el cual está inmóvil, la frecuencia con que éste percibirá a las ondas será mayor que la frecuencia con la cual son emitidas, esto se puede justificar ya que en el caso en el que la ambulancia se acerca al observador, las ondas sonoras se van aglomerando, teniendo por lo tanto una longitud de onda menor que la del primer caso, lo cual implica una frecuencia mayor, ver figura 23.

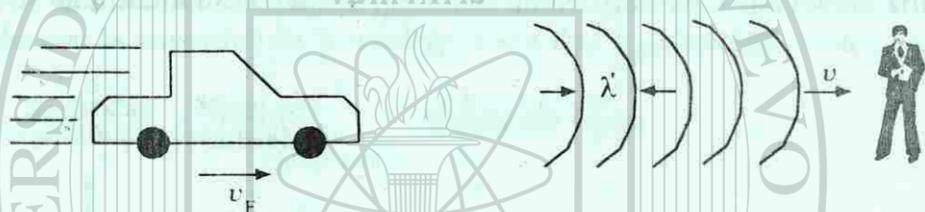


Figura 23. Segundo caso. El observador está inmóvil y la fuente se acerca, la longitud de onda es menor y la frecuencia aumenta, si la velocidad de propagación de la onda es constante e igual.

Como en el primer caso, la longitud de onda (λ) es igual al producto de su velocidad de propagación de la onda (del sonido) por su período $\lambda = vT$, al acercarse la fuente al observador, la longitud de onda (λ') medida por éste, se verá disminuida una distancia igual al producto de la velocidad de la fuente (v_F) por el período (T), es decir

$$\lambda' = vT - v_F T$$

siendo "v" la velocidad del sonido y v_F la velocidad de la fuente relativa al observador.

en donde

$$\lambda = (v - v_F) T$$

como

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

sustituyendo

$$\lambda' = \frac{v - v_F}{f}$$

Como la frecuencia (f') percibida por el observador está dada por

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

sustituyendo

$$\lambda' = \frac{v - v_F}{f}$$

$$f' = \frac{vf}{v - v_F}$$

$$f' = \frac{v}{v - v_F} (f)$$

Tercer Caso. Si consideramos ahora que la ambulancia se aleja del observador, el cual está inmóvil, las ondas estarán más separadas que en el primer caso, es decir, su longitud de onda será mayor, por lo cual la frecuencia percibida por el observador será menor, ver figura 24.

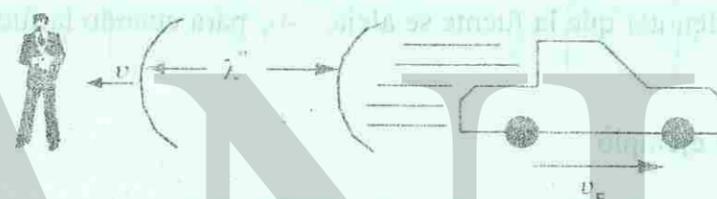


Figura 24. Tercer caso. El observador está parado y la fuente se aleja, las ondas sonoras tienen mayor longitud de onda al ser percibidas y menor frecuencia, si la velocidad de propagación es constante e igual en ambos casos.

Cuando la ambulancia (la fuente) se aleja, la longitud de onda (λ'') medida por el observador se aumenta una distancia igual al producto de la velocidad de la fuente (v_F) por el período, es decir

$$\lambda'' = vT + v_F T$$

o también

$$\lambda'' = (v + v_F) T$$

sustituyendo

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

$$\lambda'' = \frac{v + v_F}{f}$$

Como la frecuencia (f') percibida por el observador está dada por

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

sustituyendo

$$\lambda'' = \frac{v + v_F}{f}$$

reacomodando

$$f' = \left(\frac{v}{v + v_F} \right) f$$

Las dos ecuaciones anteriores de la frecuencia (f') percibida por el observador cuando la fuente sonora se acerca y cuando se aleja, se reordenan de la siguiente manera, quedando

$$f' = \left(\frac{v}{v \pm v_F} \right) f$$

en donde se usa $+v_F$ para denotar que la fuente se aleja, $-v_F$ para cuando la fuente se acerca.

Veamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo 4 El silbato de un tren emite un sonido de 400 Hz de frecuencia.

- ¿Cuál es el tono del sonido que se escucha cuando el tren se mueve hacia un observador inmóvil, con una velocidad de 20 m/s?
- ¿Cuál es el tono que se escucha cuando el tren se aleja del observador a la misma velocidad? Considerando la velocidad del sonido de 340 m/s.

$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$v_F = 20 \text{ m/s}$$

$$f = 400 \text{ Hz} = 400 \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{a) } f' = \left(\frac{v}{v - v_F} \right) f$$

$$f' = \left(\frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} - 20 \text{ m/s}} \right) \left(400 \frac{1}{\text{s}} \right)$$

$$f' = 425 \frac{1}{\text{s}} = 425 \text{ Hz}$$

$$\text{b) } f' = \left(\frac{v}{v + v_F} \right) f$$

$$f' = \left(\frac{340 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s} + 20 \text{ m/s}} \right) \left(400 \frac{1}{\text{s}} \right)$$

$$f' = 378 \frac{1}{\text{s}} = 378 \text{ Hz}$$

Cuando la fuente está en reposo y el observador es el que se mueve, la frecuencia captada debido a la velocidad de él, está dada por

$$f' = \left(\frac{v \pm v_o}{v} \right) f$$

en donde $+v_o$ se usa cuando el observador se acerca a la fuente, $-v_o$ cuando se aleja de la fuente.

En el caso en donde tanto el observador como la fuente se mueven, la frecuencia percibida está dada por la combinación de las ecuaciones

$$f' = \left(\frac{v}{v \pm v_F} \right) f \quad f' = \left(\frac{v \pm v_o}{v} \right) f$$

$$\text{en donde } f' = \left(\frac{v \pm v_o}{v \pm v_F} \right) f$$

en donde la convención de signos es la misma que la usada anteriormente. Nótese que la ecuación se reduce a la primera si el observador está inmóvil ($v_o = 0$).

Este fenómeno que se presenta al percibir el observador una frecuencia diferente a la emitida por una fuente sonora, es llamado el efecto Doppler del sonido.

El efecto Doppler se puede observar en todo movimiento ondulatorio mecánico o electromagnético.

Una de las aplicaciones del efecto Doppler es para detectar la velocidad de un objeto en movimiento por medio del sonar (ondas ultrasónicas en el agua) y del radar (ondas de radio en el aire).

Ejemplo 5. El silbato de una fábrica tiene una frecuencia de 800 Hz un día en que la velocidad del sonido es 340 m/s ¿Qué frecuencia percibirá una persona que se aleja de la fuente con una velocidad de 30 m/s?

$$v_o = 30 \text{ m/s}$$

$$f' = \left(\frac{v - v_o}{v} \right) f$$

$$f_f = 800 \text{ Hz}$$

$$f' = \left(\frac{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \right) (800 \text{ Hz})$$

$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$f' = 729 \text{ Hz}$$

4.- RUIDO

Cuando una persona percibe un sonido indeseable, podemos decir que está escuchando ruido, siendo éste una superposición de ondas con diferentes frecuencias.

En el medio ambiente existen ruidos de tipo natural y los producidos por el hombre. Entre los ruidos naturales tenemos los generados por descargas eléctricas por los terremotos, los sonidos producidos por los animales (ladrar, rugir, etc.) y el ser humano produce ruido, como consecuencia del avance tecnológico para mejorar su nivel de vida.

El ruido puede causar a una persona además de la sordera, úlceras, disfunciones del sistema nervioso central, problemas psicológicos como insomnio, ansiedad, irritabilidad, dependiendo del nivel de ruido y el tiempo de exposición. Con base en esto, la industria establece para proteger a su personal como medida de prevención de riesgos por ruido, la rotación del personal de acuerdo al nivel de ruido, al tiempo de exposición en diferentes áreas de trabajo, así como uso de diferentes dispositivos protectores de los oídos, dependiendo de su intensidad y frecuencia del sonido.

D.- ÓPTICA

1.- INTRODUCCIÓN

La óptica es la rama de la Física que estudia la luz y los fenómenos que produce.

Todos necesitamos de la luz para poder ver a nuestro alrededor, por ejemplo, para leer se necesita de una buena iluminación; para manejar en la oscuridad hacemos uso de los faros delanteros del automóvil; para trabajar en las minas se acopla en la cabeza de los obreros un faro en la frente para poder ver, etc.

La luz es percibida por el ojo humano, así como el sonido es percibido por el oído. El sonido se estudió anteriormente como una perturbación, ya que presenta los fenómenos de una onda (difracción, reflexión y refracción). La luz también la estudiaremos tomando en cuenta los fenómenos de reflexión, refracción y difracción; sólo que inicialmente consideraremos que bajo ciertas condiciones la luz se propaga en línea recta y para su estudio la representaremos mediante rayos rectos; el análisis de este modelo es lo que se denomina ÓPTICA GEOMÉTRICA.

Posteriormente, tomaremos en cuenta que alrededor de un obstáculo la luz se desvía, esto es debido al fenómeno de difracción; el análisis de la luz tomando esta consideración es lo que se conoce como ÓPTICA FÍSICA.

Podríamos decir que en la Óptica Geométrica estamos asignándole a la luz un comportamiento de rayo, en la Óptica Física la interpretación que le daremos a la luz es que se comporta como una onda, y en la Óptica Cuántica se considera a la luz como corpúsculos. Actualmente sabemos que ambas teorías son correctas, ya que la luz, como cualquier radiación electromagnética, presenta esa dualidad en su comportamiento, como más tarde se verá en detalle.

Se estudia la luz como una perturbación que tiene las características de una onda, sólo que se propaga en el vacío ya que la luz nos llega del Sol que está a gran distancia, existiendo vacío, entre la Tierra y el Sol, por lo que la luz se considera una perturbación que no necesita de un medio para su propagación.

Se analiza la naturaleza de la luz, la cual puede ser ondulatoria o corpuscular, de acuerdo a sus características principales que son: Propagación en línea recta, reflexión y refracción.

Ejemplo 5. El silbato de una fábrica tiene una frecuencia de 800 Hz un día en que la velocidad del sonido es 340 m/s ¿Qué frecuencia percibirá una persona que se aleja de la fuente con una velocidad de 30 m/s?

$$v_o = 30 \text{ m/s}$$

$$f' = \left(\frac{v - v_o}{v} \right) f$$

$$f_f = 800 \text{ Hz}$$

$$f' = \left(\frac{340 \text{ m/s} - 30 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \right) (800 \text{ Hz})$$

$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$f' = 729 \text{ Hz}$$

4.- RUIDO

Cuando una persona percibe un sonido indeseable, podemos decir que está escuchando ruido, siendo éste una superposición de ondas con diferentes frecuencias.

En el medio ambiente existen ruidos de tipo natural y los producidos por el hombre. Entre los ruidos naturales tenemos los generados por descargas eléctricas por los terremotos, los sonidos producidos por los animales (ladrar, rugir, etc.) y el ser humano produce ruido, como consecuencia del avance tecnológico para mejorar su nivel de vida.

El ruido puede causar a una persona además de la sordera, úlceras, disfunciones del sistema nervioso central, problemas psicológicos como insomnio, ansiedad, irritabilidad, dependiendo del nivel de ruido y el tiempo de exposición. Con base en esto, la industria establece para proteger a su personal como medida de prevención de riesgos por ruido, la rotación del personal de acuerdo al nivel de ruido, al tiempo de exposición en diferentes áreas de trabajo, así como uso de diferentes dispositivos protectores de los oídos, dependiendo de su intensidad y frecuencia del sonido.

D.- ÓPTICA

1.- INTRODUCCIÓN

La óptica es la rama de la Física que estudia la luz y los fenómenos que produce.

Todos necesitamos de la luz para poder ver a nuestro alrededor, por ejemplo, para leer se necesita de una buena iluminación; para manejar en la oscuridad hacemos uso de los faros delanteros del automóvil; para trabajar en las minas se acopla en la cabeza de los obreros un faro en la frente para poder ver, etc.

La luz es percibida por el ojo humano, así como el sonido es percibido por el oído. El sonido se estudió anteriormente como una perturbación, ya que presenta los fenómenos de una onda (difracción, reflexión y refracción). La luz también la estudiaremos tomando en cuenta los fenómenos de reflexión, refracción y difracción; sólo que inicialmente consideraremos que bajo ciertas condiciones la luz se propaga en línea recta y para su estudio la representaremos mediante rayos rectos; el análisis de este modelo es lo que se denomina ÓPTICA GEOMÉTRICA.

Posteriormente, tomaremos en cuenta que alrededor de un obstáculo la luz se desvía, esto es debido al fenómeno de difracción; el análisis de la luz tomando esta consideración es lo que se conoce como ÓPTICA FÍSICA.

Podríamos decir que en la Óptica Geométrica estamos asignándole a la luz un comportamiento de rayo, en la Óptica Física la interpretación que le daremos a la luz es que se comporta como una onda, y en la Óptica Cuántica se considera a la luz como corpúsculos. Actualmente sabemos que ambas teorías son correctas, ya que la luz, como cualquier radiación electromagnética, presenta esa dualidad en su comportamiento, como más tarde se verá en detalle.

Se estudia la luz como una perturbación que tiene las características de una onda, sólo que se propaga en el vacío ya que la luz nos llega del Sol que está a gran distancia, existiendo vacío, entre la Tierra y el Sol, por lo que la luz se considera una perturbación que no necesita de un medio para su propagación.

Se analiza la naturaleza de la luz, la cual puede ser ondulatoria o corpuscular, de acuerdo a sus características principales que son: Propagación en línea recta, reflexión y refracción.

2.- NATURALEZA DE LA LUZ

Algunas observaciones sencillas sobre el comportamiento de la luz son tan antiguas como la raza humana. Se interpretaba a la luz como lo opuesto a la oscuridad. Las primeras ideas que se conocen sobre la naturaleza de la luz son las de los atomistas de la línea de Demócrito (s.V a J.C.) los cuales creían que la luz era una gran cantidad de partículas despedidas por los cuerpos visibles.

Pitágoras (580-500 a J.C.) señalaba que la luz emana de los cuerpos luminosos en todas direcciones, choca contra los objetos, rebota y penetra en los ojos, produciendo la sensación de ver dichos cuerpos. Para Aristóteles (384-322 a J.C.) todo espacio estaba lleno de éter y un objeto se percibía por su movimiento, en sí consideraba a la luz como una especie de pulso en el mar etéreo.

Epicuro de Samos (341-270 a J.C.) pensaba que la luz era emitida en forma de rayos, los cuales al entrar al ojo, estimulaban el sentido de la vista.

Leonardo da Vinci (1452-1517) fue el primero en relacionar a la luz, al sonido y al agua con las ondas. Escribió que las ondas de luz se iban separando de un cuerpo, propagándose en círculos y llenando el espacio a su alrededor.

Descartes (1596-1650) consideraba que la luz era como una presión que se propagaba en un universo denso lleno de partículas, y que era percibida a través de vibraciones.

Posteriormente, en 1665 Isaac Newton (1642-1727) demostró que mediante la teoría corpuscular de la luz era posible explicar los fenómenos relacionados con la reflexión y la refracción. Un contemporáneo de Newton, Christian Huygens (1629-1695) formalizó la teoría ondulatoria de la luz y con ella demostró también las leyes de reflexión y de refracción. A pesar de que la teoría ondulatoria fue experimentalmente comprobada por Francesco Grimaldi (1618-1663) al detectar que la luz presentaba efectos de difracción, la mayor parte de los científicos rechazaban esta teoría y adoptaban la teoría corpuscular de Newton; esta situación prevaleció hasta principios del siglo XIX. En 1801 Thomas Young (1773-1829) realizó la primera demostración convincente acerca de la naturaleza ondulatoria de la luz, al descubrir que bajo ciertas condiciones, la luz presentaba características de superposición (INTERFERENCIA). Otro personaje importante que apoyó la

teoría ondulatoria fue Augustin Fresnel (1788-1829) quien realizó diversos experimentos en los cuales se detectaban fenómenos de interferencia y de difracción. Jean Foucault (1791-1868) en el año de 1850 también contribuyó a la aceptación de la teoría ondulatoria, al demostrar que la rapidez de la luz a través de sólidos o de líquidos era menor que en el aire.

El trabajo más relevante en el siglo XIX sobre el comportamiento y la naturaleza de la luz, fue realizado por James Clerk Maxwell (1831-1879) quien demostró en 1873 que la luz es una onda electromagnética de alta frecuencia que se desplaza en el vacío con una rapidez de 3×10^8 m/s, y que se puede considerar como una combinación de campos eléctricos y magnéticos variables, perpendiculares entre sí y a la vez perpendiculares a la velocidad de propagación de la onda, ver fig. 25. Ocho años después del fallecimiento de Maxwell, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) comprobó que la luz al igual que las ondas electromagnéticas, presentaba fenómenos de reflexión, refracción y difracción.

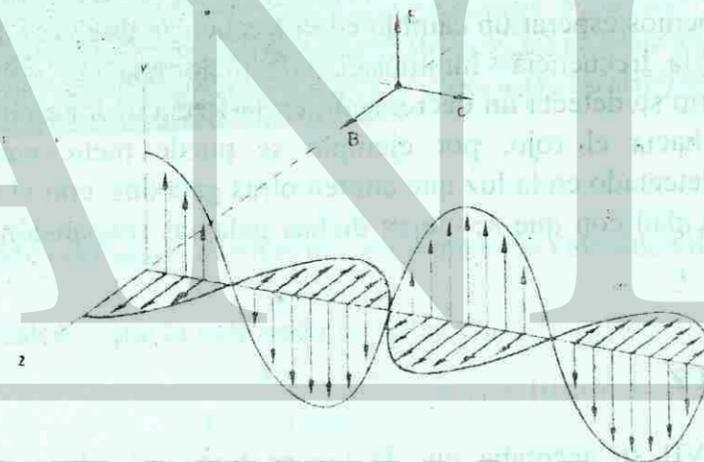


Figura 25.- El vector del campo eléctrico (E) y el vector del campo magnético (B) son perpendiculares entre sí y a la dirección de la propagación de la velocidad de la luz (c).

La teoría ondulatoria de la luz estuvo vigente todo el siglo XIX y hasta principios del siglo actual, cuando en 1900 Max Planck (1858-1947) regresa a la interpretación corpuscular de la luz para explicar la radiación que es emitida por un "cuerpo negro", dando inicio con ello la Mecánica Cuántica; en este modelo Planck propuso que la energía térmica emitida por un cuerpo se presenta en paquetes discretos llamados "cuantos", los cuales en el caso particular de energía luminosa son llamados "fotones".

Finalmente, en 1905 Albert Einstein (1879-1955) explicó el "efecto fotoeléctrico" mediante la teoría cuántica de Planck; este fenómeno se explica en la siguiente unidad.

En conclusión, podemos decir que la luz tiene una naturaleza dual, ya que para explicar algunos de sus efectos, por ejemplo la manera como se propaga y su interferencia, se considera como una onda; y para explicar el efecto fotoeléctrico o algún otro al interactuar la luz con la materia, se supone que está formada por partículas.

Como se mencionó en el efecto Doppler del sonido, dicho efecto es válido para la luz como para toda onda. Si la fuente luminosa se mueve con cierta velocidad con respecto al observador, debemos esperar un cambio en la frecuencia de la luz, si se percibe un incremento en la frecuencia luminosa, se le denomina corrimiento hacia el azul y si al contrario se detecta un decremento en la frecuencia percibida, se le llama corrimiento hacia el rojo, por ejemplo se puede mencionar el corrimiento hacia el rojo, detectado en la luz que emiten otras galaxias, con el cual es posible calcular la velocidad con que se alejan dichas galaxias (expansión del Universo).

3.- VELOCIDAD DE LA LUZ

Hasta finales del siglo XVII se aceptaba que la luz se transmitía de manera instantánea.

Galileo (1564-1642) hizo los primeros intentos para medir experimentalmente la velocidad de la luz considerando para ello la distancia conocida entre dos torres, en cada una de las cuales había un observador que enviaba señales luminosas de noche mediante linternas. Galileo sólo logró reafirmar que la luz se transmitía instantáneamente.

Posteriormente en 1675, Olaus Roemer (1644-1710) fue el primero en estimar la rapidez de la luz, cuando estudiaba una de las lunas de Júpiter, se basó en las irregularidades de los eclipses que se predecían para dichas lunas. Midió el intervalo de tiempo entre eclipses sucesivos durante varios años y advirtió una variación de 1300 s cuando la Tierra estaba más alejada de Júpiter, entonces relacionó que ese tiempo necesita la luz que proviene de la luna de Júpiter para recorrer el diámetro de la órbita terrestre (3×10^{11} m), ver fig. 26.



Figura 26.- Método usado por Roemer para medir la velocidad de la luz.

Así Roemer calculó que la velocidad de la luz era

$$v = \frac{s}{t} = \frac{3 \times 10^{11} \text{ m}}{1300 \text{ s}} = 2.31 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La primera medición confiable de la velocidad de la luz la realizó en 1849 A.H.L. Fizeau (1819-1896), con un experimento sencillo en el cual utilizaba una rueda giratoria dentada, un espejo plano, un vidrio semiplatado y una fuente luminosa. Al pasar la luz por la abertura entre dos de los dientes de la rueda, sigue su trayectoria hacia el espejo y regresa pasando por otra abertura; si se conoce la distancia entre la rueda y el espejo, el número de dientes de la rueda y su velocidad angular, se puede determinar la velocidad de la luz. La velocidad calculada por Fizeau fue de 3.13×10^8 m/s, ver fig. 27.

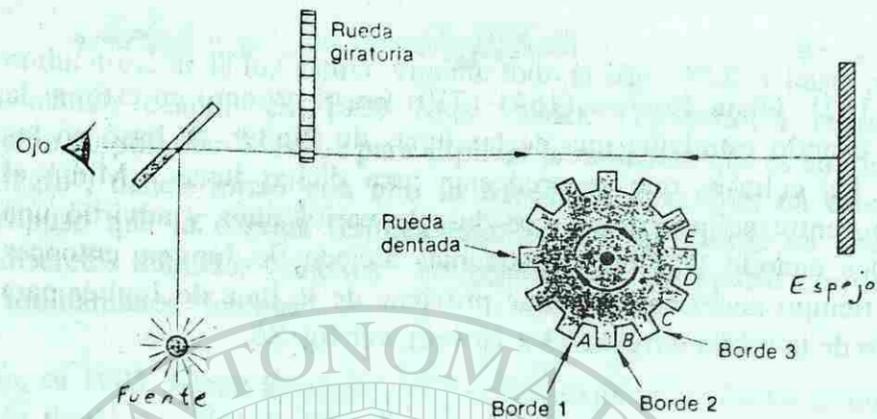


Figura 27.- Aparato de Fizeau.

Albert A. Michelson (1852-1931) utilizó el método de Foucault el cual había refinado en 1850 el aparato desarrollado por Fizeau, al sustituir la rueda dentada giratoria por un espejo giratorio, ver fig. 28.

Michelson obtuvo mediciones muy exactas, determinó la velocidad de la luz en el aire de 2.997×10^8 m/s. En la actualidad el valor aceptado para la velocidad de la luz es de 2.997925×10^8 m/s.



Figura 28.- Aparato de Michelson.

4.- FOTOMETRIA

La fotometría es la parte de la óptica que se encarga de medir la intensidad de las fuentes luminosas y la iluminación de las superficies.

Para realizar alguna actividad en el hogar, en la escuela, en un área de trabajo, etc., generalmente requerimos de una buena iluminación a nuestro alrededor.

A partir de cómo los cuerpos emiten o reflejan la luz, se clasifican en luminosos o iluminados.

Un cuerpo luminoso es aquél que emite ondas luminosas, por ejemplo el Sol, una vela, etc. Un cuerpo iluminado es el que refleja las ondas luminosas, por ejemplo la luna, un árbol, etc.

Si un cuerpo puede emitir naturalmente luz, como el Sol, se le llama fuente natural; además existen fuentes artificiales de luz, por ejemplo las lámparas fluorescentes, lámparas incandescentes, etc.

Los materiales se clasifican de acuerdo como se trasmite la luz a través de ellos; un material transparente es aquél a través del cual se puede ver claramente los objetos, por ejemplo el aire, el vidrio, etc; un material traslúcido es el que transmite parcialmente la luz, por ejemplo el vidrio esmerilado, el acrílico, etc. Un material opaco es el que absorbe o refleja toda la luz que recibe, por ejemplo una piedra, una mesa, etc. Debido a que no puede pasar la luz a través de un material opaco, se produce una sombra detrás de él, es decir, la sombra o umbra es la región donde no entra la luz, ver fig. 29.

La formación de las sombras bien limitadas es una evidencia más de como se propaga la luz en línea recta.

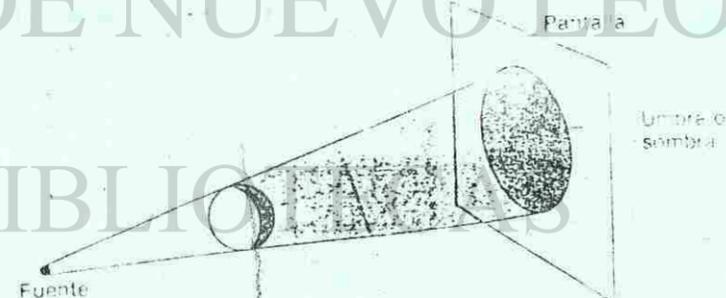


Figura. 29. Una fuente puntual forma una sombra o umbra.

Consideraremos una fuente puntual de luz, como aquella cuyas dimensiones son pequeñas en comparación con las distancias en cuestión.

Cuando en lugar de una fuente puntual de luz se tiene una fuente extendida, la sombra en sí constará de dos regiones; la región interna llamada sombra o umbra y la región externa, a la cual se le llama penumbra, ver fig. 30.

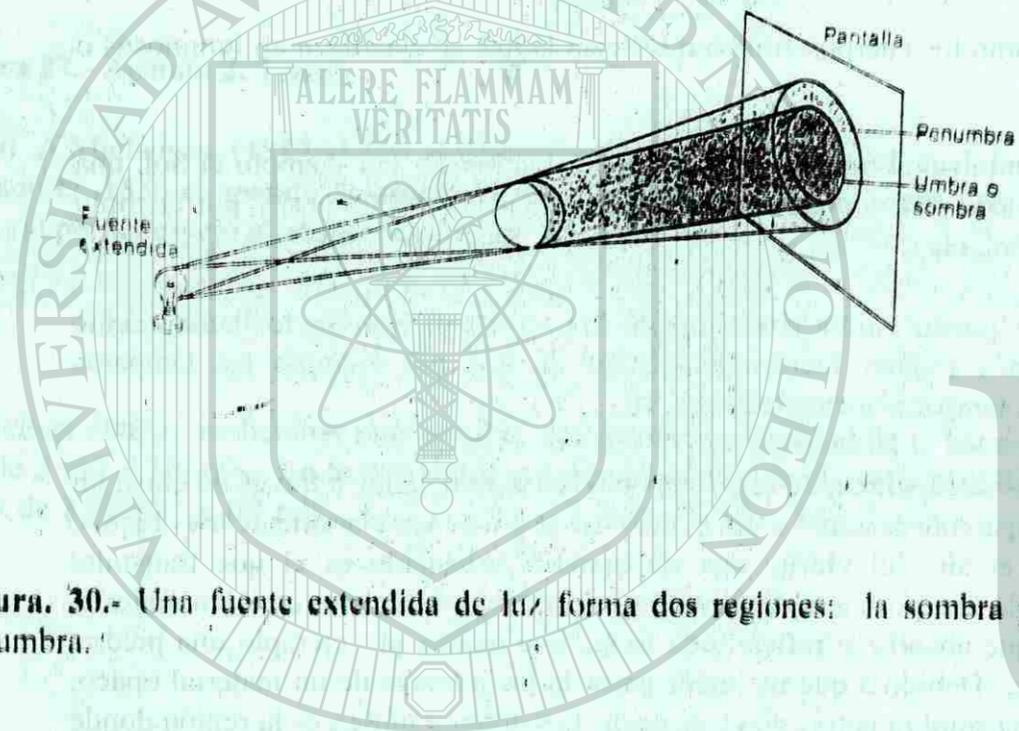


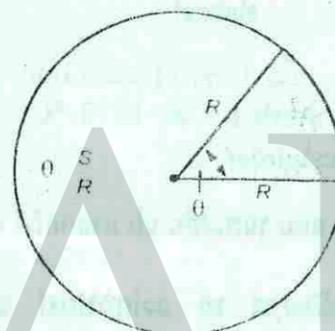
Figura. 30.- Una fuente extendida de luz forma dos regiones: la sombra y la penumbra.

Flujo luminoso.

El flujo luminoso (F) es la cantidad de energía luminosa que llega a una superficie perpendicular (normal) a los rayos de luz, en la unidad de tiempo. Se considera solamente la energía luminosa emitida en el rango de la luz visible que es de 400 nm a 700 nm.

La unidad en el S.I. del flujo luminoso es el lumen (lm) que se determina por comparación con una fuente estándar. Se necesita el concepto de ángulo sólido para establecer la unidad lumen.

Un ángulo sólido (Ω) tiene unidades de estereorradianes (sr) y se define de una manera análoga a la de un ángulo plano, cuya unidad es el radián, ver fig. 31



$$\theta = \frac{S}{R} \text{ radián}$$

en donde
 S es la longitud del arco
 R es el radio
 θ es el desplazamiento angular

$$\Omega = \frac{A}{R^2} \text{ sr}$$

en donde
 A es el área de la superficie esférica
 Ω es el ángulo sólido



Figura 31. Analogía entre la definición de un a) radián b) estereorradián

Para visualizar lo que representa un estereorradián, consideremos una esfera hueca de radio (R), en cuyo centro se coloca una fuente puntual que emite luz uniformemente en todas direcciones. Si cuatro radios a partir de la fuente puntual determinan sobre la superficie de la esfera una área igual a R^2 , el ángulo definido por los cuatro radios es una unidad de ángulo sólido, es decir un estereorradián.

Estereorradián (sr) es el ángulo sólido subtendido en el centro de una esfera por un área (A) sobre su superficie que es igual al cuadrado de su radio.

El estereorradián es una cantidad física adimensional, igual que el radián.

Un lumen (lm) es el flujo luminoso emitido por una fuente estándar a través de una abertura de $\frac{1}{60}$ cm² realizada en un ángulo sólido de un estereorradián.

Lo que se considera como una fuente estándar es un recipiente esférico hueco que se mantiene a la temperatura de solidificación del platino, alrededor de 1773 °C. El lumen en sí mide el brillo por comparación con la fuente estándar.

Intensidad luminosa.

La intensidad luminosa (I) es la razón del flujo luminoso a la unidad del ángulo sólido. En el Sistema Internacional la unidad de intensidad luminosa es el lumen sobre estereorradián, a esta razón de unidades se le llama candela (cd). Inicialmente se estableció esta unidad a partir de una candela o vela con ciertas especificaciones, las cuales no eran estables en la intensidad de luz que emitían, por lo que no fue un patrón de referencia confiable. Ahora, la fuente de luz considerada es un sexagésimo de un centímetro cuadrado de toria (óxido blanco del elemento torio) fusionado y mantenido a 2045°K (temperatura de congelación del platino), a esta temperatura la toria se torna incandescente y emite luz de manera constante y confiable, ver fig. 32.

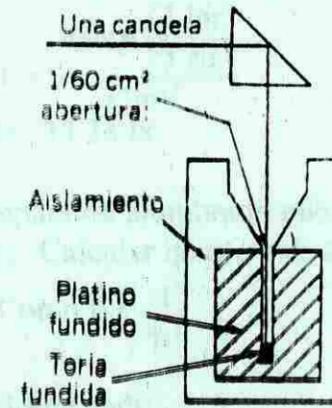


Figura 32.- Manera de obtener una unidad candela de intensidad luminosa.

Una fuente isotrópica es aquella que emite uniformemente luz en todas direcciones.

Illuminación

La iluminación (E) sobre una superficie (A) se define como el flujo luminoso (F) en la unidad de área. Esta fórmula es válida cuando el área es perpendicular al flujo luminoso es decir

$$E = \frac{F}{A}$$

cuando el flujo luminoso (F) se mide en lumen (lm) y el área (A) en metros cuadrados (m²), la iluminación (E) tiene unidades de lm/m² o lux (lx).

La luz irradiada por una fuente puntual es emitida en todas direcciones, al aumentar la distancia, la luz se dispersa y una superficie alejada recibe menos iluminación, por lo tanto la cantidad de iluminación que recibe una superficie es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia a la fuente.

La iluminación se puede expresar en términos de la intensidad luminosa y de la distancia respecto a la fuente, es decir

$$E = \frac{I}{A}$$

y como

$$F = I \Omega$$

$$\Omega = \frac{A}{R^2}$$

Al sustituir en la ecuación anterior, resulta

$$E = \frac{IA}{AR^2}$$

eliminando A se tiene

$$E = \frac{I}{R^2}$$

Esta fórmula es válida cuando el área es perpendicular al flujo luminoso.

Observa que las unidades de intensidad (cd) y las unidades de flujo (lm) son dimensionalmente las mismas. Esto es cierto, ya que el ángulo sólido en estereorradianes es adimensional.

El brillo fotométrico o luminancia es la intensidad luminosa de una superficie en una dirección dada, por unidad de área proyectada de la misma. El ojo capta brillo, no iluminación de los objetos visibles.

Veamos los siguientes ejemplos.

Ejemplo 1.- Una superficie de escritorio está 2 m abajo de una lámpara de 160 candelas. Calcular la iluminación en la superficie.

$I = 160 \text{ cd}$ Como $E = \frac{I}{R^2}$

$R = 2 \text{ m}$ sustituyendo $E = \frac{160 \text{ cd} \left(\frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ cd}} \right)}{(2 \text{ m})^2}$

$$E = 40 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$

$$E = 40 \text{ lx}$$

Ejemplo 2.- Si una lámpara eléctrica de 300 candelas está a 3 m de altura. Calcular la iluminación en el suelo.

$I = 300 \text{ cd}$ Como $E = \frac{I}{R^2}$
 $R = 3 \text{ m}$ sustituyendo

$$E = \frac{300 \text{ cd} \left(\frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ cd}} \right)}{(3 \text{ m})^2}$$

$$E = 33.33 \text{ lx}$$

Ejemplo 3. Una lámpara de alumbrado público produce 3.8 lux de iluminación a una distancia de 10 m. Calcular la intensidad luminosa de la lámpara.

$E = 3.8 \text{ lx}$ Como $E = \frac{I}{R^2}$
 $R = 10 \text{ m}$

despejando

$$I = ER^2$$

sustituyendo

$$I = \left(3.8 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ lm}} \right) (10 \text{ m})^2$$

$$I = 380 \text{ cd}$$

Ejemplo 4. Calcular la distancia a la que debe colocarse una lámpara eléctrica de 300 candelas para que produzca sobre la superficie de una mesa una iluminación de 60 lux.

$I = 300 \text{ cd}$ Como $E = \frac{I}{R^2}$

$E = 60 \text{ lx}$ despejando

$$R^2 = \frac{I}{E}$$

$$R = \sqrt{\frac{I}{E}}$$

sustituyendo

$$R = \sqrt{\frac{300 \text{ cd} \left(\frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ cd}} \right)}{60 \text{ lm}/\text{m}^2}}$$

$$R = 2.24 \text{ m}$$

Ejemplo 5. Una lámpara ubicada a 1.5 m de una superficie produce una iluminación de 225 lux sobre esta superficie. Calcular la intensidad de la fuente.

R = 1.5 m
E = 225 lx

Como $E = \frac{I}{R^2}$
despejando

$$I = ER^2$$

sustituyendo

$$I = \left(225 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} \right) (1.5 \text{ m})^2$$

$$I = 506.25 \text{ lm} \left(\frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ lm}} \right)$$

$$I = 506.25 \text{ cd}$$

Ejemplo 6. Se suspende una luz a 9 m por encima del piso de la calle y proporciona una iluminación de 36 lux en un punto directamente debajo de ella. Determinar la intensidad luminosa.

R = 9m
E = 36 lx

Como $E = \frac{I}{R^2}$
despejando

$$I = ER^2$$

sustituyendo

$$I = \left(36 \frac{\text{lm} (1 \text{ cd} / 1 \text{ lm})}{\text{m}^2} \right) (9\text{m})^2$$

$$I = 2,916 \text{ cd.}$$

5.- ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO Y ESPECTRO VISIBLE

El espectro electromagnético lo constituyen las diferentes clases de radiación electromagnética que existen, todas ellas son ondas electromagnéticas que poseen un campo eléctrico y un campo magnético, son ondas transversales, su diferencia básica de cada clase es su frecuencia y su longitud de onda. La velocidad de propagación de todas las radiaciones electromagnéticas es de 300,000 km/s en el vacío, Maxwell fue el primero en proponer y comprobar lo anterior.

En el espectro se puede visualizar cómo la longitud de onda decrece de manera progresiva y se empieza con las ondas largas de radio, ondas cortas de radio, infrarrojo, región de luz visible, ultravioleta, rayos X, rayos gamma, ver fig. 33.

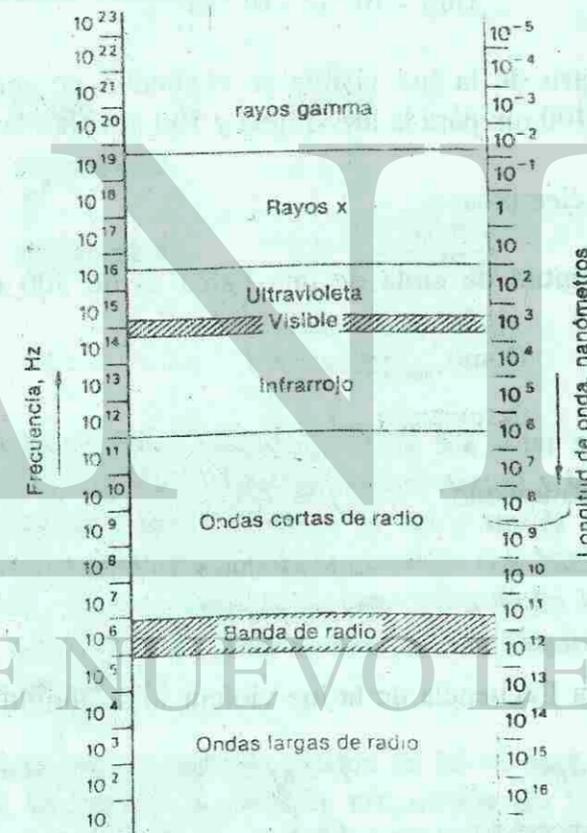


Figura 33. Espectro electromagnético.

Las regiones del espectro se superponen un poco entre sí, cada región tiene sus propias características, sin embargo, todas las regiones corresponden a radiación electromagnética.

La longitud de onda (λ) de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia (f) por la ecuación general

$$c = \lambda f$$

En donde c es la velocidad de la luz (3×10^8 m/s) en el vacío.

La región de luz visible del espectro electromagnético está comprendida en longitudes de onda entre 0.00004 cm y 0.00007 cm, como son muy pequeñas, dichas longitudes se expresan en función del nanómetro en el Sistema Internacional.

$$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m} = 10^{-7} \text{ cm}$$

Por lo tanto, el espectro de la luz visible se encuentra comprendido entre las longitudes de onda de 400 nm para la luz violeta y 700 nm para la luz roja.

Veamos los siguientes ejemplos.

Ejemplo 7.- Si la longitud de onda de una llama es de 500 nm. Calcular su frecuencia.

$$\lambda = 500 \text{ nm}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como

$$c = \lambda f$$

despejando

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

sustituyendo

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{500 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$f = 0.006 \times 10^{17} \text{ 1/s}$$

$$f = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Ejemplo 8.- Calcular la frecuencia de la luz violeta, si su longitud de onda es de 410 nm.

$$\lambda = 410 \text{ nm}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como

$$c = \lambda f$$

despejando

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

sustituyendo

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{410 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$f = 0.0073 \times 10^{17} \text{ 1/s}$$

$$f = 7.3 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Ejemplo 9.- Cuando una luz de longitud de onda de 500 nm pasa del aire a una placa de vidrio delgada y de nuevo hacia el aire, la frecuencia permanece constante, pero la velocidad de la luz en el vidrio se reduce a 2×10^8 m/s. Calcular su longitud de onda dentro del vidrio.

$$\lambda = 500 \text{ nm}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como

$$c = \lambda f$$

despejando

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

sustituyendo

$$f = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{500 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$f = 0.006 \times 10^{17} \text{ 1/s}$$

$$f = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

como la frecuencia es constante, entonces

$$f = 6 \times 10^{14} \text{ 1/s}$$

$$c = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como

$$c = \lambda f$$

despejando

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

sustituyendo

$$\lambda = \frac{2 \times 10^8 \text{ m/s}}{6 \times 10^{14} \text{ 1/s}}$$

$$\lambda = 0.333 \times 10^6 \text{ m}$$

$$\lambda = 333 \text{ nm}$$

Isaac Newton fué el primero en hacer pasar un haz de luz solar a través de un orificio que acondicionó en la ventana de una habitación oscura y lo dirigió hacia un pequeño vidrio triangular (prisma). Al pasar la luz a través del prisma se descompone y al proyectarse en una pantalla, aparece como una banda de colores: violeta, azul, verde, amarillo, le dió el nombre de espectro a dicha banda, ver fig. 6. Este espectro visible estudiado por Newton sólo es una pequeña región del espectro electromagnético, ver fig. 33.

Newton observó que si colocaba un segundo prisma de tal manera que pasara la banda de colores por éste, al llegar a la pantalla, proyectaba luz blanca. La luz blanca está constituida por la superposición de los colores del iris, los cuales pasan imperceptiblemente de uno a otro, desde el rojo hasta el violeta. La descomposición o dispersión de la luz es el fenómeno mediante el cual se obtienen los colores del iris, ver fig. 34.



Figura 34. Descomposición o dispersión de la luz blanca usando un prisma.

El espectro de los colores que forman la luz blanca, en el aire o en el vacío, tienen la misma velocidad de la luz, se distingue un color de otro por su frecuencia. La frecuencia del rojo es aproximadamente 3×10^{14} Hz y del violeta es 8×10^{14} Hz. A partir de la ecuación $c = \lambda f$ se tiene que la longitud de onda es mayor para el rojo que para el violeta, ver fig. 35. A partir de la figura se observa que la longitud de onda del espectro visible es de 7000 \AA para el rojo y 4000 \AA para el color violeta, en donde $1 \text{ angstrom (}\text{\AA}\text{)} = 10^{-10} \text{ m}$.

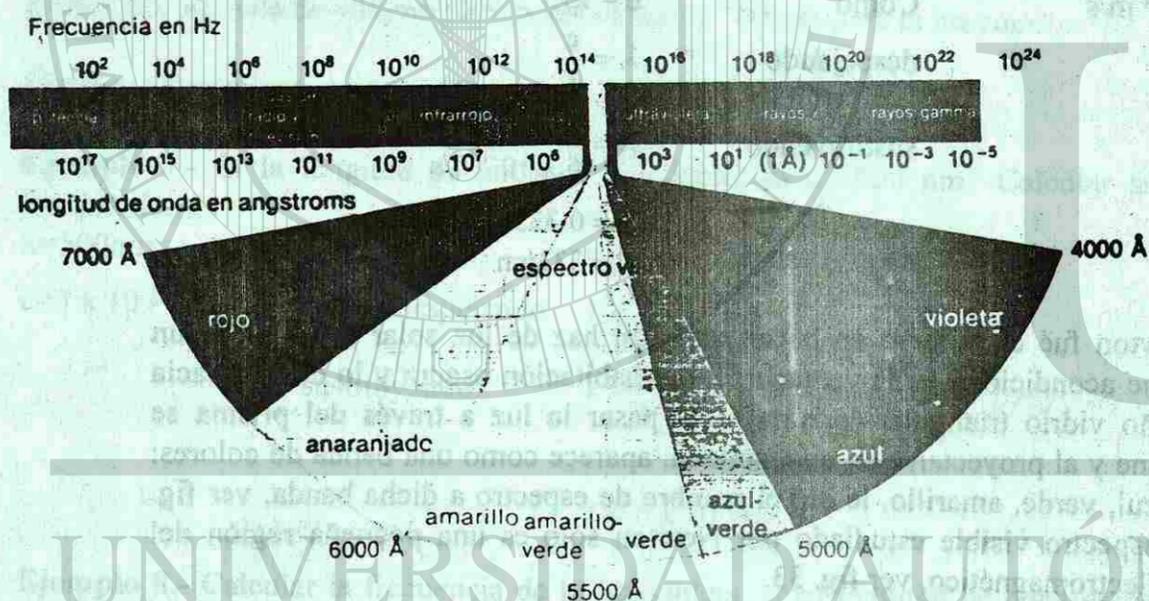


FIGURA 35 Espectro electromagnético.

La descomposición de la luz por un prisma de vidrio es debida a que cada uno de los colores tiene diferente índice de refracción, siendo el más refractado el violeta y el menos refractado el rojo, debido a que cada color tiene diferente velocidad a través del prisma, siendo el rojo el que se desvía menos por ser su velocidad mayor que la del color violeta, el cual se desvía más.

Por lo tanto Newton demostró que la luz está formada de diversos colores (desde el rojo hasta el violeta en la descomposición de la luz blanca), considerando los colores primarios de la luz el rojo, verde y azul, en tanto que el amarillo (combinación de la luz roja y azul), turquesa (verde y azul), magenta (rojo con azul) se llaman colores secundarios de la luz. Por ejemplo una pantalla de un televisor de color se pinta con 700000 puntos distribuidos en grupos de tres: uno que emite luz azul, otro verde, y otro rojo. De la parte posterior del tubo de T.V. provienen 3 haces de electrones. Las variaciones de colores se logran variando las intensidades de los haces.

Un objeto se ve de un color particular por la luz del color que refleja y absorbe los demás colores, por ejemplo una camisa roja se ve de este color porque refleja la luz roja, debido a que al incidir la luz blanca sobre la camisa, los pigmentos en el tinte absorben la luz de los colores restantes que la componen. Al hacer incidir luz azul, los pigmentos en el tinte absorberán toda la luz azul y no se reflejará ninguna luz y la camisa roja con luz azul que le incide se verá negra.

6.- REFLEXIÓN DE LA LUZ

La mayor parte de la luz que se ve a nuestro alrededor es el resultado de la luz reflejada. La reflexión es un fenómeno que describe cómo la luz regresa a su medio original como resultado de incidir sobre una superficie. Al llegar la luz a la superficie de un cuerpo, se refleja total o parcialmente en todas direcciones. Al ser la superficie lisa, los rayos son reflejados o rechazados en una sola dirección. La superficie lisa que refleja los rayos de luz recibida es llamada espejo, por ejemplo, el agua en una alberca, espejos de cristal, etc.

El rayo de luz que llega al espejo se llama incidente y al rayo rechazado se le denomina reflejado. El rayo de luz que llega a una superficie con un ángulo de incidencia (θ_i) se refleja con un ángulo igual de reflexión (θ_r) a esto se le conoce como Ley de reflexión. Los ángulos de incidencia y de reflexión se miden a partir de una línea perpendicular (normal) a la superficie en el punto de incidencia. El rayo incidente, el rayo reflejado y la normal quedan en el mismo plano, ver fig. 36a. La ley de reflexión señala que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie irregular, ver fig.36b), el rayo de luz reflejado no queda bien definido y se dispersa la luz en todas direcciones.

Este fenómeno de la luz se llama reflexión difusa o difusión de la luz por una superficie áspera. Una superficie irregular o áspera dispersará la luz incidente, dando como resultado que se ilumine dicha superficie. Por ejemplo reflexión de la luz en la hoja de papel, el ladrillo, el mueble, es ejemplo de reflexión difusa.

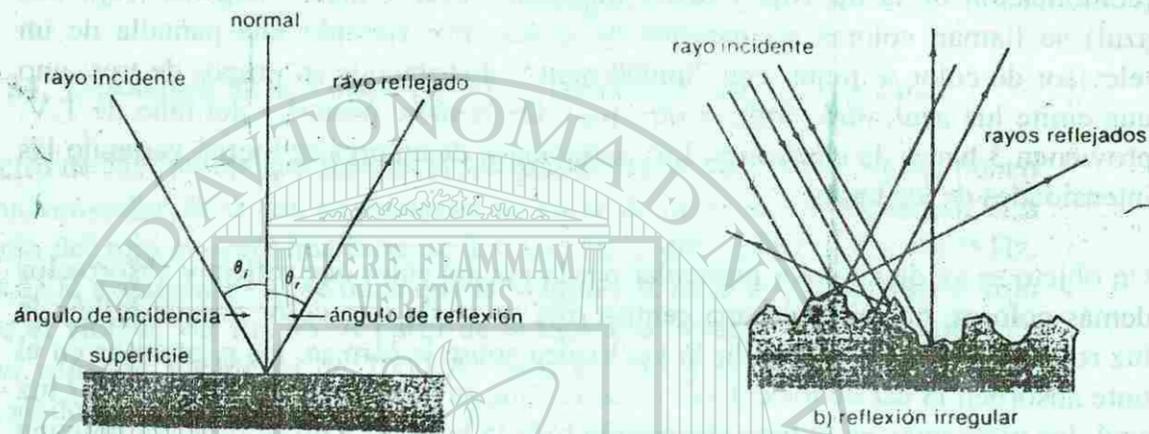


Figura 36.- a) reflexión en superficie lisa. b) Reflexión difusa en superficie irregular.

7.- ESPEJOS PLANOS.

Como ya se dijo, un espejo es toda superficie lisa que refleja los rayos de luz que recibe. Los tipos más comunes de espejos son los planos y esféricos.

En un espejo plano la superficie reflectora es de forma plana. En un espejo es derecho al conservar la misma posición; se forma una imagen virtual porque se ve como si estuviera dentro del espejo y es simétrica porque la imagen real y virtual están a la misma distancia del espejo, ver fig. 37.

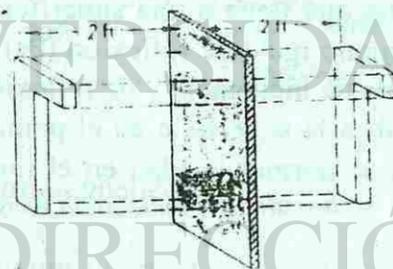


Figura 37.- En los espejos planos las imágenes están invertidas derecha-izquierda.

Para un espejo plano, la distancia del espejo al objeto es siempre de igual magnitud que la distancia a la imagen de dicho objeto. Se observa que las imágenes formadas por un espejo plano son realmente reflexiones de objetos reales. Las imágenes formadas no son reales puesto que la luz no pasa a través de ellas, es decir, una imagen real se forma por rayos de luz verdaderos que pasan por ella; se pueden proyectar en una pantalla dichas imágenes reales. Una imagen virtual es la que parece formarse por luz proveniente de la imagen, aunque en realidad los rayos de luz no pasan por ella, o sea no se pueden proyectar en una pantalla, ver fig. 38.

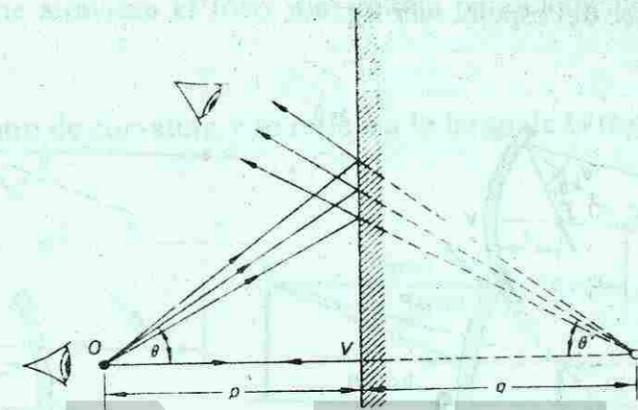


Figura 38.- Construcción de la imagen de un objeto puntual, por un espejo plano.

8.- ESPEJO ESFÉRICO

Un espejo esférico es aquél formado por una sección de una esfera reflejante. Un espejo cóncavo es la superficie reflejante de la parte interna de una esfera reflejante.

Un espejo convexo es la superficie reflejante de la parte externa de una esfera esférico, ver fig. 39.

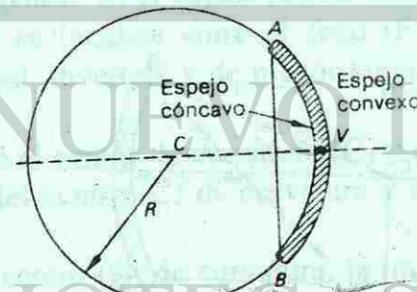


Figura 39.- Espejo esférico, el cual puede ser espejo convexo o espejo cóncavo.

En dichas figuras, el espejo esférico tiene un radio (R) de curvatura, un centro (C) de curvatura, un vértice (V) de espejo, una abertura lineal del espejo (segmento AB) y un eje del mismo que pasa por el centro de curvatura y por su vértice.

Al considerar sobre el eje de un espejo cóncavo un rayo de luz que incide en dirección del eje sobre su superficie, se reflejará sobre sí mismo; y un rayo paralelo a su eje se reflejará de tal manera que sus ángulos de incidencia y de reflexión serán iguales, y el rayo reflejado pasará por el punto medio entre el centro de curvatura y el vértice del espejo, ver fig. 40.

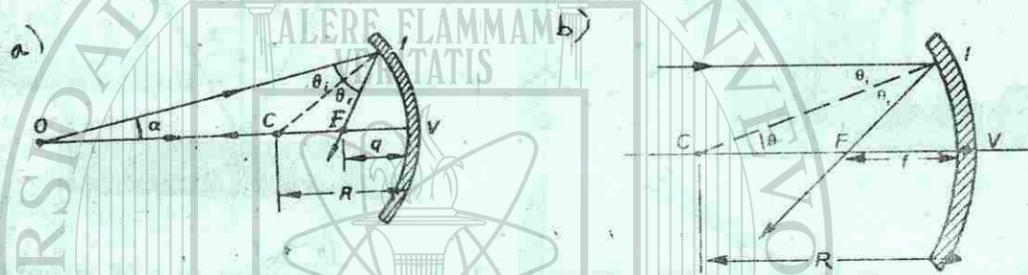


Figura 40.- Reflexión en un espejo cóncavo: a) si el rayo pasa por el centro, se reflejará sobre la misma línea b) si el rayo es paralelo al eje, se reflejará pasando por el foco.

El foco o punto focal (F) en que coinciden los rayos reflejados, es el punto medio del radio de curvatura, ver fig. 41. A partir de lo anterior, al espejo cóncavo se le llama espejo de convergencia.

$$FV = f = \frac{R}{2}$$

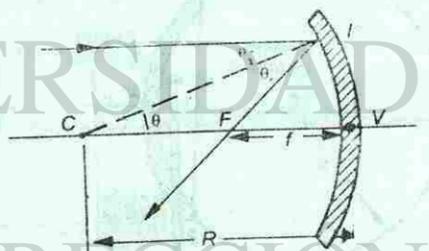


Figura 41.- La longitud focal (f) de un espejo cóncavo es igual a la mitad de su radio (R) de curvatura.

9.- RAYOS PRINCIPALES EN ESPEJOS. OBTENCIÓN DE IMÁGENES

Las imágenes formadas en los espejos esféricos se determinan a partir de dos o tres rayos particulares. Los rayos principales considerados son:

Rayo paralelo al eje del espejo es el rayo que se refleja y pasa por el foco de un espejo cóncavo o proviene del foco de un espejo convexo.

Rayo focal es el rayo que atraviesa el foco y se refleja paralelamente al eje del espejo.

Rayo que pasa por el centro de curvatura y se refleja a lo largo de la trayectoria del rayo original, ver fig. 42.

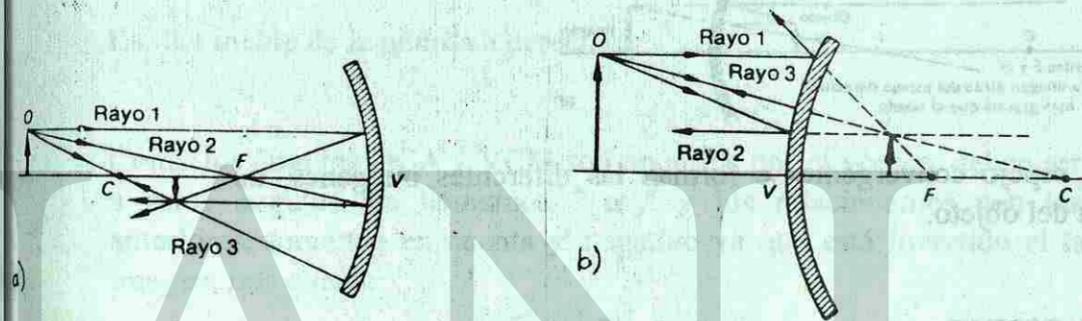


Figura 42.- Los rayos que ayudan a formar las imágenes en los espejos esféricos son: 1. rayo paralelo, 2. rayo focal, 3. rayo principal.

De acuerdo a la distancia del objeto con respecto al centro de curvatura o al foco, se producen las diferentes imágenes. Si el objeto (O) se sitúa afuera del centro de curvatura, la imagen formada se localiza entre el foco (F) y el centro (C) de curvatura y será una imagen real, invertida y de menor tamaño que el objeto, ver fig. 43 a).

Si el objeto (O) se coloca entre el centro de curvatura (C) y el foco (F), la imagen formada se localiza más allá del centro (C) de curvatura y es real, invertida y de mayor tamaño, ver fig. 43b).

Si el objeto (O) se sitúa en el centro (C) de curvatura, la imagen formada es real, invertida y del mismo tamaño que el objeto en el centro de curvatura, ver fig. 43c).

Si el objeto (O) se coloca en el foco (F), no se formará imagen, ver fig. 43).

Si el objeto (O) se coloca entre el foco y el vértice (V), la imagen aparece detrás del espejo, la imagen formada es virtual, derecha y de mayor tamaño, ver fig. 43 d)

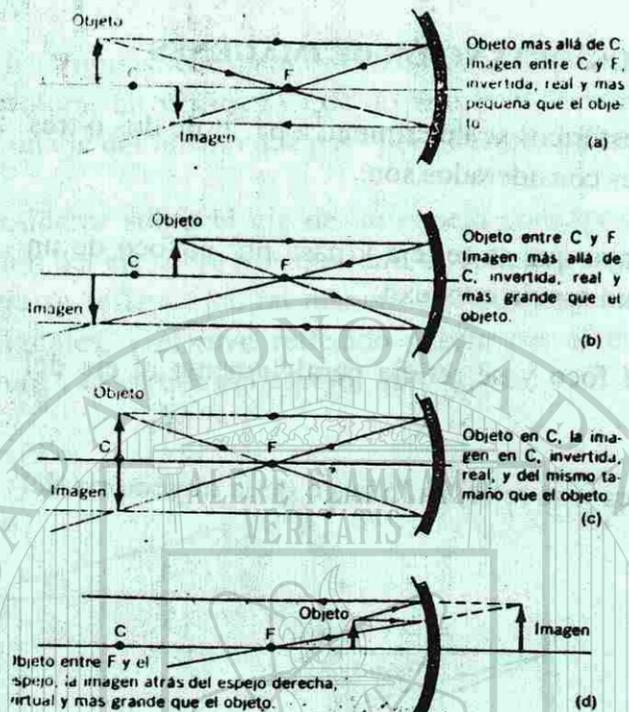


Figura 43.- En un espejo convergente se forman las diferentes imágenes, de acuerdo a la distancia del objeto.

10.- ECUACIÓN DEL ESPEJO

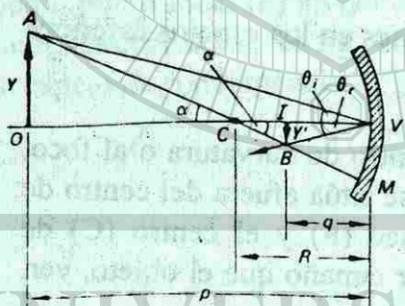


Figura 44.- Deducción de la ecuación del espejo.

A partir de la figura 44, se tiene que p es la distancia del espejo al objeto, e igual al segmento OV .

q es la distancia del espejo a la imagen formada e igual al segmento IV .

R es el radio de curvatura e igual al segmento CV .

y es el tamaño del objeto e igual al segmento OA
 y es el tamaño de la imagen e igual al segmento IB .

en donde la convención de signos es

1) La distancia al objeto (p) es positiva para objetos reales y negativa para objetos virtuales.

2) La distancia a la imagen (q) es positiva para imágenes reales y negativa para imágenes virtuales.

3) El radio de curvatura (R) y la longitud focal (f) son positivos para espejos convergentes (cóncavos) y negativos para espejos divergentes (convexos).

La luz incide de izquierda a derecha.

Como los ángulos OCA y VCM son opuestos por el vértice, deben ser iguales. Si a estos ángulos les llamamos " α " y los relacionamos con las cantidades anteriores, tomando en cuenta y' negativo ya que está invertido el tamaño de la imagen, nos queda:

$$\tan \alpha = \frac{y}{p-R} = \frac{-y'}{R-q}$$

por lo cual
$$\frac{-y'}{y} = \frac{R-q}{p-R} \quad \text{ecuación (1)}$$

Como los ángulos de incidencia (θ_i) y de reflexión (θ_r) son iguales, sus tangentes también lo son, es decir

sustituyendo
$$\frac{y}{p} = \frac{-y'}{q}$$

o también
$$\frac{-y'}{y} = \frac{q}{p} \quad \text{ecuación (2)}$$

igualando las ecuaciones (1) y (2), resulta

$$\frac{q}{p} = \frac{R-q}{p-R}$$

reordenando términos

$$q(p-R) = p(R-q)$$

$$\begin{aligned}
 qp - Rq &= pR - pq \\
 ip + pq &= pR + Rq \\
 pq &= R(p + q) \\
 \frac{2}{R} &= \frac{p + q}{pq} \\
 \frac{2}{R} &= \frac{1}{q} + \frac{1}{p}
 \end{aligned}$$

Ecuación del espejo

Si el foco está a la mitad del radio de curvatura, entonces, $f = R/2$, y al sustituir en la ecuación del espejo queda:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

al despejar cada variable (p , q y f), se tienen las fórmulas siguientes:

$$p = \frac{qf}{q-f} \quad q = \frac{pf}{p-f} \quad f = \frac{pq}{p+q}$$

Veamos los siguientes ejemplos

Ejemplo 10.- Encontrar la longitud focal de un espejo convergente, cuyo radio de curvatura es de 20 cm.

$$\begin{aligned}
 R &= +20 \text{ cm} & \text{Como } f &= \frac{R}{2} \\
 & & \text{sustituyendo } f &= \frac{+20\text{cm}}{2} \\
 & & f &= +10\text{cm}
 \end{aligned}$$

Ejemplo 11.- Calcular el tipo de imagen formada y su colocación con respecto a un espejo cóncavo, si el foco está a 15 cm y el objeto se coloca a 20 cm del vértice de dicho espejo.

$$\begin{aligned}
 f &= +15 \text{ cm} & \text{Como } q &= \frac{pf}{p-f} \\
 p &= +20 \text{ cm} & q &= \frac{pf}{p-f} \\
 & & \text{sustituyendo } q &= \frac{(20\text{cm})(15\text{cm})}{(20\text{cm}) - (15\text{cm})} = +60\text{cm}
 \end{aligned}$$

Ya que q es positiva, entonces, la imagen es real y se encuentra a 60cm del espejo y al trazar los rayos, la imagen será invertida.

Ejemplo 12.- Encontrar la posición de la imagen, si el objeto se localiza a 4cm de un espejo convexo, cuya longitud focal es 6cm.

$$\begin{aligned}
 p &= 4\text{cm} & \text{Como } q &= \frac{pf}{p-f} \\
 f &= -6\text{cm} & q &= \frac{pf}{p-f} \\
 & & \text{sustituyendo } q &= \frac{(4\text{cm})(-6\text{cm})}{4\text{cm} - (-6\text{cm})} \\
 & & q &= \frac{-24\text{cm}^2}{10\text{cm}} \\
 & & q &= -2.4\text{cm}
 \end{aligned}$$

por el signo negativo de q , la imagen es negativa, o sea virtual.

El aumento o la amplificación lateral (M) del espejo es la razón del tamaño de la imagen al tamaño del objeto.

$$\text{Aumento (M)} = \frac{\text{tamaño de la imagen (y')}}{\text{tamaño del objeto (y)}}$$

$$\text{o sea } M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

siendo el aumento negativo, si la imagen es invertida con respecto al objeto y positiva si la imagen es derecha.

Ejemplo 13.- Un objeto de 6 cm se encuentra a 50 cm de un espejo cóncavo, cuya longitud focal es de 20 cm. Encontrar la posición, tamaño y tipo de imagen.

$$\begin{aligned}
 y &= 6 \text{ cm} & \text{Como } q &= \frac{pf}{p-f} \\
 p &= 50 \text{ cm} & \text{sustituyendo } q &= \frac{(50\text{cm})(20\text{cm})}{50\text{cm} - 20\text{cm}}
 \end{aligned}$$

$$f = 20 \text{ cm} \quad q = +33.3\text{cm}$$

ya que q es positiva, la imagen es real

$$\text{como } M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{despejando } y' = \frac{-qy}{p} \\
 & \text{sustituyendo } y' = \frac{(33.3\text{cm})(6\text{cm})}{50\text{cm}} \\
 & y' = -4\text{cm}
 \end{aligned}$$



ya que y' es negativa la imagen está invertida

$$M = \frac{33.3\text{cm}}{50\text{cm}} = \frac{-4\text{cm}}{6\text{cm}} = -\frac{2}{3}$$

11.- REFRACCIÓN DE LA LUZ.

La luz viaja a diferente velocidad en diferentes medios, si la luz incide en una superficie de separación entre dos medios de diferente densidad, los rayos luminosos se desvían. Los rayos que llegan a la superficie son llamados incidentes y a los rayos que se desvían al pasar la superficie se les llama refractados, ver fig. 45. Si los rayos inciden perpendicularmente a la superficie de separación, no se refractan.

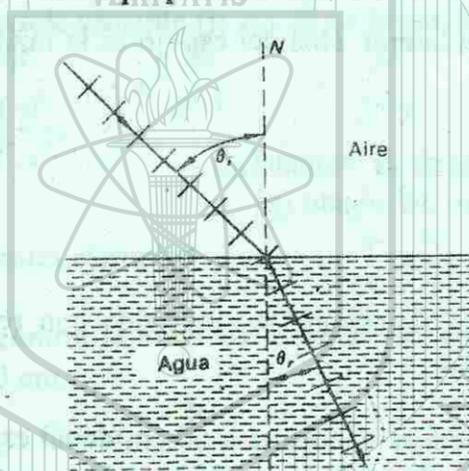


Figura 45.- La luz se refracta hacia la normal cuando entra a un medio más denso.

El rayo incidente, la normal y el rayo refractado se encuentran siempre en el mismo plano. La trayectoria de un rayo refractado en la superficie de separación de dos medios es exactamente reversible ver fig. 46.



Figura 46.- La trayectoria de un rayo refractado es reversible

Para cada par de medios transparentes, la razón entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción, tiene un valor constante que recibe el nombre de índice de refracción (n), es decir

$$n = \frac{\text{Sen}\theta_i}{\text{Sen}\theta_r}$$

Fue descubierta por Willebrord Snell (1591-1626) y se llama en su honor Ley de Snell. Descubrió que el índice de refracción se calcula por el cociente de las velocidades del primero y segundo medios, es decir

$$n = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

donde v_1 es la velocidad del primer medio en km/s
 v_2 es la velocidad del segundo medio en km/s.

La razón entre las velocidades de la luz en el vacío y en un medio particular, recibe el nombre de índice de refracción del medio.

Una manera opcional de expresar esta ley es a partir de los índices de refracción de los medios siendo

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c}{v_2}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío despejando v_1 y v_2 en las anteriores expresiones, tenemos

$$v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2}$$

al sustituir v_1 y v_2 en la ecuación

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}$$

nos queda

$$\frac{\text{Sen}\theta_1}{\text{Sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

entonces

$$n_1 \text{ Sen}\theta_1 = n_2 \text{ Sen}\theta_2$$

Veamos los siguientes ejemplos:

Ejemplo 14.- Si el índice de refracción del medio del agua es $n_{H_2O} = 1.33$. Calcular la velocidad de la luz en el agua.

$$n_{H_2O} = 1.33, \quad \text{Como} \quad n = \frac{c}{v_{H_2O}}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \text{despejando} \quad v_{H_2O} = \frac{c}{n_{H_2O}}$$

$$\text{sustituyendo} \quad v_{H_2O} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.33}$$

$$v_{H_2O} = 2.66 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Ejemplo 15.- Un haz de luz incide en el agua de un recipiente formando un ángulo incidente de 30° con respecto a la normal. Calcular el ángulo de refracción en el agua, si $n_{H_2O} = 1.33$

$$n_{H_2O} = 1.33 \quad \text{como} \quad n_{H_2O} = \frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r}$$

$$\theta_i = 30^\circ \quad \text{despejando} \quad \text{sen } \theta_r = \frac{\text{sen } \theta_i}{n_{H_2O}}$$

$$\text{sustituyendo} \quad \text{sen } \theta_r = \frac{\text{sen } 30^\circ}{1.33}$$

$$\text{sen } \theta_r = \frac{0.500}{1.33}$$

$$\text{sen } \theta_r = 0.375$$

$$\theta_r = \text{sen}^{-1} 0.375$$

$$\theta_r = 22^\circ$$

La refracción la observamos por ejemplo cuando introducimos un lápiz en un vaso transparente con agua, nos da la idea de que el lápiz está cortado o quebrado a partir de la superficie del líquido. Otro ejemplo del efecto de la refracción lo notamos en el espejismo en la carretera en un día demasiado caluroso, dando la idea de que el pavimento está mojado, lo que sucede en realidad es que la capa de aire cercana al pavimento se calienta más y la capa de aire superior o ambiente está menos caliente, por lo que se forman dos capas de aire de diferente densidad, produciendo que la luz se refracte o se desvíen las ondas luminosas al pasar de una capa a otra.

12.- REFLEXIÓN INTERNA TOTAL.

Cuando un rayo de luz pasa desde un medio ópticamente denso hacia un medio menos denso, se refracta alejándose de la normal. En otras palabras, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia. Si el ángulo de incidencia es lo suficientemente grande, el de refracción puede alcanzar los 90° y el rayo refractado desaparecerá. Este fenómeno se conoce como reflexión interna total, ver fig. 47

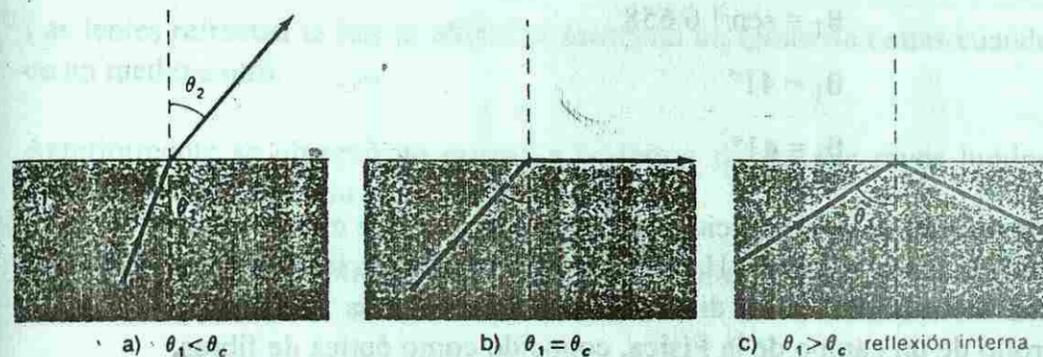


Figura 47.- a) El rayo se refracta al pasar desde un medio denso hacia uno menos denso. b) El rayo se refracta a lo largo del límite entre los dos medios, para un ángulo de incidencia igual al ángulo crítico. c) Para un ángulo de incidencia mayor que el crítico, el rayo sufre una reflexión interna total.

El rayo incide a un ángulo tan grande (θ_c) que el rayo refractado queda a lo largo de la superficie del agua. El ángulo de refracción es de 90° . Si se aplica la ley de Snell en esta situación, se obtiene

$$(n_{H_2O}) (\text{sen } \theta_1) = (n_{\text{aire}}) \text{sen } \theta_2$$

$$(1.33) (\text{sen } \theta_1) = (1.00) \text{sen } 90^\circ$$

despejando $\text{sen } \theta_1$

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{(1.00) \text{sen } 90^\circ}{1.33}$$

$$\text{sen } \theta_1 = 0.75$$

$$\theta_1 = 48.6^\circ$$

en este caso $\theta_1 = \theta_c$

El ángulo de incidencia al cual ocurre la reflexión interna total es característico de cada sustancia y se conoce como el ángulo crítico (θ_c) de la sustancia.

Ejemplo 16.- Calcula el ángulo crítico del vidrio si $n = 1.52$ del vidrio y $n = 1.00$ del aire.

$n = 1.52$ (vidrio)

Como $\theta_1 = \theta_c$

$n = 1.00$ (aire)

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

$$\text{sen } \theta_1 = \frac{n_2 \text{ sen } \theta_2}{n_1}$$

sustituyendo $\text{sen } \theta_1 = \frac{1.00 (\text{sen } 90^\circ)}{1.52}$

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} 0.658$$

$$\theta_1 = 41^\circ$$

$$\theta_c = 41^\circ$$

Cualquier rayo que incida sobre la superficie, a un ángulo mayor que el crítico, no podrá refractarse. Toda la luz se reflejará. Habrá ocurrido la reflexión interna total. Se aplica la reflexión interna total en el diseño de binoculares y ha contribuido también en el desarrollo de un campo de la Física, conocido como óptica de fibras. Las fibras ópticas son un ejemplo de una aplicación práctica de la reflexión interna total, ver fig. 48, se usan en medicina en el fibroscopio, permitiendo visualizar las porciones del cuerpo humano, como el estómago, las válvulas del corazón; se utilizan también en las comunicaciones telefónicas mediante señales luminosas.

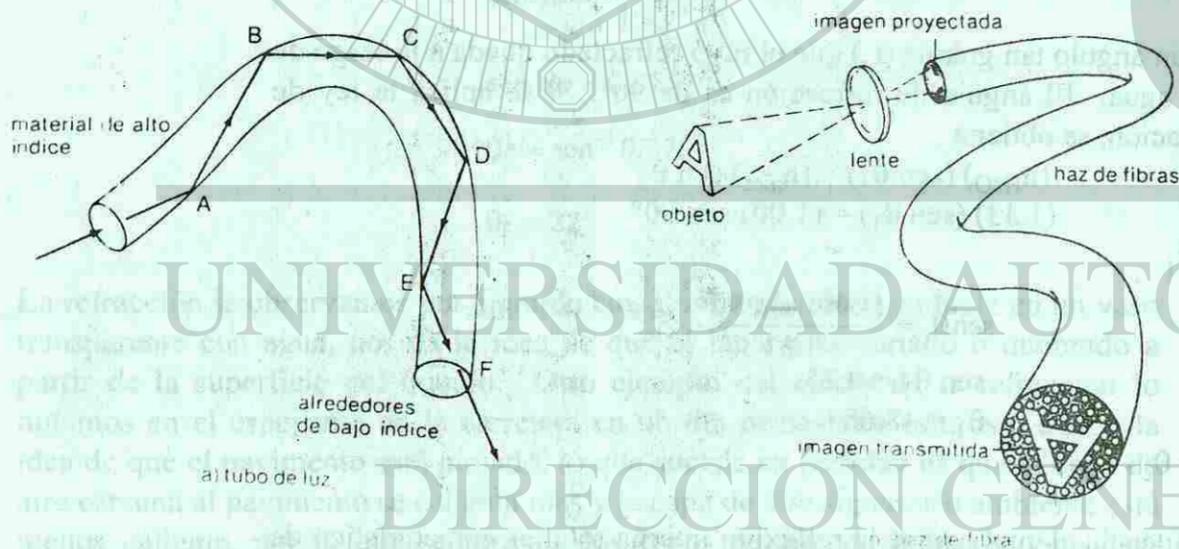


Figura 48.- Fibras ópticas.

13.- Lentes

Las lentes son cuerpos transparentes que se pueden construir de vidrio cristalino o de plástico transparente y están limitados por dos superficies, una esférica y una plana o por dos esféricas. Su uso es esencial en la construcción de telescopios, microscopios, cámaras fotográficas y otros instrumentos ópticos.

Las lentes refractan la luz, al alterar la forma de un frente de ondas cuando pasen de un medio a otro.

Anteriormente se observó un prisma y la forma en que los rayos luminosos se refractan o desvían de su trayectoria original.

Una lente puede concebirse como un juego de prismas, ver fig. 49.

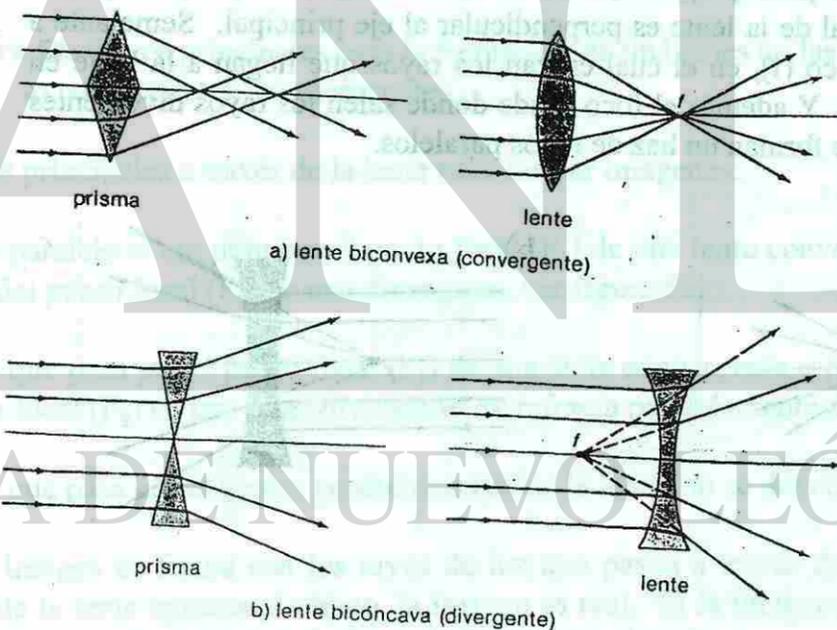


Figura 49.- a) Si se colocan dos prismas de manera que coincidan base con base, esto hace la función aproximada de una lente biconvexa (convergente) y los rayos luminosos convergen en el foco (F). b) Si se colocan dos prismas vértice con vértice, esto hace la función aproximadamente de una lente bicóncava (divergente), y los rayos luminosos divergen.

Los dos tipos principales de lentes son los convergentes y los divergentes. Una lente convergente es aquella que refracta y converge la luz paralela en un punto focal (F) mas allá de la lente; regularmente son lentes cuyo espesor es mayor en el centro y disminuye en sus extremos, ver fig. 50 a). Se usan para amplificar la imagen, por ejemplo en las cámaras fotográficas, microscopios, etc.

Una lente divergente es aquella que refracta y diverge luz paralela de un punto focal (F) localizado enfrente de la lente; regularmente son lentes que tienen menor espesor en su centro que en sus extremos, ver fig. 50b). Este tipo de lentes por ejemplo, los usan las personas que padecen miopía.

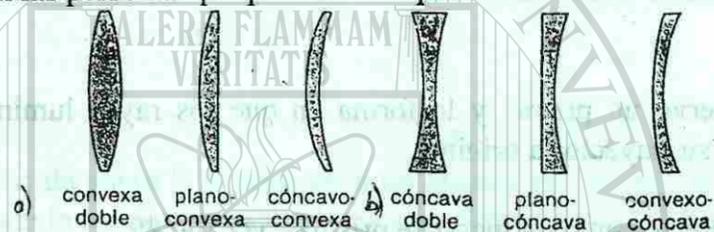


Figura 50. a) Tipos de lentes convergentes. b) Tipos de lentes divergentes.

Una lente tiene un eje principal, el cual es la recta horizontal que pasa por el centro. El plano central de la lente es perpendicular al eje principal. Semejante a los espejos tiene un foco (f), en el cual cruzan los rayos que llegan a la lente en forma paralela a su eje. Y además el foco desde donde salen los rayos divergentes que al atravesar la lente forman un haz de rayos paralelos.

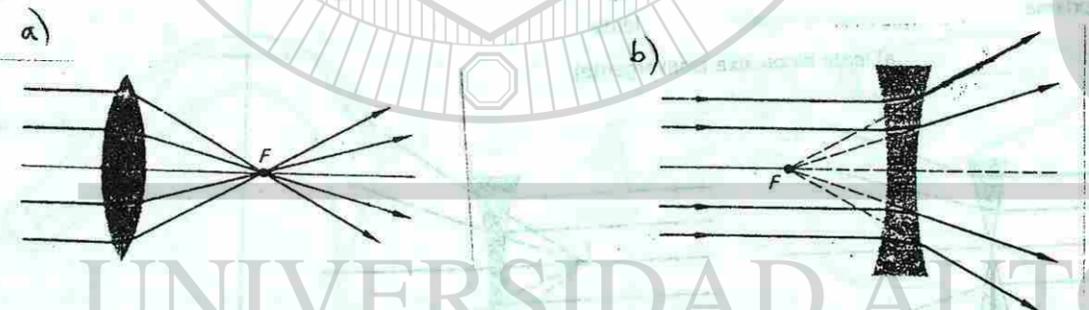


Figura 51.- Los rayos llegan a la lente en forma paralela a su eje. a) Lentes convergentes. b) Lentes divergentes.

La distancia focal (f) de una lente convergente depende de dos factores: la forma de la lente y el índice de refracción del material del que está construida la lente y del índice de refracción del medio que rodea a la lente.

14.- RAYOS PRINCIPALES EN LENTES. OBTENCIÓN DE IMÁGENES.

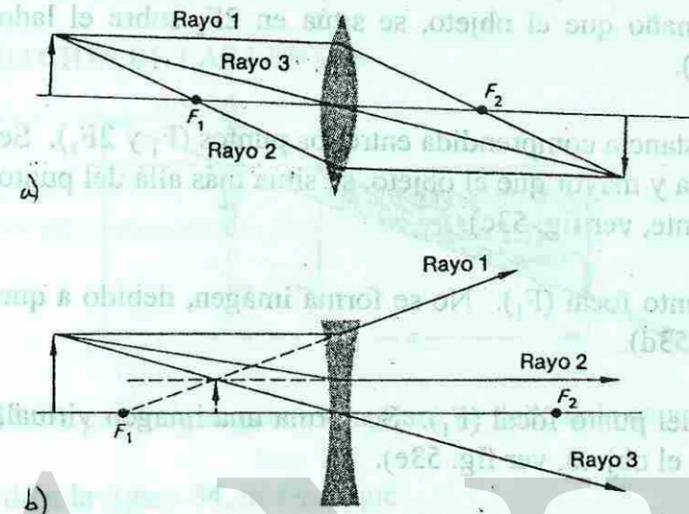


Figura 52. Rayos principales para la formación de imágenes en las lentes: a) convergentes b) divergentes.

Rayos principales a través de la lente para formar imágenes:

Rayo paralelo al eje pasa por el punto focal (F₂) de una lente convergente o parece salir del punto focal (F₁) de una divergente, ver figura 52.

Rayo que pasa por el punto focal (F₁) de una lente convergente o prosigue hacia el punto focal (F₂) de una lente divergente, se refracta paralelamente al eje de la lente.

Rayo que pasa por el centro geométrico (C) de la lente, no se desviará.

Si la imagen se forma con los rayos de luz que pasan a través de ella y del otro lado de la lente opuesta al objeto, la imagen es real. Si la imagen parece estar del mismo lado de la lente que el objeto, la imagen es virtual.

De acuerdo a la distancia del objeto (O) con respecto al punto focal (F).

Si el objeto (O) se localiza a una distancia más allá del punto ($2F_1$). Se forma una imagen (I) real, invertida y menor, entre F_1 y $2F_2$, sobre el lado opuesto de la lente, ver fig. 53a).

Si el objeto se localiza a una distancia igual al punto ($2F_1$). Se forma un imagen real, invertida, del mismo tamaño que el objeto, se sitúa en $2F_2$ sobre el lado opuesto de la lente, ver fig. 53b).

Si el objeto se localiza a una distancia comprendida entre los puntos (F_1 y $2F_1$). Se forma una imagen real, invertida y mayor que el objeto, se sitúa más allá del punto ($2F_2$) en el lado opuesto de la lente, ver fig. 53c).

Si el objeto se localiza en el punto focal (F_1). No se forma imagen, debido a que los rayos son paralelos, ver fig. 53d).

Si el objeto se localiza dentro del punto focal (F_1). Se forma una imagen virtual, derecha y de mayor tamaño que el objeto, ver fig. 53e).

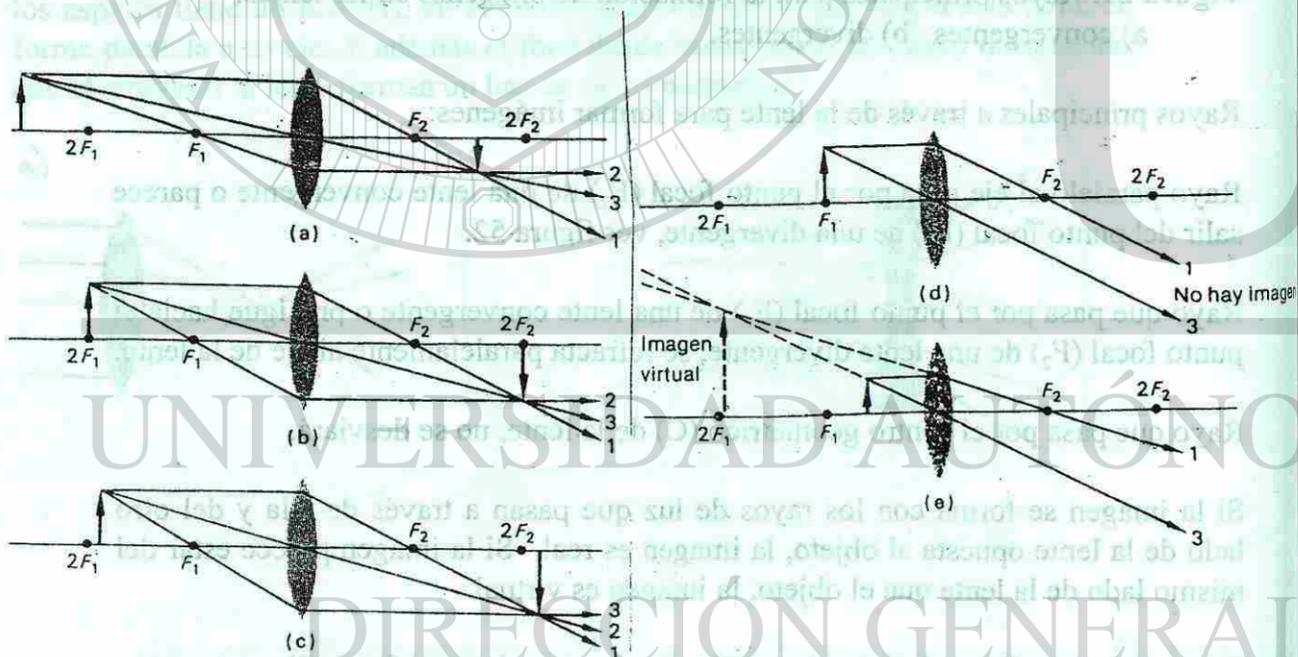


FIGURA 53. Construcción de imágenes de acuerdo a donde se localice el objeto con respecto al punto focal.

Se puede observar que las imágenes formadas por los espejos cóncavos son similares a las formadas por las lentes convergentes (convexas) de la misma manera, las lentes cóncavas y los espejos convexos.

15.- ECUACIÓN DE LAS LENTES

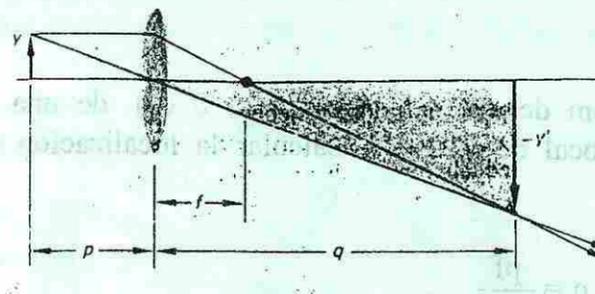


Figura 54. A partir de la geometría plana se deduce la ecuación de las lentes.

De acuerdo a la figura 54, se tiene que p es la distancia al objeto, q es la distancia de la imagen, f es la longitud focal de la lente y y es el tamaño del objeto y y' es el tamaño de la imagen.

En donde la convención de signos es

- 1) Las distancias p y q se consideran positivas para objetos e imágenes reales y negativas para objetos e imágenes virtuales.
- 2) La longitud focal (f) se considera positiva para lentes convergentes y negativa para lentes divergentes.

De tal manera que la ecuación de las lentes es

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

despejando cada variable, nos queda

$$p = \frac{fq}{q-f} \quad q = \frac{fp}{p-f} \quad f = \frac{qp}{p+q}$$

El aumento lateral (M) es la razón del tamaño de la imagen (y') al tamaño del objeto (y), o sea

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

quedando de manera similar que para los espejos. Una ampliación lateral positiva indica que la imagen es derecha y negativa cuando la imagen está invertida.

Veamos los siguientes ejemplos.

Ejemplo 17. Un objeto de 4 cm de altura se localiza a 8 cm. de una lente convergente con una longitud focal de 16 cm. Calcular la localización de la imagen, su tamaño y su tipo.

Como

$$q = \frac{pf}{p-f}$$

sustituyendo

$$q = \frac{(8 \text{ cm})(16 \text{ cm})}{(8 \text{ cm} - 16 \text{ cm})}$$

$$q = -16 \text{ cm.}$$

El signo negativo indica que la imagen es virtual.

Para calcular el tamaño de la imagen, tenemos que

$$M = \frac{y'}{y} = \frac{-q}{p}$$

despejando

$$y' = -\frac{qy}{p}$$

sustituyendo

$$y' = -\frac{(-16 \text{ cm})(4 \text{ cm})}{8 \text{ cm}}$$

$$y' = +8 \text{ cm.}$$

El signo positivo indica que la imagen es derecha.

16.- DISPOSITIVOS ÓPTICOS

El ojo humano. Un instrumento óptico excelente es el ojo, el cual es un globo ocular casi esférico cubierto por una membrana externa de color blanco llamada esclerótica. La luz llega al ojo a través de un tejido transparente llamado córnea. Detrás de la córnea se encuentra el iris, músculo con forma de anillo que cambia el tamaño de la pupila, siendo la pupila una ventana transparente que permite la entrada de la luz al ojo, pasando por el cristalino el cual actúa como una lente, ver fig.55.

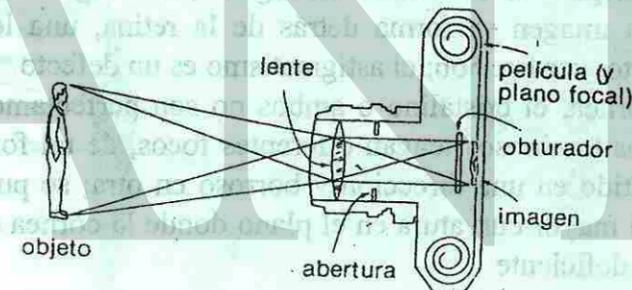
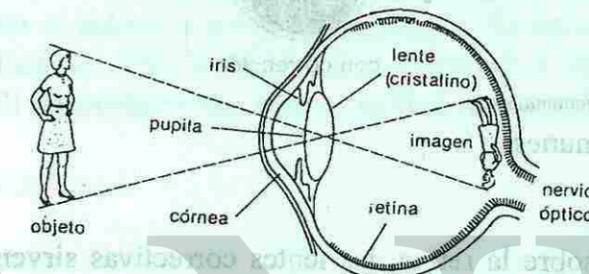


Figura 55. El funcionamiento de una cámara simple es similar al ojo.

El funcionamiento del ojo es similar en varios aspectos al de una cámara simple. Ambos poseen una lente, en el ojo la lente es el cristalino, el cual tiene la capacidad de cambiar de forma de curvatura (acomodación) para enfocar las imágenes de objetos a diferentes distancias del ojo. La imagen se forma en la retina, la cual actúa como pantalla, es una imagen real disminuida e invertida; la pupila se comporta como un diafragma, se envía la impresión por el nervio óptico al cerebro produciendo la sensación de visión, ver fig. 55.

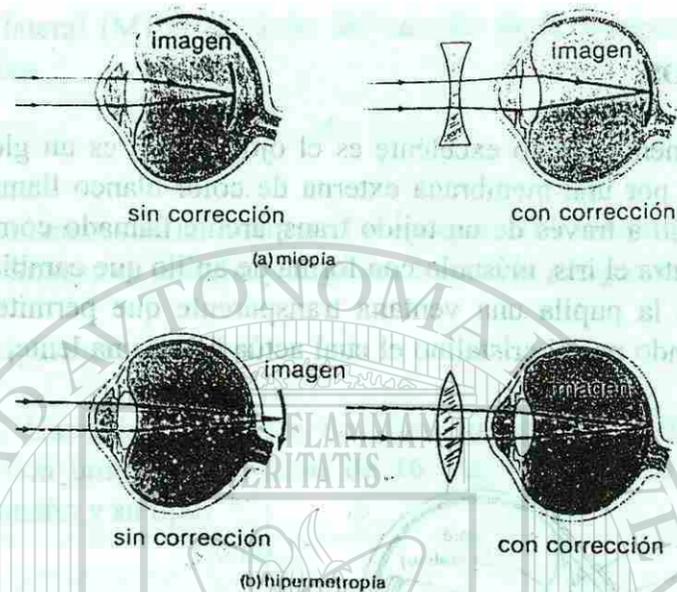


Figura 56. Defectos visuales comunes.

Quando la imagen no se forma sobre la retina, las lentes correctivas sirven para enfocar los objetos, por ejemplo la miopía es cuando la imagen se forma delante de la retina y este defecto se corrige con una lente divergente, ver fig. 56a; la hipermetropía se debe a que la imagen se forma detrás de la retina, una lente convergente corregirá este defecto, ver fig. 56b; el astigmatismo es un defecto común que ocurre cuando la córnea, el cristalino o ambos no son perfectamente esféricos, haciendo que los rayos luminosos tengan diferentes focos, de tal forma que el objeto visto puede ser nítido en una dirección y borroso en otra; se puede corregir con una lente que tenga mayor curvatura en el plano donde la córnea o el cristalino muestre una curvatura deficiente.

Microscopio. El microscopio se basa en dos lentes convergentes. El objeto se coloca muy cerca de la lente inferior (lente objetivo), esta lente forma una imagen real, la cual queda colocada entre la segunda lente (lente ocular) y su punto focal, produciendo una imagen virtual muy aumentada en comparación con la imagen real, ver figura 57.

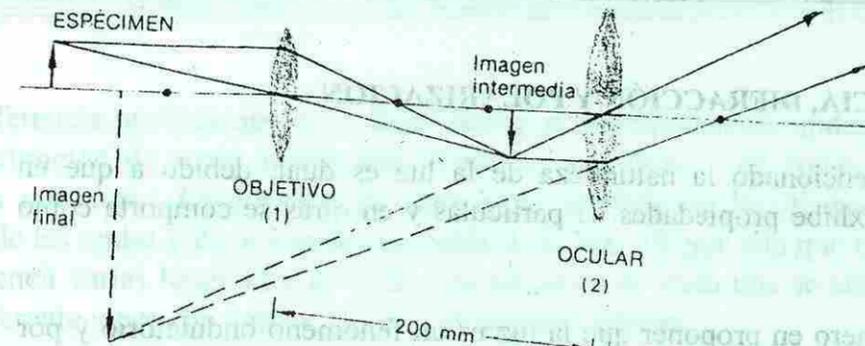


Figura 57. Microscopio. Manera en que se toma la imagen real por el lente objetivo y la imagen virtual que se forma a partir del lente ocular.

El telescopio también usa dos lentes convergentes. La lente objetivo tiene una distancia focal mucho mayor que la del microscopio. La formación de imágenes de un telescopio es debido a que la lente objetivo forma la imagen real e invertida de un objeto distante. Esta imagen se localiza entre el punto focal del ocular y la lente ocular. El resultado es una imagen virtual, aumentada e invertida, ver fig. 58.

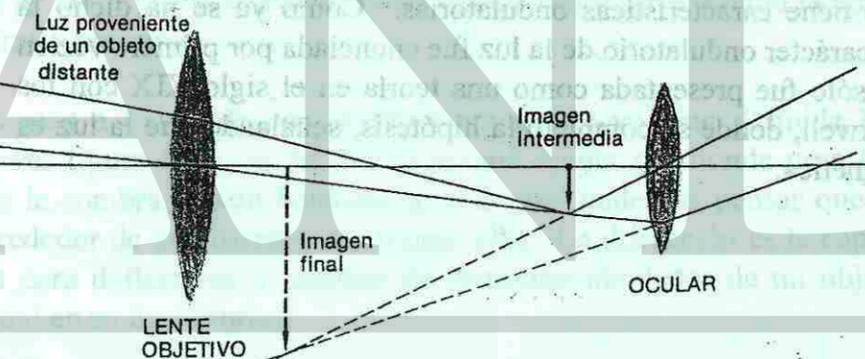


Figura 58. Sistema de lentes de un telescopio.

17.- INTERFERENCIA, DIFRACCIÓN Y POLARIZACIÓN.

Como habíamos mencionado la naturaleza de la luz es dual, debido a que en algunas ocasiones exhibe propiedades de partículas y en otras se comporta como onda.

Huygens fue el primero en proponer que la luz es un fenómeno ondulatorio y por ende, se propaga como un frente de onda, en el cual, cada punto de una onda debe considerarse como una nueva fuente puntual de ondas. Comprobó que la luz tiene naturaleza ondulatoria mediante los fenómenos de interferencia y difracción. Posteriormente, en 1809, E. L. Malus (1775-1812), por primera vez detectó el fenómeno de polarización en la luz reflejada, lo cual apoyó la teoría ondulatoria y comprobó con ello que la luz es una onda transversal, contrario a lo supuesto hasta entonces.

Ahora estudiaremos los fenómenos en los cuales la luz se comporta como una onda. Estos son los fenómenos de interferencia, difracción y polarización.

El hecho, demostrado experimentalmente, de que la luz presenta fenómenos de este tipo indica que tiene características ondulatorias. Como ya se ha dicho la hipótesis acerca del carácter ondulatorio de la luz fue enunciada por primera vez en el siglo XVII, pero sólo fue presentada como una teoría en el siglo XIX con los trabajos de J.C. Maxwell, donde se completó la hipótesis, señalando que la luz es una onda electromagnética.

Interferencia

Ya se ha señalado que la interferencia es un fenómeno ondulatorio, que consiste en la superposición de ondas de iguales características: frecuencia, longitud de onda y fase. En el caso de la luz estas ondas son llamadas ondas coherentes, de manera que la interferencia de la luz en ocasiones se define como la superposición de ondas coherentes.

Todos hemos tenido la oportunidad de observar la interferencia de la luz, que es el fenómeno que provoca la coloración de las películas (capas delgadas) de aceite en el piso o la coloración en las alas de algunos insectos.

La interferencia provoca que en el lugar donde se superponen las ondas aparezca una distribución de zonas iluminadas, llamadas máximos, y de zonas oscuras, llamadas mínimos. La posición de cada zona depende de las distancias a las fuentes de las ondas y de la longitud de onda de la luz. Es por ello que cuando las ondas tienen varias longitudes de onda, los máximos de cada una se sitúan en un lugar diferente y por ello vemos zonas de diferentes colores.

La interferencia tiene gran aplicación práctica. Por ejemplo, si se observa la lente de una cámara fotográfica de buena calidad se verá que tiene una coloración violeta. Esto se debe a que tiene una cubierta, para evitar la reflexión, con ayuda del fenómeno de interferencia.

Se utiliza la interferencia para medir distancias en forma muy exacta, con ayuda de equipos llamados interferómetros.

Difracción

El otro fenómeno ondulatorio que vamos a estudiar es la difracción de la luz. Como ya se ha dicho la difracción consiste en la desviación de la propagación rectilínea de la luz en las cercanías de un objeto opaco, provocando la aparición de zonas claras y oscuras.

Si la luz pasa a través de una abertura grande, se ve bien definida la sombra formada, ver figura 59a), en cambio si es una ranura por donde pasa la luz, los bordes de la sombra se ven borrosos, por lo cual podemos pensar que la luz se desvía alrededor de una barrera, ver figura 59b). La difracción es la capacidad de las ondas para deflectarse o cambiar de dirección alrededor de un objeto opaco (obstáculos) en su trayectoria.

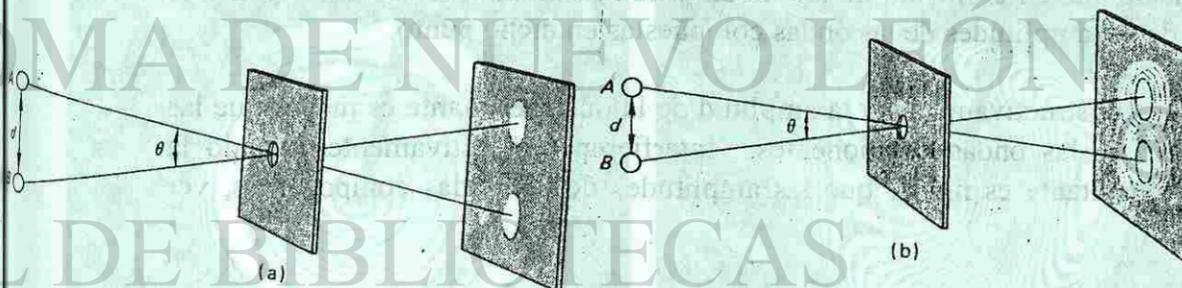


Figura 59. Difracción. a) Mínima (tiene sus fronteras de sombra y luz bien definidas). b) Pronunciada (no tiene bordes delimitados, la zona brillante o de luz se desvanece hacia la oscuridad).

La difracción no es exclusiva de las ranuras angostas o de las aberturas en general, se observa en todas las sombras. La difracción de la luz siempre ocurre, pero su observación no siempre es posible, ya que para que el efecto se observe bien las dimensiones del objeto deben ser del orden de la longitud de onda de la luz, y sabemos que ésta es muy pequeña.

La primera observación sobre la difracción de la luz la realizó Thomas Young en 1801, ver fig. 60.

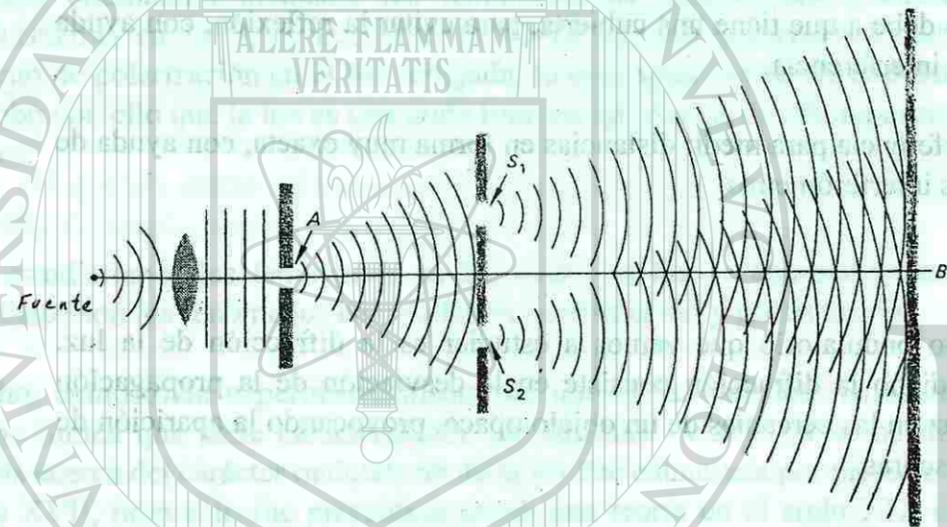


Figura 60. Experimento de Thomas Young.

Observó que la pantalla se iluminó con bandas o franjas brillantes y oscuras alternadas, este fenómeno se debe al comportamiento ondulatorio de la luz. Su origen es el principio de superposición: Si dos o más ondas existen simultáneamente en el mismo medio, la amplitud resultante en cualquier punto es la suma de las amplitudes de las ondas compuestas en dicho punto.

Interfieren constructivamente si la amplitud de la onda resultante es mayor que las amplitudes de las ondas componentes. Interfieren destructivamente, cuando la amplitud resultante es menor que las amplitudes de las ondas componentes, ver figura 61.

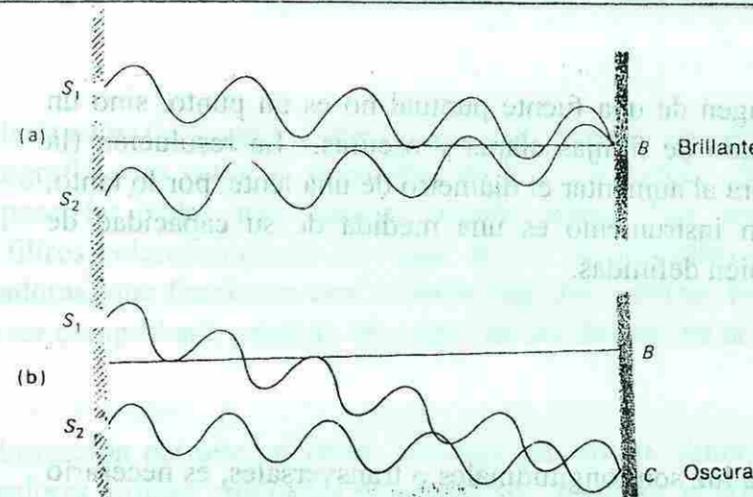


Figura 61. Interferencia a) constructiva b) destructiva

La difracción es muy importante en ampliaciones posibles de un instrumento óptico, ya que establece el límite final. Además, en todo instrumento óptico existe interacción de la luz con objetos opacos, como son diafragmas, monturas de lentes, rendijas, etc. Es por ello que para el diseño correcto de cualquier equipo óptico deben tenerse en cuenta los efectos de la difracción.

Newton observó que se producen bandas de interferencia al colocar una placa de vidrio y una lente e iluminó ésta desde arriba con luz monocromática (por ejemplo una lámpara de vapor de sodio.) ver figura 62. Se producen una serie de anillos luminosos y oscuros, los cuales se conocen como anillos de Newton, son similares a las bandas de interferencia observadas en superficies planas. Este técnica de los anillos de Newton es muy útil para pulir lentes de precisión y examinar lo plano de las superficies de dichas lentes. Si producen bandas uniformes son ópticamente planas.

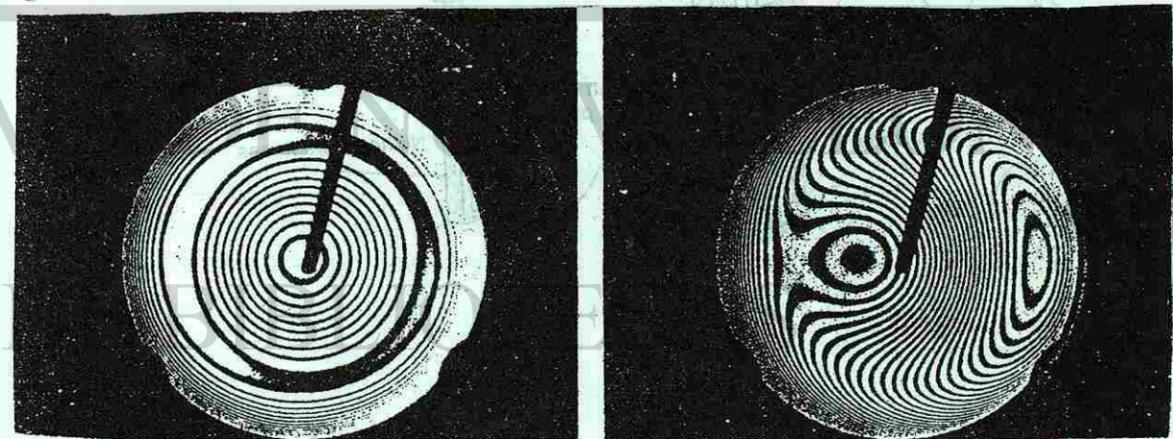


Figura 62. Aplicación de los anillos de Newton en el pulido de las lentes de precisión.

Al construir una lente, la imagen de una fuente puntual no es un punto, sino un pequeño punto brillante rodeado de franjas claras y oscuras. La resolución (la imagen bien definida) se mejora al aumentar el diámetro de una lente, por lo tanto, el poder de resolución de un instrumento es una medida de su capacidad de producir imágenes separadas bien definidas.

Polarización.

Para determinar si las ondas de luz son longitudinales o transversales, es necesario introducir una propiedad de la luz que se interpreta sólo en términos de ondas transversales y se llama polarización. Polarización es el proceso por el cual las oscilaciones transversales de un movimiento ondulatorio están orientadas a un modelo definido. El hecho de que la luz se polarice es debido a su comportamiento ondulatorio. Las ondas luminosas son transversales. A continuación se considera un ejemplo mecánico de ondas transversales en una cuerda vibrante, de tal manera que al ser enviadas y pasar por una rendija, ver fig. 63, se dice que las ondas están polarizadas en un plano particular.

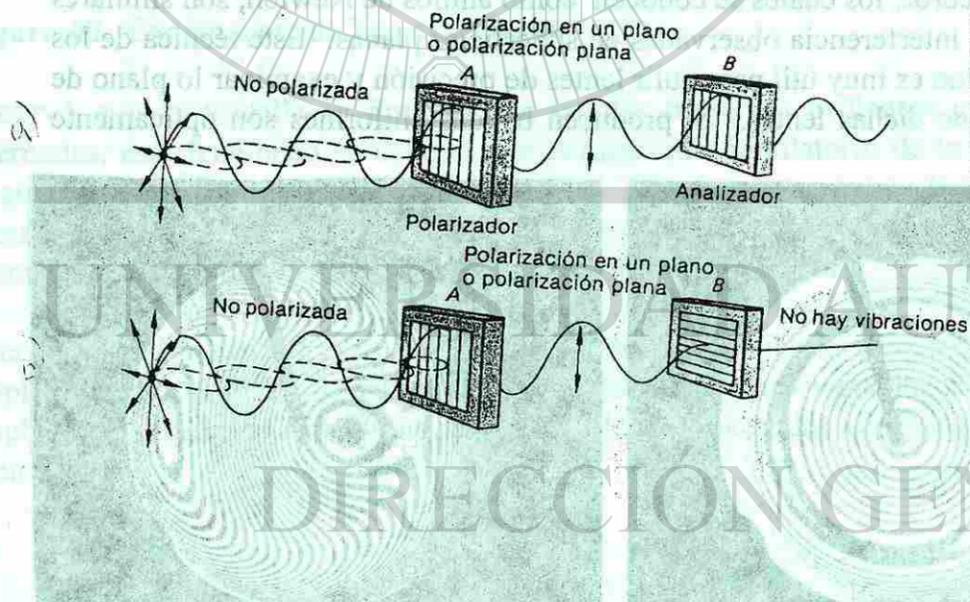


Figura 63.- las ondas que están orientadas en un plano particular tienen polarización plana.

La polarización tiene aplicaciones útiles, por ejemplo las placas Polaroid se usan en fotografía para variar la intensidad de la luz y reducir el reflejo de la luz, al dejar pasar las ondas orientadas en un solo plano. Los lentes polaroid se usan como filtros polarizadores de los rayos de luz, las pantallas de relojes digitales y calculadoras, que funcionan con cristales líquidos, utilizan luz polarizada, lo cual puede ser comprobado pasando un polaroide por delante de la pantalla y rotándolo.

La polarización permite proyectar películas en tercera dimensión para lo cual los espectadores utilizan espejos polarizadores. También se utilizan espejos polarizadores para evitar la reflexión de la luz, reflejada por ejemplo, en las carreteras cuando la luz reflejada puede ser muy molesta para los conductores.

Se puede determinar las tensiones a que están sometidos objetos de plástico o vidrio pasándolos entre dos polaroides, que se pueden tomar de los espejos. Si se pasa una regla plástica entre dos polaroides se observarán una serie de colores, que indica que la regla está sometida a esfuerzos de tensión o compresión., y para objetos más grandes esto puede indicar el lugar más probable de rotura, por lo cual los ingenieros utilizan esta técnica para comprobar la calidad de piezas de vidrio o plástico.

AUTOEVALUACIÓN

Al terminar la unidad contesta lo siguiente.

I.- Lee detenidamente cada enunciado y escribe en el paréntesis de la izquierda la letra correspondiente a la respuesta correcta.

- 1.- () Es cuando el cuerpo va de una posición extrema a otra y regresa a la posición inicial
 - a) Onda electromagnética
 - b) Un ciclo
 - c) Interferencia
 - d) Un valle
 - e) Un nodo
- 2.- () Es un péndulo que oscila, actúa la fuerza de fricción, es el caso real, disminuye el movimiento conforme se disipa la energía debido a la fricción, se le llama a este movimiento
 - a) Longitudinal
 - b) Acelerado
 - c) Amortiguado
 - d) Circular
 - e) Forzado
- 3.- () En un péndulo su movimiento es uniforme, cuando un agente externo suministra energía, se le llama a este movimiento
 - a) Longitudinal
 - b) Acelerado
 - c) Amortiguado
 - d) Circular
 - e) Forzado
- 4.- () Es el tipo de movimiento en el cual el sistema repite sus condiciones de movimiento, al cabo de cierto intervalo de tiempo
 - a) En fase contraria
 - b) Efecto Doppler
 - c) Electromagnético
 - d) Periódico
 - e) Período

- 5.- () Es el movimiento periódico, en el cual el cuerpo repite su trayectoria
 - a) Movimiento periódico
 - b) Movimiento oscilatorio
 - c) Movimiento uniformemente acelerado
 - d) Efecto Doppler
 - e) Período
- 6.- () Es la propagación de una perturbación en el espacio sin que exista transporte de materia
 - a) Una onda
 - b) Un valle
 - c) Un nodo
 - d) Un antinodo
- 7.- () De acuerdo al tipo de movimiento que realizan las partículas del medio, se clasifican en
 - a) Mecánicas y longitudinales
 - b) Transversales y longitudinales
 - c) Mecánicas y transversales
 - d) Mecánicas y electromagnéticas
 - e) Longitudinales y electromagnéticas
- 8.- () Es el tipo de onda en la cual las partículas del medio oscilan en la misma dirección en que se propaga la onda.
 - a) Longitudinal
 - b) Estacionaria
 - c) Tren de onda
 - d) Transversal
 - e) Movimiento ondulatorio
- 9.- () Se clasifican las ondas de acuerdo al medio por donde se propagan.
 - a) Transversales y longitudinales
 - b) Mecánicas y transversales
 - c) Mecánicas y electromagnéticas
 - d) Mecánicas y longitudinales
 - e) Longitudinales y electromagnéticas

10.- () Es el tipo de onda que necesita un medio mecánico elástico material para poder propagarse.

- c) Electromagnético
- b) Mecánica
- c) Longitudinal
- d) Transversal
- e) Estacionaria

11.- () Se les llama a los pulsos superiores de una onda transversal.

- a) Valles
- b) Crestas
- c) Amplitud
- d) Longitud de onda
- e) Frecuencia

12.- () Son los puntos que están en la posición de equilibrio o su desplazamiento es cero

- a) Antinodos
- b) Longitud de onda
- c) Amplitud
- d) Nodos
- e) Frecuencia

13.- () Es la distancia mínima entre dos puntos que tengan idéntico estado de movimiento

- a) Frecuencia
- b) Longitud de onda
- c) Amplitud
- d) Valles
- e) Crestas

14.- () Es el máximo desplazamiento que alcanzan los puntos del medio, medido a partir de la línea de equilibrio

- a) Longitud de onda
- b) Frecuencia
- c) Estacionaria
- d) Amplitud
- e) Nodos

15.- () Es el número de crestas completas que pasan por un punto del medio en la unidad de tiempo.

- a) Frecuencia
- b) Período
- c) Amplitud
- d) Longitud de onda
- e) Nodos

16.- () Es el tiempo necesario para que la perturbación se propague una distancia igual a longitud de onda,

- a) Frecuencia
- b) Amplitud
- c) Período
- d) Longitud de onda
- e) Nodos

17.- () Si entre dos puntos de una onda existe una separación de un número entero de longitud de onda, se dice que

- a) Están desfasados
- b) Están en fase
- c) Forman una onda estacionaria
- d) Forman interferencia
- e) Forman difracción

18.- () 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

- a) El periodo
- b) Principio de superposición
- c) La velocidad de propagación de la luz
- d) La longitud de onda
- e) La amplitud de la onda

19.- () Es un caso de superposición cuando las ondas que se superponen tienen las mismas características de frecuencia y longitud de onda se propagan a través del mismo medio, al mismo tiempo y se superponen

- a) Reflexión
- b) Refracción
- c) Interferencia de ondas
- d) Difracción
- e) Efecto Doppler

- 20.- () Si se superponen las ondas de tal manera que las crestas y los valles de ambas ondas coinciden la onda resultante tiene mayor amplitud.
- La interferencia es destructiva
 - La onda resultante tiene mayor longitud de onda
 - La onda resultante tiene igual amplitud
 - La onda resultante tiene menor amplitud
 - La onda resultante tiene mayor amplitud
- 21.- () En la interferencia destructiva los trenes de onda que se superponen están.
- En fase
 - En fase contraria
 - Coinciden sus crestas
 - Coinciden sus valles
 - Coinciden sus crestas y sus valles
- 22.- () Se presenta cuando una onda encuentra un obstáculo, lo puede rodear, de modo que existe perturbación detrás del obstáculo.
- Interferencia
 - Difracción
 - Coinciden sus crestas
 - Coinciden sus valles
 - Coinciden sus crestas y sus valles
- 23.- () Se produce cuando interfieren dos movimientos ondulatorios de la misma frecuencia y amplitud que se propagan en sentido contrario.
- Onda transversal
 - Onda estacionaria
 - Frecuencia
 - Onda longitudinal
 - Longitud de onda
- 24.- () Se presenta cuando una onda pasa de un medio a otro de propiedades diferentes
- Interferencia constructiva
 - Difracción
 - Reflexión
 - Refracción
 - Efecto Doppler

- 25.- () El movimiento de un péndulo que oscila a lo largo de un plano único en un arco pequeño, es un ejemplo de movimiento
- Longitudinal
 - Circular
 - Circular uniforme
 - Armónico simple
 - Acelerado
- 26.- () La energía se transfiere desde la fuente, en forma de ondas sonoras longitudinales en
- La luz
 - El sonido
 - El movimiento armónico
 - La polarización
 - El movimiento oscilatorio
- 27.- () Se observa la variación de frecuencia de la onda cuando existe un movimiento relativo entre la fuente y el observador en todo movimiento ondulatorio mecánico o electromagnético
- Efecto Doppler
 - Movimiento periódico
 - Ley de Hooke
 - Sonoridad
 - Ruido
- 28.- () Es la superposición de ondas sonoras de diferentes frecuencias, resultando indeseable al percibirlo
- Efecto Doppler
 - Movimiento periódico
 - Ley de Hooke
 - Sonoridad
 - Ruido
- 29.- () El análisis de la luz considerando la difracción se le conoce como
- Óptica
 - Óptica geométrica
 - Óptica física
 - Iluminación
 - Intensidad

II.- Completa las siguientes aseveraciones

- 1.- _____ tiene la característica que las partículas están unidas por fuerzas elásticas.
- 2.- _____ es aquella onda en la cual las partículas del medio se mueven en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación.
- 3.- _____ es el tipo de onda que no necesita de un medio para propagarse.
- 4.- _____ es el pulso inferior de una onda transversal.
- 5.- _____ es el máximo desplazamiento que alcanzan los puntos del medio, medidos a partir de la posición de equilibrio.
- 6.- _____ es el número de crestas que pasan por un punto del medio en la unidad de tiempo.
- 7.- _____ es el tiempo necesario para que la perturbación propague una distancia igual a una longitud de onda.
- 8.- _____ son los que caracterizan la interacción de las ondas con la materia.
- 9.- _____ es la ciencia que estudia el sonido.
- 10.- _____ describe la amplitud de la onda sonora.
- 11.- _____ son las características de las ondas sonoras que detecta el oído humano.
- 12.- _____ es la medida de la intensidad del sonido en relación con el cero standard de la intensidad.
- 13.- _____ define: la fuerza de restitución que actúa para que un cuerpo recupere su posición de equilibrio es directamente proporcional al desplazamiento del cuerpo, y de sentido contrario.

- 14.- _____ es el punto de la onda estacionaria en el cual el desplazamiento resultante es máximo.
- 15.- _____ es la rama de la física que estudia la luz y los fenómenos que produce.
- 16.- _____ considera que la luz tiene un comportamiento corpuscular.
- 17.- _____ son las características principales de la luz para analizar su naturaleza ondulatoria o corpuscular.
- 18.- _____ es la cantidad de energía luminosa que atraviesa una superficie perpendicular a los rayos de luz, en la unidad de tiempo.
- 19.- _____ es la razón del flujo luminoso a la unidad del ángulo sólido.
- 20.- _____ es el flujo luminoso en la unidad de área.
- 21.- _____ son la diferencia básica de las clases de radiaciones electromagnéticas que existen en el espectro electromagnético.
- 22.- _____ es el fenómeno mediante el cual se obtienen los colores del iris.
- 23.- _____ es el proceso por el cual las oscilaciones transversales de un movimiento ondulatorio están orientadas a un modelo definido.
- 24.- _____ es toda superficie lisa que refleja los rayos de luz que recibe.
- 25.- _____ son cuerpos transparentes que se pueden construir de vidrio cristalino o de plástico transparente, refractan la luz y se usan en la construcción de instrumentos ópticos.

III.- Resuelve los siguientes problemas.

1.- Una persona puede oír sonidos comprendidos en un intervalo de frecuencia de aproximadamente 16 Hz a 20000 Hz. Determina la longitud de onda en estos límites, si la velocidad del sonido es de 340 m/s.

$$R = 21.25\text{m}$$

2.- La estación de radio EAR transmite a 750 kHz. La velocidad de la onda de radio es de 3×10^8 m/s. ¿cuál es la longitud de onda?

$$R = 400\text{m}$$

3.- Las ondas de un radar con una longitud de onda de 3.3 cm se emiten en un transmisor. Su velocidad es de 3×10^8 m/s ¿Cuál es su frecuencia?

$$R = 9.09 \times 10^9 \text{Hz}$$

4.- Cuando se hace vibrar una cuerda a 120 Hz, se producen ondas transversales en la cuerda de 33 cm de longitud de onda. ¿Cuál es la rapidez de las ondas sobre la cuerda?

$$R = 39.6\text{m/s}$$

5.- Un hombre se sienta en el borde de un muelle para pasear y cuenta las ondas de agua que golpean un poste de soporte del muelle; en un minuto cuenta 90 ondas. Si una cresta en particular viaja 10 m en 4 s, ¿cuál es la longitud de onda de las ondas

$$R = 1.67\text{m}$$

6.- Un péndulo simple de un geólogo tiene 30 cm de longitud y 0.911 Hz de frecuencia en determinado lugar de la Tierra. ¿Cuál es la aceleración de la gravedad en ese lugar?

$$R = 9.95\text{m/s}$$

7.- Calcula la velocidad del sonido en el aire a una temperatura de a) 10°C b) 30°C c) 35°C

$$R = 336 \frac{\text{m}}{\text{s}}, 348 \frac{\text{m}}{\text{s}}, 351 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

8.- Calcula el nivel de intensidad del sonido cuando la intensidad es 2×10^{-6} W/cm².

$$R = 103\text{dB}$$

9.- Si un sonido tiene una intensidad de $10^{-10} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ¿Cuál es el nivel de intensidad en dB?

$$R = 20\text{dB}$$

10.- Una ambulancia lleva una velocidad de 70 Km/h y su sirena suena con una frecuencia de 600 Hz. ¿Qué frecuencia aparente escucha un observador que está parado, cuando

a) La ambulancia se acerca a él

b) La ambulancia se aleja de él. Considera la velocidad del sonido en el aire de 340 m/s.

$$R = 636.39\text{Hz}, 567.54\text{Hz}$$

11.- Un carro de la policía federal de caminos se mueve a 110 km/h, haciendo sonar su sirena con una frecuencia de 800 Hz. Encuentra la frecuencia aparente escuchada por un observador en reposo, cuando

a) El carro se acerca a él.

b) El carro se aleja de él.

$$R = 878.97\text{Hz}, 734.04\text{Hz}$$

12.- Un automovilista que viaja a una velocidad de 80 km/h escucha el silbato de una fábrica cuya frecuencia es de 1000 Hz. Calcula la frecuencia aparente escuchada por el automovilista cuando

a) Se acerca a la fuente

b) Se aleja de la fuente

$$R = 934.64\text{Hz}, 1065.35\text{Hz}$$

13.- Determina la iluminación producida por una lámpara eléctrica de 500 candelas a una distancia de 6 m.

$$R = 13.89/\text{x}$$

14.- Una superficie de una mesa está 3 m abajo de una lámpara de 180 candelas. Calcula la iluminación en la superficie.

$$R = 20/\text{x}$$

15.- Una lámpara de alumbrado público produce 6 lux de iluminación a una distancia de 5 m. Calcula la intensidad luminosa de la lámpara.

$$R = 150\text{cd}$$

16.- Calcula la distancia a la que debe colocarse una lámpara eléctrica de 200 candelas para que produzca sobre la superficie de una mesa una iluminación de 20 lux.

$$R = 3.16\text{m}$$

17.- Un radiador de microondas que se emplea para medir la velocidad de los automóviles emite radiación de frecuencia 1.2×10^9 Hz ¿Cuál es la longitud de onda en nanómetros?

$$R=25 \times 10^7 \text{ nm}$$

18.- Cuando la luz de longitud de onda de 600 nm pasa del aire a una placa de vidrio delgada y de nuevo hacia el aire, la frecuencia permanece constante, pero la velocidad en el vidrio se reduce a 2.6×10^8 m/s. ¿Cuál es la longitud de onda dentro del vidrio?

$$R=520 \text{ nm}$$

19.- Si la velocidad de la luz en un medio determinado es 2.1×10^8 m/s y la velocidad de la luz en el vacío es 3×10^8 m/s ¿Cuál es el índice de refracción de dicho medio?

$$R=1.43$$

20.- Si un rayo entra con un ángulo de incidencia de 50° a un pedazo de vidrio con un índice de refracción de 1.52. ¿Cuál es el ángulo de refracción?

$$R=30.26^\circ$$

21.- Calcula la longitud focal de un espejo convergente, cuyo radio de curvatura es de 16 cm.

$$R=+8 \text{ cm}$$

22.- Calcula el tipo de imagen formada y su colocación con respecto a un espejo cóncavo, si el foco está a 10 cm y el objeto se coloca a 15 cm. del vértice de dicho espejo.

$$R=+30 \text{ (imagen real e invertida)}$$

23.- Encuentra la posición de la imagen, si el objeto se localiza a 7 cm de un espejo convexo, cuya longitud focal es 9 cm.

$$R=-3.94 \text{ (imagen virtual)}$$

24.- Un objeto de 10 cm se localiza a 20 cm de un espejo cóncavo, cuya longitud focal es de 15 cm. Encuentra la posición, tamaño y tipo de imagen.

$$R=+60 \text{ cm (imagen real), } -30 \text{ cm (imagen invertida) } -3 \text{ (aumento)}$$

25.- Un objeto de 45 cm se localiza a 60 cm de un espejo cóncavo, cuya longitud focal es de 20 cm. Encuentra la posición, tamaño y tipo de imagen.

$$R=+30 \text{ cm, } -22.5 \text{ cm, } -\frac{1}{2} \text{ aumento de la imagen real invertida}$$

26.- Encuentra la posición, tamaño y tipo de imagen de un objeto que mide 40 cm y se localiza a 60 cm de un espejo cóncavo, cuya longitud focal es de 30 cm.

$$R=+60 \text{ cm, } -40 \text{ cm, } -1 \text{ aumento de la imagen real invertida}$$

27.- Un objeto de 6 cm de altura se localiza a 10 cm de una lente convergente, con una longitud focal de 20 cm. Calcula donde se localiza la imagen, su tamaño y su tipo.

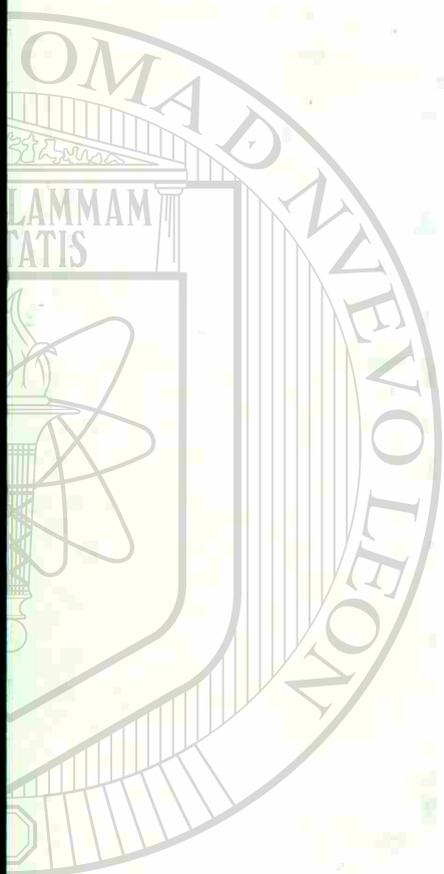
$$R=-20 \text{ cm, } +12 \text{ cm, } +2 \text{ aumento de la imagen virtual derecha}$$

28.- Un objeto de 10 cm. de altura se localiza a 30 cm de una lente convergente, con una longitud focal de 50 cm. Calcula donde se localiza la imagen, su tamaño y su tipo.

$$R=-75 \text{ cm, } +25 \text{ cm, } 2.5 \text{ aumento de la imagen virtual derecha}$$

29.- Un objeto de 3 cm de altura se localiza a 7 cm de una lente convergente, con una longitud focal de 12 cm. Calcula donde se localiza la imagen, su tamaño y su tipo.

$$R=-16.8 \text{ cm, } +7.2 \text{ cm, } 2.4 \text{ aumento de la imagen virtual derecha}$$



UAN

SIDAD AUTÓNOMA DE NUE
ECCIÓN GENERAL DE BIBLIOT