

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

SECRETARÍA GENERAL

**DIRECCIÓN GENERAL DE INCORPORACIÓN Y REVALIDACIÓN
DE ESTUDIOS**

**TEMARIO-GUÍA DE FÍSICA IV
(1606)**

Plan CCH - 1996

PRESENTACIÓN

La presente guía pretende orientarte en la preparación del examen extraordinario de Física IV. Está basada en el programa de estudio de la asignatura de Física IV del plan de estudio del Colegio de Ciencias y Humanidades de la UNAM, con un número de créditos de 10 unidades. Contiene indicaciones sobre el modo de empleo de esta guía así como una glosa de los contenidos temáticos de las unidades que marca el programa de estudio. A continuación se presentan actividades de aprendizaje que deberás realizar para un mejor aprovechamiento de este documento.

También contiene un cuestionario de autoevaluación, con sus respuestas, para que tengas un indicador sobre tus aprendizajes. Finalmente se tiene un listado de textos que te apoyarán en la búsqueda de información sobre la asignatura y esta guía.

ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
I. INTRODUCCIÓN	4
II. TEMARIO DE ESTUDIO	5
III. ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE	6
IV. EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN	43
V. BIBLIOGRAFÍA	48

I. INTRODUCCIÓN

La guía está estructurada de acuerdo a lo siguiente: modo de empleo de la guía; antecedentes o prerrequisitos del curso; programa; actividades de aprendizaje; resumen de lo básico de cada unidad así como algunas preguntas y problemas para reforzar las lecturas de los temas; examen para autoevaluación y una bibliografía de apoyo.

En los antecedentes se enlistan los conceptos, tanto de Física como de Matemáticas, que debes manejar para la comprensión de las unidades temáticas. En el programa, aparecen los objetivos y contenidos temáticos del curso, estructurados de acuerdo a una lógica de la asignatura y empleando técnicas pedagógicas. En las actividades de aprendizaje se sugieren algunas formas o técnicas para lograr la comprensión de aspectos conceptuales o teóricos. A continuación se exponen los temas de manera resumida, destacando los conceptos fundamentales de cada unidad temática, además del manejo de las ecuaciones o fórmulas en la resolución de problemas de aplicación.

Lee y estudia toda la guía. Localiza las partes que te parezcan con mayor grado de dificultad y pide ayuda a tus compañeros o profesores del curso para aclarar esas partes.

Es importante que lleves a cabo todas las sugerencias que se indican, para tener los resultados deseados.

Las sugerencias de autoevaluación se han diseñado con la intención de que tengas una visión acerca de tu aprendizaje, comprensión y manejo de los temas del programa, para que identifiques los que ya manejas y los que desconoces a fin de que pongas mayor atención en estos últimos.

Ten presente que el resolver la guía no es garantía de aprobar el examen, pero sí aumenta tus probabilidades pues te proporciona elementos de seguridad y apoyo para conseguirlo, debido a que conocerás la temática y estructura del cuestionario.

Antecedentes académicos

Para comenzar el estudio de los contenidos temáticos de esta asignatura, se sugiere que realices un repaso o recordatorio de los siguientes temas, que son básicos para su comprensión:

Conceptos de electrostática, ley de Ohm y circuitos en serie y en paralelo; sistema de referencia.

campos eléctricos y magnéticos, propiedades ondulatorias de la luz y radiaciones electromagnéticas.

Deberás emplear un sistema consistente de unidades cuando se lleven a cabo los cálculos. El sistema usual es el sistema internacional de unidades, SI. Además cuando se resuelvan los problemas numéricos se deberán comprobar los resultados con un análisis dimensional, para asegurarse del buen manejo de las unidades de medición.

II. TEMARIO DE ESTUDIO

Los contenidos temáticos se presentan de manera resumida, por lo que deberás utilizar los textos sugeridos para tener más información sobre ellos:

UNIDAD III: SISTEMAS ELECTROMAGNÉTICOS

- 7. Circuitos eléctricos de corriente eléctrica
 - 7.1 Diferencia de potencial, corriente eléctrica y baterías
 - 7.2 Resistencias condensadores
 - 7.3 Circuitos eléctricos RC de corriente directa
- 8. Magnetismo e inducción electromagnética
 - 8.1 Imanes permanentes
 - 8.2 Relaciones entre campos magnéticos y corrientes eléctricas
 - 8.3 Ley de Faraday-Henry
 - 8.4 Leyes de Ampere-Maxwell
 - 8.5 Generación y transmisión de electricidad
 - 8.6 Circuitos eléctricos de corriente alterna

UNIDAD IV: SISTEMAS ÓPTICOS

- 10. Óptica geométrica
 - 10.1 Reflexión y Refracción de la luz
 - 10.2 Espejos planos y esféricos
 - 10.3 Lentes cóncavas y convexas
 - 10.4 Instrumentos ópticos
- 11. Óptica física
 - 11.1 Dispersión y color
 - 11.2 Interferencia y difracción
 - 11.3 Polarización

Recuerda que debes manejar conceptos, como las unidades de medición de cada magnitud. Así como la conversión de unidades; funciones trigonométricas; despeje de fórmulas; operaciones con potencias positivas y negativas; la interpretación de gráficas y la solución de ecuaciones simultáneas con dos incógnitas.

III. ACTIVIDADES DE APRENDIZAJE

Lo primero que debes hacer es leer toda la guía para tener una visión general del curso y cómo estudiar.

Estudia cada unidad temática de la guía destacando (puedes subrayar) aquellos conceptos que son fundamentales en cada una de ellas. Puedes hacer una lista de conceptos con sus definiciones y ecuaciones, como si hicieras un "acordeón".

Consulta en los textos, para ampliar la información, aquellos conceptos que se destacaron.

Discute y analiza con otros compañeros el desarrollo de cada unidad temática. Responde las preguntas y problemas que aparecen en cada unidad.

Consulta con algún profesor de la asignatura las dudas que tengas al respecto.

Cuando consideres que haz comprendido cada tema y sus conceptos principales, resuelve el examen de autoevaluación que se sugiere al final de la guía.

Confronta tus respuestas con las que se dan para tal efecto.

No dejes a la suerte el resultado de tu examen extraordinario, de tu estudio depende tener éxito.

A continuación se presentan de manera resumida los contenidos temáticos del Programa, los que deberás complementar con los textos, solicitando asesorías a los profesores de la materia y discutiendo con tus compañeros.

UNIDAD III.- SISTEMAS ELECTROMAGNÉTICOS

7.- CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE CORRIENTE DIRECTA

Introducción

Las leyes de la electricidad y el magnetismo son fundamentales en el funcionamiento de muchos aparatos, como el radio, el televisor, motores eléctricos, computadoras, aceleradores de partículas de alta energía y otros aparatos electrónicos. A nivel atómico, la electricidad interviene en las fuerzas interatómicas e intermoleculares responsables de la formación de sólidos y líquidos, como si fuera un resorte a nivel microscópico.

Documentos chinos muestran que el magnetismo ya era conocido en el año 2000 AC. Los griegos ya habían observado fenómenos eléctricos y magnéticos en el año 700 AC, encontrando que cuando se frotaba una pieza de ámbar atraía pedazos de paja u hojas. Al magnetismo lo asociaron a la piedra de magnetita (Fe_3O_4), que era atraída por el hierro. De estas dos observaciones se derivan los vocablos electricidad y magnetismo. La palabra electricidad proviene del vocablo griego elektron, que significa ámbar. La palabra magnetismo proviene de Magnesia, el nombre de la provincia griega donde se encontró la magnetita.

William Gilbert descubrió que la electricidad no estaba limitada al ámbar, se podía electrificar una gran cantidad de objetos y materiales, incluyendo animales y personas. Pero fue hasta la primera mitad de siglo XIX cuando los científicos establecieron que la electricidad y el magnetismo eran fenómenos relacionados. En 1819 Hans Christian Oersted descubrió que la aguja de una brújula se desviaba cuando se colocaba cerca de un conductor que conducía una corriente eléctrica. En 1831 Michael Faraday y Joseph Henry mostraron que cuando un alambre se movía cerca de un imán, o cuando el imán se movía cerca del alambre, se establecía una corriente eléctrica en el alambre. En 1873 James Clerk Maxwell utilizó estas observaciones, además de haber realizado otros experimentos, como base para formular las leyes del electromagnetismo que se conocen ahora, leyes equiparables a las leyes de Newton. Poco tiempo después, en 1888, Heinrich Hertz verificó las predicciones de Maxwell, produciendo ondas electromagnéticas en el laboratorio, iniciando con ello la radio y la televisión.

7.1. Diferencia de potencial, corriente eléctrica y baterías

Carga eléctrica, Ley de Coulomb, Campo eléctrico y potencial.

Si caminas sobre una alfombra en un día seco, puedes producir un chispazo al acercar tu dedo u otra parte de tu cuerpo a una persona o superficie metálica. También es posible producir chispas al acercar la mano al cinescopio de TV o al monitor de una computadora. Estos dos ejemplos bastan para mostrar que las cargas eléctricas se encuentran en muchos lugares y objetos, incluso en nuestros cuerpos. La carga eléctrica es una característica intrínseca de las partículas fundamentales de la materia.

Las cargas eléctricas se clasifican en cargas positivas (+) y cargas negativas (-). En la naturaleza, la mayor parte de los objetos que la componen tienen cargas eléctricas, casi siempre en equilibrio unas con otras. Cuando existe desequilibrio entre las cargas, se dice que el cuerpo está cargado o tiene una carga eléctrica neta. A falta de carga eléctrica positiva se dice que el cuerpo tiene carga negativa, y en ausencia de carga negativa se dice que el cuerpo tiene carga positiva.

La forma más sencilla de cargar un cuerpo es frotarlo con otro. Por ejemplo, si frotamos una varilla de vidrio con un pedazo de seda, en los puntos de contacto entre la seda y el vidrio se transfieren cantidades diminutas de carga de uno al otro, perturbando ligeramente la neutralidad eléctrica de cada uno. Esta forma de cargar eléctricamente a los objetos, se llama frotamiento o contacto. Si suspendemos la varilla cargada de un hilo aislado eléctricamente para que su carga no pueda cambiar, y acercamos una segunda varilla de vidrio cargada (Fig. 1a), las dos varillas se rechazan; es decir, cada una experimenta una fuerza dirigida en sentido contrario a la otra. Sin embargo, si nosotros frotamos una varilla de plástico con piel y la acercamos a la varilla de vidrio suspendida (Fig. 1b), las dos se atraen; es decir, cada varilla experimenta una fuerza dirigida hacia la otra.

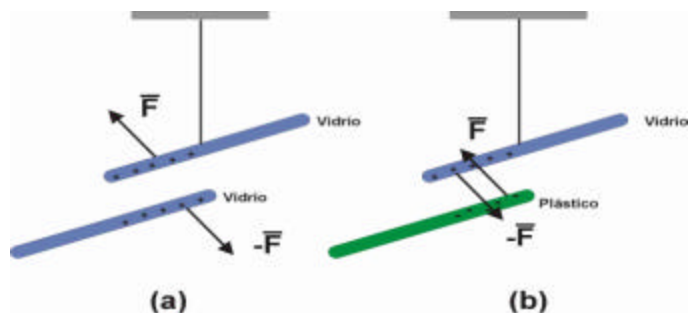


Figura 1

Podemos entender estos dos ejemplos en términos de cargas eléctricas positivas y negativas. Cuando una varilla de vidrio se frota con seda, el vidrio pierde algunas de sus cargas negativas, adquiriendo una carga positiva neta (representada por signos positivos en la Figura 1a). Cuando la varilla de plástico se frota con piel, el plástico gana carga negativa (representada por signos menos en la figura 1b). Los signos “positivo (+)” y “negativo (-)” para la carga eléctrica fueron escogidos arbitrariamente por Benjamín Franklin. De lo anterior se desprende que:

1. Cargas eléctricas del mismo signo se rechazan.
2. Cargas de signo contrario se atraen.

En algunos materiales, como metales, el agua y el cuerpo humano, las cargas negativas pueden moverse libremente, por lo que a tales materiales se les llama materiales conductores. En otros materiales, como vidrio, agua químicamente pura y plástico, las cargas no pueden moverse libremente, por lo que son llamados materiales no conductores o aislantes.

Las propiedades de los conductores y los aislantes son debidas a la estructura y la naturaleza eléctrica de átomos. Los átomos consisten de protones positivamente cargados ($e=1.6 \times 10^{-19}$ C), electrones negativamente cargados ($-e= -1.6 \times 10^{-19}$ C) y los neutrones eléctricamente neutros. La unidad que mide la carga eléctrica de los cuerpos es el Coulomb (C). Se considera que los protones y neutrones están firmemente unidos en el núcleo del átomo. La carga de un solo electrón y de un solo protón es de la misma magnitud pero signo opuesto, por lo que el átomo es eléctricamente neutro, contiene un número iguales de electrones y protones.

Los átomos de un conductor como el cobre forman un sólido, algunos de los electrones externos (débilmente ligados) no permanecen atados a los átomos, se desprenden fácilmente para vagar dentro del sólido, formando átomos cargados positivamente (iones positivos). A estos electrones en movimiento se les llama electrones de conducción.

Una varilla de plástico negativamente cargada atraerá las cargas positivas de una barra neutra de cobre, debido a que los electrones de la conducción en el extremo más lejano de la barra de cobre son rechazados por la carga negativa de la varilla de plástico. Aunque la barra de cobre es todavía neutra, se dice que tiene una carga inducida, es decir, las cargas positivas y negativas han sido reacomodadas por la presencia de una carga eléctrica cercana. Fuerza eléctrica.

La fuerza de atracción o repulsión entre cargas eléctricas se determina cuantitativamente por la ley de Coulomb. A este tipo de fuerza se le llama fuerza electrostática (o la fuerza eléctrica) entre dos cargas. El término electrostático se usa para enfatizar cargas estacionarias o que se mueven muy despacio. Esta ley dice que dos partículas cargadas q_1 y q_2 , separadas una distancia r , están sometidas a una fuerza de atracción o repulsión entre ellas, la cual tiene una magnitud

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

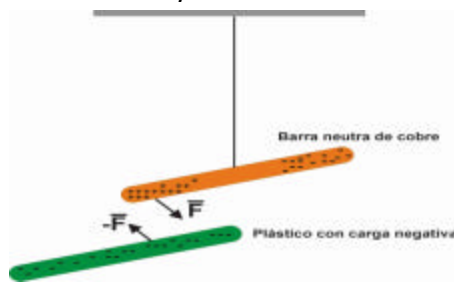


Figura 2

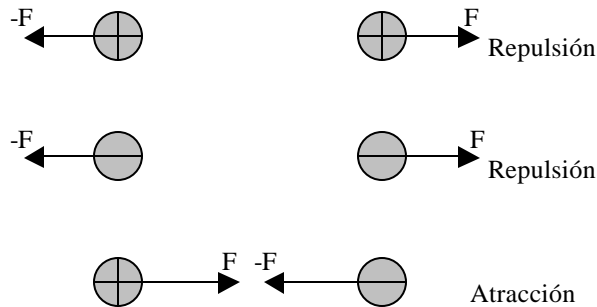


Figura 3

Donde en que k es una constante, llamada constante de Coulomb, igual a $9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$. Cada partícula ejerce una fuerza de igual magnitud sobre la otra. Si las cargas son del mismo signo, la fuerza sobre ellas se aleja de la otra partícula, existe una repulsión (Figura 3a y 3b). Si las cargas son de diferente signo, la fuerza se dirige hacia la otra partícula, por lo que existe una atracción entre ellas (Figura 3c). Para llegar a la ecuación anterior, Charles Augustin Coulomb realizó un experimento en 1785. Curiosamente, la forma de la ecuación tiene una forma igual a la ecuación de Newton para la fuerza gravitatoria entre dos partículas de masas m_1 y m_2 separadas una distancia r , donde G es la constante de gravitación universal, con un valor de $6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

$$F_g = \frac{G m_1 m_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

La unidad de carga en el SI se deriva de la unidad de corriente eléctrica, el Ampere (A), se denomina Coulomb (C) y es la cantidad de carga que se transfiere a través del área de la sección cruzada de un alambre en 1 segundo cuando hay una corriente de 1 amperio en el alambre.

Por razones históricas la constante k se escribe como $1/(4\pi\epsilon_0)$, y la ecuación queda como

$$\mathbf{F}_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad [\text{N}] \quad (2)$$

La cantidad ϵ_0 , llama constante del permisividad del vacío, y es igual a $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$.

La figura 4a muestra dos partículas positivamente cargadas sobre el eje x. Las cargas son $q_1 = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ y $q_2 = 3.20 \times 10^{-19} \text{ C}$, y la separación de la partícula es $r = 0.0200 \text{ m}$, ¿cuál es la magnitud y dirección de la fuerza electrostática en partícula 1 debido a la partícula 2?

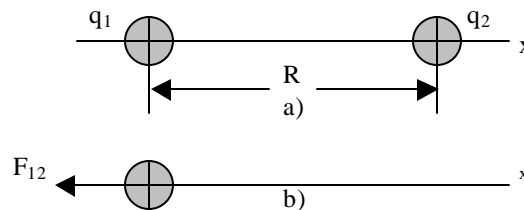


Figura 4

Solución.- Aquí la idea central es porque se rechazan las dos partículas cargadas positivamente, porque la partícula 1 es rechazada por partícula 2, con una magnitud de fuerza dada por ecuación 1. Así, la dirección de fuerza \mathbf{F}_{12} en la partícula 1 se aleja de la partícula 2, en la dirección negativa del eje x , como se ve en el diagrama de cuerpo libre de la de figura 4b. Usando la ecuación 1 podemos escribir la magnitud de \mathbf{F}_{12} como:

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{R^2} = 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(3.2 \times 10^{-19} \text{ C})}{(0.02 \text{ m})^2} = 1.15 \times 10^{-24} \text{ N}$$

Esta fuerza \mathbf{F}_{12} tiene una dirección de 180° con respecto al eje x positivo. Por lo que la expresión vectorial de la fuerza es:

$$\vec{\mathbf{F}}_{12} = (-1.15 \times 10^{-24}, 0) \text{ N} = -1.15 \times 10^{-24} \hat{\mathbf{i}} \text{ N}$$

Definición de campo eléctrico.

La temperatura en cada punto en un cuarto tiene un valor definido. Se puede medir la temperatura en cualquier punto dado poniendo un termómetro allí. A esta distribución resultante de temperaturas se le llama un campo de temperatura. De la misma manera, se puede imaginar un campo de presión en la atmósfera; es decir, una distribución de valores de la presión atmosférica en cada punto del espacio que la integra. Los dos ejemplos anteriores son de campos escalares, ya que la temperatura y presión atmosférica son cantidades escalar.

El campo eléctrico es un campo del vector, compuesto por una distribución de vectores, uno para cada punto de la región alrededor de un objeto cargado eléctricamente, como una varilla. En principio, se puede definir al campo eléctrico en algún punto cerca del objeto (punto P en la figura 5) como la región del espacio donde si se pone una carga q positiva (carga prueba) en cualquier punto, se generará una fuerza electrostática sobre esta carga. Matemáticamente el campo eléctrico se define por la ecuación (3).

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_0} \quad \left[\frac{N}{C} \right] \quad (3)$$

Donde la magnitud del campo eléctrico en el punto P es $E = F/q_0$, y la dirección es la misma que tiene la fuerza que actúa sobre la carga de prueba. Como se muestra en Fig. 5 b, nosotros representamos el campo eléctrico en el punto P con un vector cuya cola está en P.

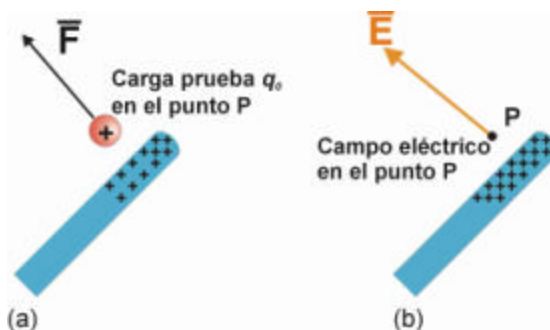


Figura 5

La unidad para el campo eléctrico de SI es el Newton sobre Coulomb (N/C).

Aunque se utiliza la carga prueba para definir al campo eléctrico de un objeto cargado, este campo existe independientemente de la carga de la prueba. El campo al punto P (Figura 5b) existe antes y después de haber puesto q_0 . Suponemos que la presencia de la carga prueba no afecta la distribución del campo eléctrico generado por la barra cargada.

Michael Faraday, que introdujo la idea de campos eléctricos en el siglo XIX, pensó que el espacio alrededor de un cuerpo cargado eléctricamente estaba llenó de líneas de fuerza, y las denominó líneas de campo eléctrico, proporcionando así una manera de visualizar los campos eléctricos.

La relación entre las líneas de campo y el campo eléctrico tiene las siguientes características:

1. En cualquier punto del espacio, la dirección del campo eléctrico \vec{E} es igual a la pendiente de la recta tangente a la línea que pasa por ese punto.

2. El número de líneas de campo que atraviesa un área perpendicular a las líneas, es proporcional a la magnitud del campo eléctrico \vec{E} . Esta segunda relación nos dice que las líneas del campo están más juntas cuando \vec{E} es grande, y están separadas cuando \vec{E} es pequeño.

La figura 6a muestra una esfera con carga negativa. Si ponemos una carga prueba en cualquier parte alrededor de la esfera, una fuerza electrostática que apunta hacia el centro de la esfera actuará sobre la carga de la prueba. Los vectores del campo eléctrico apuntan hacia la esfera radialmente. En este modelo los vectores del campo eléctrico \vec{E} están representados por las líneas del campo (Figura 6b), y apuntan hacia las mismas direcciones que la fuerza eléctrica y los vectores del campo eléctrico \vec{E} . Si se extienden las líneas del campo más lejos de la esfera, la magnitud del campo eléctrico disminuye.

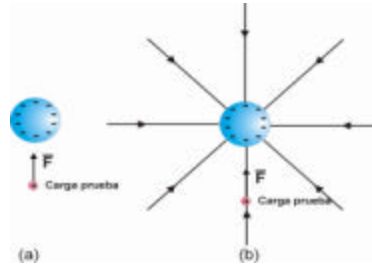


Figura 6

Si la esfera de figura 6 estuviera cargada positivamente, los vectores de campo eléctricos apuntarían radialmente hacia afuera de la esfera. Por la anterior, se puede decir que las líneas del campo eléctrico se extienden alejándose de las cargas positivas, y se dirigen radialmente hacia cargas negativas, donde terminan.

La figura 7a muestra las líneas de campo eléctrico de dos cargas positivas iguales, y la figura 7b muestra el modelo de campo para dos cargas iguales en magnitud pero de signo contrario; una configuración llamada dipolo eléctrico. Aunque las líneas de campo tienen un uso cualitativo, son muy útiles para visualizar qué está pasando con el campo eléctrico de varias cargas.



Figura 7

Para encontrar el valor del campo eléctrico generado por una carga puntal q en un punto separado una distancia r , se pone una carga prueba q_0 en ese punto. De la ley de Coulomb (Ecuación 2), la magnitud de la fuerza electrostática que actúa en q_0 es:

$$\mathbf{F}_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad [\text{N}]$$

La dirección de esta fuerza sobre la carga prueba apunta en dirección radial y alejándose de la carga q , si es positiva, y hacia la carga si ésta es negativa. La dirección de la fuerza queda determinada por el vector unitario $\hat{\mathbf{r}}$ definido en función del vector de posición (\mathbf{r}) de la carga q_0 y su magnitud ($|\mathbf{r}|$), por medio de la ecuación $\hat{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}$. Sustituyendo en la ecuación 3, el vector del

campo eléctrico es

$$\overline{\mathbf{E}} = \frac{\mathbf{F}_e}{q_0} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \hat{\mathbf{r}}}{q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{C}}\right]$$

La dirección del campo es igual a la dirección de la fuerza eléctrica (Figura 8).

Figura 8

El vector resultante del campo eléctrico debido a n cargas puntuales en un punto P del espacio se puede calcular con la siguiente fórmula

$$\mathbf{E}_P = \sum_{i=1}^n \mathbf{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \mathbf{r}_i$$

Aquí \mathbf{E}_i es el campo eléctrico generado por la i ésima carga en el punto P. La ecuación anterior muestra el principio de superposición vectorial aplicado a los campos eléctricos.

Potencial Eléctrico. Energía potencial eléctrica.

La ley de la Gravitación Universal y la ley de Coulomb son matemáticamente idénticas. En particular, la fuerza electrostática es una fuerza conservativa¹, es decir, cuando se genera una fuerza electrostática entre dos o más partículas cargadas, se puede definir una energía potencial eléctrica (U) para el sistema formado por las partículas. Sin embargo, si se quiere cambiar el estado inicial i del sistema, esto es, si se quiere cambiar de posición a las partículas cargadas, a un estado final diferente f , es necesario realizar un trabajo en contra de las fuerzas electrostáticas entre ellas. De acuerdo con el principio de conservación de energía, el trabajo realizado (W) se convierte en un cambio de la energía potencial eléctrica de las partículas.

Potencial eléctrico.

Cuando se coloca una carga prueba q_0 en un campo eléctrico \mathbf{E} , la fuerza sobre la carga es $q_0 \mathbf{E}$, y dicha fuerza es conservativa. El trabajo realizado por la fuerza es:

$$\Delta W = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} = q_0 \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{l} \quad [\text{J}]$$

en donde el trabajo efectuado por la fuerza conservativa es igual al valor negativo del cambio de la energía potencial ΔU_e , de forma similar a lo que sucede en un campo gravitacional, es decir, el trabajo realizado en contra de la gravedad es $\Delta U = -mg(h_f - h_i)$. Asimismo, el trabajo sobre la carga eléctrica es:

$$\Delta U_e = -q_0 \mathbf{E} \cdot \Delta \mathbf{l} \quad [\text{J}]$$

Si la carga sufre un desplazamiento finito del punto A al punto B (Figura 9), el cambio de la energía potencial está dado por:

¹ Una fuerza es conservativa si la energía total que se transfiere a una partícula inmersa en un campo de fuerza, mientras se mueve en una trayectoria cerrada, es cero, es decir, el trabajo neto hecho por una fuerza conservadora en una partícula que se mueve alrededor de un camino cerrado es cero.

$$\Delta U_e = U_{eB} - U_{eA} = -q_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A) = -W$$

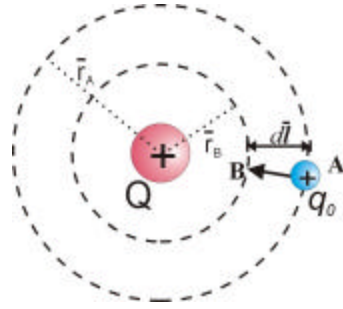


Figura 9

Si la carga prueba se trae desde el infinito hasta la posición final B, el trabajo requerido es

$$W = -(U_{eB} - U_{e\infty}) = -U_{eB} \quad [J]$$

El signo negativo se debe a que el trabajo se realiza en contra del campo eléctrico generado por la carga eléctrica Q (Figura 9).

La diferencia de potencial entre los puntos A y B se define como la diferencia de energía potencial eléctrica por unidad de carga, de la siguiente forma:

$$\Delta V = \frac{\Delta U_e}{q_0}$$

La diferencia de potencial también se puede definir como el trabajo por unidad de carga que debe realizar un agente externo para mover la carga prueba de A a B, sin que cambie la energía cinética de la partícula cargada (Figura 9). La unidad para la diferencia de potencial, y potencial, es el Volt (V), definido como un Joule (J) sobre Coulomb (C), $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$.

Como se puede ver en la figura 9, no importa en qué punto de las superficies de radios r_A o r_B se ponga la carga prueba, el trabajo sólo depende el cambio de una superficie a otra. A este tipo de superficies de les llama superficies equipotenciales, y a partir de ellas se puede definir el potencial eléctrico generado por la carga central Q, como:

$$V = K \frac{Q}{r} \quad [V]$$

Para el caso de un campo eléctrico constante (Figura 10), la diferencia de potencia entre dos punto A y B, se obtiene con la ecuación:

$$\Delta V = V_B - V_A = -Ed \quad [V]$$

donde d es la distancia de separación entre los puntos A y B dentro del campo eléctrico E.

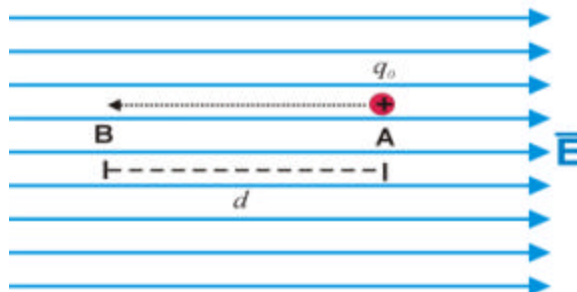


Figura 10

Para n cargas puntuales, el potencial eléctrico generados por ellas en un punto P, se determina con la ecuación (Figura 11):

$$V = K \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i} \quad [V]$$

donde q_i y r_i son la i ésima carga y la i ésima distancia de la carga respectiva al punto P.

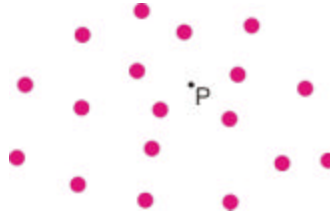


Figura 11

Corriente eléctrica.

Siempre que cargas eléctricas del mismo signo están en movimiento, se dice que existe una corriente eléctrica, la cual se define como la cantidad de carga que atraviesa el área transversal de la sección de un conductor cilíndrico (Figura 12).

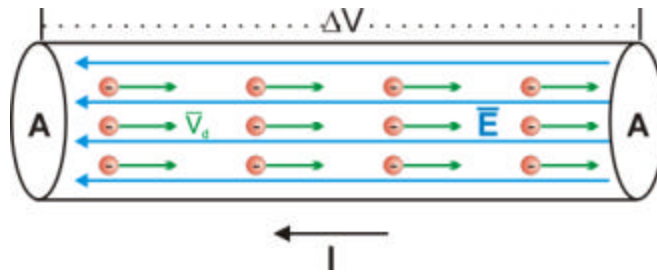


Figura 12

Matemáticamente, la corriente eléctrica queda definida con la fórmula:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad [A]$$

La unidad para la corriente es el Ampere (A), que es igual a un Coulomb (C) sobre segundo (s).

Por convención se escoge la dirección de la corriente como la dirección en la que fluirían las cargas positivas, aunque en realidad sabemos que los electrones son las cargas que producen la corriente (Figura 13).

La corriente en un conductor se relaciona con el movimiento de los portadores de carga, su velocidad (velocidad de arrastre, v_d , m/s), su número (n , No. de portadores/m³), el área de la sección transversal del conductor (A , m²) y la carga eléctrica de los portadores (q , en C).

$$I = nqv_d A$$

Resistencia y ley de Ohm.

Si se aplica una diferencia de potencial a un pedazo de cobre o de vidrio, la corriente resultante es diferente en cada material, esto se debe a una propiedad de los conductores, llamada *resistencia*.

La resistencia (R) entre dos puntos dentro de un conductor se determina por la diferencia de potencial entre ellos y la corriente generada. La unidad de resistencia en el Sistema Internacional (SI) es el Ohm (Ω), igual a un Volt (V) sobre Ampere (A).

$$R = \frac{V}{I} \quad [\Omega]$$

A la definición de la resistencia a partir del voltaje y la corriente, y a la ecuación anterior, se les conoce como *ley de Ohm*.


A los dispositivos que generan resistencia dentro de un circuito eléctrico se les llama resistores. El símbolo para un resistor es  (Figura 13).

Figura 13

Si el conductor tiene un área de sección transversal A, una longitud l, y se toma en cuenta el material con que se fabricó el conductor, la resistencia ρ , estará dada en unidades $\Omega \cdot m$; la resistencia de un conductor también se puede calcular con la ecuación:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad [\Omega]$$

A partir de la ecuación anterior, se deduce que la resistencia de un conductor depende de su longitud y de su área de sección transversal, pero también depende de la temperatura del conductor.

7.2.- Resistores y Condensadores.

Un capacitor o condensador consta de dos conductores con cargas iguales pero de signos opuestos separados una distancia muy pequeña, a los cuales se les aplica una diferencia de potencial V. La capacitancia C de cualquier condensador es

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{medida en: F (Faradios)}$$

Se puede guardar energía como energía potencial tirando una cuerda de arco, estirando un resorte, comprimiendo un gas, o alzando un libro. Se puede guardar energía como energía potencial en un campo eléctrico y un condensador es un dispositivo que se usa para hacer esto exactamente. Hay un condensador en el flash de una cámara fotográfica.

Figura 14 muestra algunos de los muchos tamaños y formas de los condensadores. La figura 15 muestra que los elementos básicos de cualquier capacitor son dos conductores aislados de cualquier forma. No importa que su forma sea llana o no, los llamamos placas conductoras.

Figura 14

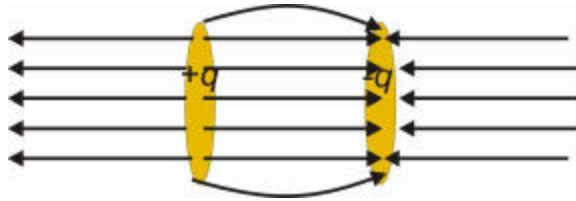


Figura 15

La figura 16 muestra un arreglo menos general pero más convencional de un condensador de placas paralelas, que consiste de dos platos paralelos de área A separado por una distancia d . El símbolo con que se acostumbra representar un condensador está basado en la estructura de un condensador de placas paralelas (||), pero se usa para los condensadores de todas las geometrías. Supondremos por el momento que ningún medio material (como vidrio o plástico) está presente en la región entre las placas.

Cuando un condensador se carga, sus placas tienen cargas iguales $+q$ y $-q$, pero de signos opuestos. Sin embargo, nos referimos a la carga de un condensador sólo como q , el valor absoluto de las cargas en las placas.

Como las placas son conductoras, se pueden ver como superficies equipotenciales; todos los puntos en una placa están al mismo potencial eléctrico. Sin embargo, hay una diferencia potencial entre las placas. Por las razones históricas, representamos el valor absoluto de esta diferencia de potencial con V en lugar de ΔV , como lo habíamos utilizado anteriormente.

La carga q y la diferencia potencial V en un condensador son proporcionales una de otra; es decir,

$$q = CV$$

la constante de proporcionalidad C se llama capacitancia del condensador. Su valor sólo depende de la geometría de las placas y no de su carga o diferencia de potencial. La capacitancia es una medida de cuanta carga debe ponerse en las placas para producir una diferencia potencial entre ellas. Una capacitancia grande requiere mayor carga. La unidad de SI de la capacitancia es el Coulomb (C) por el Volt (V). A esta unidad se le da el nombre de Faradio (F). El faradio es una unidad muy grande. Submúltiplos del faradio, como el microfaradio ($1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$) y el picofaradio ($1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$), son unidades más convenientes en la práctica.

Figura 16

Una manera de cargar un condensador es ponerlo en un circuito eléctrico con una batería. Un circuito eléctrico es un camino a través del cual la carga puede fluir. Una batería es un dispositivo que mantiene cierta diferencia potencial entre sus terminales por medio de reacciones electroquímicas en las que las fuerzas eléctricas pueden mover carga.

En figura 17a, se muestran una batería B, un interruptor S, un condensador descargado C, y alambres interconectados que forman un circuito. El mismo circuito se muestra en el diagrama esquemático de la figura 17b en donde los símbolos para una batería, un interruptor, y un condensador representan a estos dispositivos. La batería mantiene una diferencia potencial V entre sus terminales. La terminal de potencial más alto se etiqueta $+$ y se llama terminal positiva; la terminal de potencial más bajo se etiqueta $-$ y se llama terminal negativa.

Figura 17

Inicialmente, cuando las placas están descargadas, la diferencia potencial entre ellas es cero. Cuando las placas se cargan, aumenta de diferencia de potencial hasta que se igualan con la diferencia potencial V entre las terminales de la batería.

La capacitancia para un capacitor de placas paralelas (figuras 15 y 17) queda determinada por la ecuación:

$$C = \frac{A \epsilon_0}{d}$$

7.3.- Circuitos eléctricos.

La forma más simple para hacer un circuito eléctrico es conectar un resistor a una batería (figura 18). En este caso, la batería proporciona la energía necesaria para que se muevan los electrones dentro del circuito, por lo que la llamaremos Fuerza Electromotriz (FEM, ϵ), cuya unidad es el Volt (V).

Cuando dos o más resistencias se conectan en serie (figura 19), la corriente a través de cada resistor es la misma, debido a que la carga que atraviesa a R_1 fluye también por R_2 (figura 19).

Figura 18

Figura 19

En este caso los voltajes en cada resistor se suman para obtener el voltaje de la FEM. Si recordamos que la corriente se mantiene en todo el circuito, obtenemos:

$$I_e = I_1 = I_2$$

y

$$V_e = V_1 + V_2$$

De la ley de Ohm sabemos que $V_1=I_1R_1=IR_1$ y $V_2=I_2R_2=IR_2$, sustituyendo en la ecuación anterior, tenemos:

$$V_e = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) = IR_{eq}$$

por lo que obtenemos una resistencia equivalente de los dos resistores conectados en serie, cuyo valor se obtiene con la ecuación:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

si se conectan más de 2 resistores en serie, la resistencia equivalente será igual a:

$$R_{eq} = \sum_{i=0}^n R_i = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Consideremos ahora dos resistencias conectadas en paralelo, en este caso hay una diferencia de potencial igual en los extremos de cada resistencia.

Figura 20

En este caso el voltaje se conserva, por lo que:

$$V_e = V_1 = V_2$$

y la corriente que proporciona la FEM es igual a la suma de las corrientes que circulan por cada resistor.

$$I_e = I_1 + I_2$$

Despejando la corriente de cada resistor y utilizando la igualdad en los voltajes, obtenemos:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} = \frac{V}{R_1} \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{V_2}{R_2} = \frac{V}{R_2}$$

y sustituyendo en la igualdad anterior, se obtiene:

$$I_e = \left(\frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} \right) = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{V}{R_{eq}}$$

por lo que el inverso de la resistencia equivalente de los dos resistores es igual a la suma de los inversos de las resistencias.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Si se conectan más de dos resistores en paralelo, su resistencia equivalente se puede obtener a partir de la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

8.- MAGNETISMO E INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

8.1.- Imanes permanentes.

Hemos discutido cómo una varilla de plástico cargada produce un campo eléctrico vectorial en todos los puntos del espacio alrededor de él. De igual manera, un imán produce un campo magnético vectorial en todos los puntos del espacio alrededor de él. Una aplicación sencilla de estos campos magnéticos es cuando usted pega una nota en la puerta del refrigerador con un imán pequeño, o accidentalmente borra un disco de la computadora al acercarlo a un imán. El imán actúa en la puerta o en el disco por medio de su campo magnético.

En un imán común, el alambre se enrolla alrededor de un centro férreo y una corriente se envía a través del rollo; la fuerza del campo magnético es determinada por la magnitud de la corriente. Usted está probablemente más familiarizado con los imanes permanentes como el tipo de la puerta del refrigerador, que no necesita corriente para tener un campo magnético.

¿Cómo se generan los campos magnéticos? Hay dos maneras: (1) Moviendo partículas cargadas eléctricamente, como una corriente en un alambre, que crea campos magnéticos y (2) las partículas elementales, como electrones, que tienen un campo magnético intrínseco alrededor de ellos. Este campo es una característica básica de las partículas, así como lo son su masa y su carga eléctrica. Los campos magnéticos de los electrones en ciertos materiales se suman para originar un campo magnético neto alrededor del material, tal como sucede en los imanes permanentes. En otros materiales, los campos magnéticos de los electrones se cancelan, dando como resultado un campo magnético nulo alrededor del material.

Para determinar el campo eléctrico en un punto se pone una carga prueba en reposo q en ese punto. La fuerza eléctrica \mathbf{F} que actúa sobre la partícula en ese punto determina la intensidad del campo eléctrico. Es decir:

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{q}$$

Si un monopolo magnético estuviera disponible, lo podríamos definir de forma similar. Porque no se han encontrado tales partículas, nosotros debemos definir otra manera de hacerlo, que sea en los términos de la fuerza magnética (\mathbf{F}_m) que \mathbf{B} ejerció sobre esa carga prueba.

Si se dispara una partícula cargada dentro de un campo magnético con una velocidad y dirección determinada, se podrá calcular la fuerza magnética que actúa sobre la partícula en ese punto. Para todas las otras direcciones la magnitud de \mathbf{F}_m es proporcional a $v \sin \theta$, donde θ es el ángulo entre el eje de fuerza-cero y la dirección de \mathbf{v} . Además, la dirección de \mathbf{F}_m siempre es perpendicular a la dirección de \mathbf{v} . Estos resultados sugieren que está involucrado un producto cruz.

Entonces podemos definir un campo magnético \mathbf{B} como una cantidad vectorial que se dirige a lo largo del eje de fuerza-cero. Podemos enseguida medir la magnitud de $\overline{\mathbf{F}}_m$ cuando \mathbf{v} se dirige perpendicularmente al eje y entonces definir la magnitud de $\overline{\mathbf{F}}_m$ en términos de esa misma magnitud de fuerza:

$$\mathbf{B} = \frac{|\overline{\mathbf{F}}_m|}{|q||\mathbf{v}|} \quad [\text{T}]$$

donde q es la carga de la partícula.

Podemos resumir todos estos resultados con la ecuación vectorial siguiente:

$$\overline{\mathbf{F}}_m = q \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad [\text{N}] \quad [4]$$

es decir, la fuerza $\overline{\mathbf{F}}_m$ sobre la partícula es igual a q veces el producto cruz de su velocidad \mathbf{v} y el campo \mathbf{B} (todos medidos en el mismo marco de la referencia). Podemos escribir la magnitud de $\overline{\mathbf{F}}_m$ como:

$$|\overline{\mathbf{F}}_m| = |q||\mathbf{v}||\mathbf{B}| \text{sen} \theta \quad [\text{N}]$$

donde θ es el ángulo entre las direcciones de la velocidad y el campo magnético.

La ecuación 4 nos dice que la magnitud de la fuerza $\overline{\mathbf{F}}_m$ que actúa en una partícula en un campo magnético es proporcional a la carga q y la velocidad \mathbf{v} de la partícula. Así, la fuerza es igual a cero si la carga es cero o si la partícula está en reposo. La ecuación 4 también nos dice que la magnitud de la fuerza es cero si \mathbf{v} y \mathbf{B} son paralelos ($\theta = 0^\circ$) o antiparalelos ($\theta = 180^\circ$), y la fuerza está en su máximo cuando \mathbf{v} y \mathbf{B} son perpendiculares entre sí.

El producto cruz en la ecuación 4 es un vector perpendicular a los vectores \mathbf{v} y \mathbf{B} . La regla de la mano derecha (Figura 21a) nos dice que el dedo pulgar de la mano derecha apunta en la dirección de $\overline{\mathbf{F}}_m$ cuando los dedos restantes se doblan del vector \mathbf{v} al vector \mathbf{B} . Si q es positiva, entonces la fuerza $\overline{\mathbf{F}}_m$ tiene la misma dirección de $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$; es decir, para q positivo, $\overline{\mathbf{F}}_m$ se dirige a lo largo del dedo pulgar (Figura 21b). Si q es negativo, entonces la fuerza $\overline{\mathbf{F}}_m$ y producto de la cruz $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ tienen signos opuestos y así tienen direcciones opuestas. Cuando q es negativo, $\overline{\mathbf{F}}_m$ es opuesta al dedo pulgar (Figura 21c).

Sin tener en cuenta el signo de la carga, la fuerza $\overline{\mathbf{F}}_m$ que actúa en una partícula cargada que se mueve con una velocidad \mathbf{v} a través de un campo magnético \mathbf{B} siempre es perpendicular a \mathbf{v} y \mathbf{B} . Así, $\overline{\mathbf{F}}_m$ nunca tiene una componente paralela a \mathbf{v} . Esto significa que $\overline{\mathbf{F}}_m$ no puede cambiar la velocidad de la partícula \mathbf{v} y por consiguiente no puede cambiar la energía cinética de la partícula. La fuerza puede cambiar sólo la dirección de \mathbf{v} y sólo en este caso la fuerza magnética $\overline{\mathbf{F}}_m$ acelerará a la partícula.

Figura 21

La unidad en el SI del campo magnético es el Newton (N) entre Coulomb (C) por metro (m) entre segundo (s). A este arreglo de unidades se le denomina Tesla (T):

$$1 \text{ T} = \frac{1 \text{ N}}{\text{C} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{1 \text{ N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

8.2.- Relación entre campos magnéticos y corrientes eléctricas

Recordemos que un Coulomb entre segundo es un Ampere.

En el sistema cgs la unidad para el campo magnético \mathbf{B} , todavía de uso común, es el gauss (G), y $1 \text{ G} = 1 \times 10^{-4} \text{ T}$.

Si una partícula cargada entra con velocidad constante en un campo magnético \mathbf{B} constante (Figura 22), podemos estar seguros que la fuerza magnética sobre la carga es constante en magnitud y apunta hacia el centro del círculo de la trayectoria de la partícula, siempre perpendicular al vector velocidad. Piense en una piedra atada a un cordón girando en un círculo horizontal, o en un satélite que entra en órbita circular alrededor de la Tierra. En el primer caso, la tensión en el cordón proporciona la fuerza necesaria y la aceleración centrípeta. En el segundo caso, la atracción gravitacional de la Tierra proporciona la fuerza y aceleración.

La figura 22 muestra otro ejemplo: Una haz de electrones se proyecta en una cámara debido a un cañón de electrones. Los electrones entran en el plano de la página con velocidad \mathbf{v} , a una región de campo magnético uniforme \mathbf{B} dirigido hacia afuera de la página. Como resultado, una fuerza magnética $\mathbf{F}_m = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ desvía los electrones continuamente, y como \mathbf{v} y \mathbf{B} son siempre perpendiculares entre sí, esta desviación causa que los electrones sigan una trayectoria circular. Esta trayectoria es visible en la fotografía porque los átomos de un gas en la cámara emiten luz cuando algunos de los electrones chocan contra ellos.

Figura 22

En este caso existe un equilibrio de fuerzas por el cual se mantiene la trayectoria circular de los electrones, entre la fuerza centrífuga y la fuerza magnética. Igualando magnitudes y haciendo un poco de álgebra, obtenemos los siguientes parámetros del movimiento circular de la partícula.

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{F}_c| &= |\mathbf{F}_m| \\
 \frac{mv^2}{r} &= qvB \\
 \frac{mv}{r} &= qB \\
 r &= \frac{mv}{qB} \text{ [m]}, \quad \omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m} \text{ [rad/s]}, \quad T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \text{ [s]}
 \end{aligned}$$

Si en lugar de una carga eléctrica puntual q dentro de un campo magnético \mathbf{B} , se introduce un alambre de longitud l , que transporta una corriente I , se genera sobre él una fuerza magnética \mathbf{F}_m , dependiente del producto cruz $\mathbf{l} \times \mathbf{B}$, determinada por la ecuación:

$$\mathbf{F}_m = I \mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad [\text{N}]$$

cuya magnitud se obtiene con la ecuación:

$$|\mathbf{F}_m| = |I| |\mathbf{l}| |\mathbf{B}| \text{Sen } \theta \quad [\text{N}]$$

Aunque l no es un vector se toma como tal y con el mismo sentido de la corriente eléctrica I . θ es el ángulo entre los vectores l y \mathbf{B} .

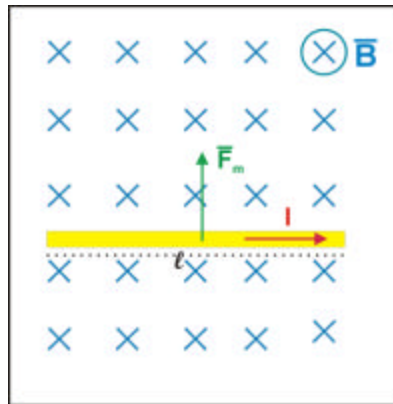


Figura 23

8.3 Ley de Faraday-Henry y 8.4 Ampere-Maxwell

Ley de Ampere.

Se puede encontrar el campo eléctrico neto debido a cualquier distribución de carga con la ley del inverso cuadrado para la diferencial de campo eléctrico $\Delta \mathbf{E}$ (Eq. 30-2), pero si la distribución de carga es complicada, podemos usar una computadora y el cálculo diferencial e integral.

De igual manera podemos encontrar el campo magnético originado por una distribución de corrientes con la ley del inverso cuadrado para un campo diferencial $\Delta \mathbf{B}$, pero de nuevo podemos usar una computadora y calculo si la distribución es complicada. Sin embargo, si la

distribución tiene un poco de simetría, podemos aplicar la ley de Ampere para encontrar el campo magnético.

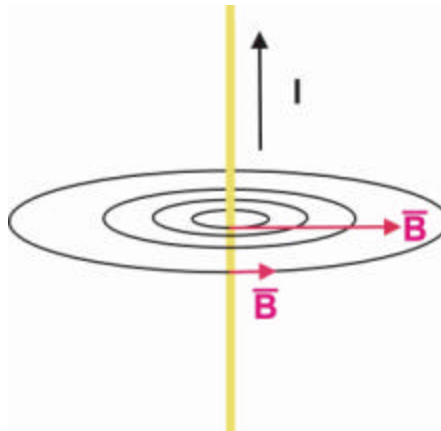
En términos sencillos, la ley de Ampere establece que un conductor que lleva una corriente (cargas en movimiento) produce un campo magnético entorno a él, cuyas líneas son concéntricas al alambre, como se muestra en la figura 24.

En este caso, el campo magnético depende de la distancia al cable que lleva la corriente I , con la ecuación:

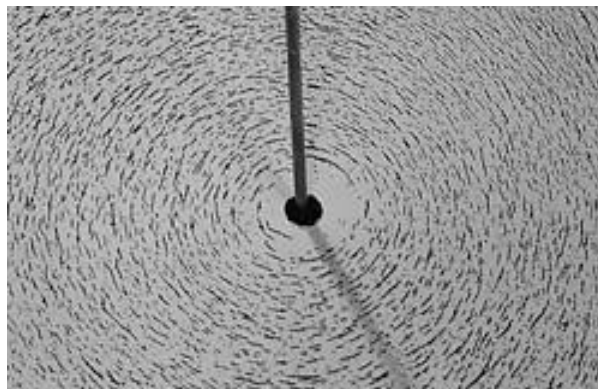
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad [\text{T}]$$

donde μ_0 es la constante de permeabilidad del vacío, y es igual $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A. Esta constante tiene que ver con la forma en que se transmite el campo magnético en el vacío. Para otros medios tiene un valor diferente.

Las líneas de campo magnético se determinan por medio de la regla de la mano derecha. Ponga su mano derecha con el dedo pulgar extendido en la dirección de la corriente. Los demás dedos se enrollarán naturalmente alrededor del alambre en la dirección de las líneas del campo magnético (figura 25).



(a)



(b)

Figura 24

Figura 25

Si se dobla el alambre para formar una espira circular de radio r , el campo magnético es perpendicular al plano de la espira (Figura 26), con un valor en el centro de la espira determinado con la ecuación:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r} \quad [\text{T}]$$

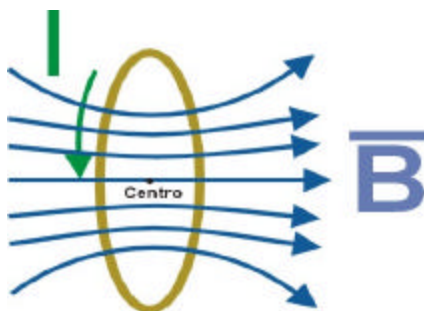


Figura 26

Si el alambre se enrolla para formar una bobina de N vueltas, o solenoide (Figura 27), el valor del campo magnético en el centro del solenoide es de:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L} \quad [\text{T}]$$

(a)

(b)

(c)

Figura 27

Ley de Faraday.

Para iniciar la discusión de la ley de Faraday examinaremos primero dos experimentos simples:

PRIMER EXPERIMENTO: La figura 28 muestra una espira de alambre conectada a un medidor de corriente (amperímetro). No hay ninguna batería u otra fuente de FEM, por lo que no hay ninguna corriente inicial en el circuito. Sin embargo, si acercamos un imán de la barra a la espira, una corriente aparece de repente en el circuito. La corriente desaparece cuando el imán se detiene. Si alejamos el imán entonces aparece de repente otra corriente de nuevo, pero ahora en la dirección opuesta. Si experimentáramos durante algún tiempo, descubriríamos lo siguiente:

a) Una corriente que sólo aparece si hay movimiento relativo entre la espira y el imán (uno debe moverlo con respecto a la espira); la corriente desaparece cuando el movimiento relativo entre ellos cesa.

b) Un movimiento más rápido produce una corriente mayor.

c) Si acercamos el polo norte del imán a la espira, se genera corriente en el sentido de las agujas del reloj, y si se aleja este polo causa corriente en sentido contrario a las agujas del reloj. Si se acerca o aleja el polo sur del imán a la espira también causa corrientes, pero en las direcciones invertidas con respecto a las obtenidas con el polo norte (figura 28).

Figura 28

La corriente producida en la espira se llama corriente inducida. El trabajo hecho por unidad de carga para producir esa corriente (para mover los electrones de conducción que constituyen la corriente) se llama un FEM inducida, y el proceso de producir la corriente y la FEM se llama inducción.

SEGUNDO EXPERIMENTO: Para este experimento nosotros usamos el aparato de figura 29, con dos espiras conductoras cercanas. Si cerramos el interruptor S, para activar una corriente en la espira derecha, el medidor de repente y brevemente registra una corriente eléctrica en la espira izquierda. Si abrimos el interruptor, otro súbito y breve pulso de corriente inducida aparece en la espira izquierda, pero en dirección opuesta con respecto al primer pulso. Conseguimos una

corriente inducida (y una FEM inducida) sólo cuando la corriente en la espira derecha está cambiando (encendiendo o apagando) y no cuando es constante (aun cuando sea grande).

Michael Faraday determinó que la FEM y la corriente inducida en estos dos experimentos son causadas por cargas el movimiento. Comprendió que puede inducirse una FEM y una corriente en una espira, como en los dos experimentos mencionados anteriormente, cambiando la cantidad de campo magnético que atraviesa la espira. Él comprendió más allá que “la cantidad de campo magnético” puede visualizarse en términos de las líneas del campo magnético que atraviesan la espira. La ley de Faraday de inducción, establece que una FEM es inducida en la espira izquierda de las figuras 28 y 29 cuando el número de líneas del campo magnético (Flujo magnético) que atraviesan la espira está cambiando.

Figura 29

Matemáticamente, la Ley de Inducción de Faraday (Figura 30) se expresa por medio de la ecuación:

$$\mathbf{e} = - N \frac{\Delta \mathbf{f}_m}{\Delta t} \quad [\text{V}]$$

Donde ϵ es la FEM inducida en Volts (V), N es el número de vueltas de la bobina, $\Delta\phi_m$ es el cambio de flujo magnético, en Webers (Wb) a través de la bobina cuando se le acerca el imán o es atravesado por un cambio magnético variable, y es igual al área (A) de la sección transversal de la bobina, en m^2 , por el cambio del campo magnético (ΔB), en T. $\Delta\phi_m=A(\Delta B)$. El signo de la ecuación de la ley de Faraday se explica por medio de ley de Lenz, la cual dice que: La polaridad de la FEM inducida es tal que ésta tiende a producir una corriente que crea un contra flujo magnético que se opone al cambio en el flujo magnético a través del circuito.

Figura 30

8.5.- Generación y transmisión de electricidad y 8.6.- circuitos eléctricos de corriente alterna
Corriente alterna.

La corriente alterna (CA) se genera por una bobina de N vueltas que gira dentro del un campo magnético constante (Figura 31). En este caso la FEM y la corriente inducidas cambian de signo cada 180°, como se muestra en la figura, igual a la función $\text{sen}\theta$, por lo que la FEM y la corriente inducidas dependen de las velocidad angular (ω) de la bobina dentro del campo magnético, de acuerdo con la ecuación:

$$e = NBA \omega \text{sen } \omega t \quad [v]$$

Donde N es el número de vueltas de la bobina, B (T) es el campo magnético constante en el que se encuentra la bobina, A (m²) es el área de la bobina, ω (rad/s) es la velocidad angular o de giro de la bobina dentro del campo magnético y t (s) es el tiempo.

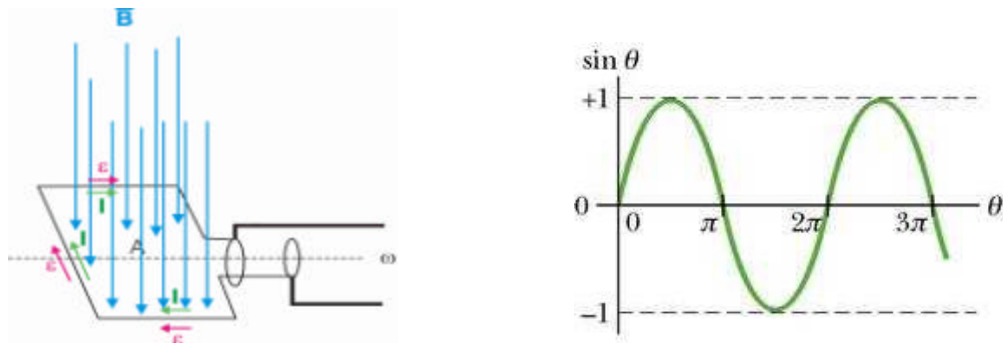


Figura 31

Como bien sabemos casi toda la energía eléctrica que se consume en el mundo está en forma de corriente alterna debido a la facilidad para transformarse de un voltaje a otro. La energía eléctrica se trasmite a grandes distancias a voltajes elevados y corrientes bajas, proceso que genera relativamente pocas perdidas por calentamiento. La energía eléctrica que se genera en las plantas y que se conduce hasta las ciudades, inicia con un voltaje del orden de los 120,000 volts a través de subestaciones eléctricas. La transportación se realiza a través de líneas eléctricas del orden de los 15000 volts hasta llegar a los transformadores de calle de 440 volts, entregándose finalmente voltaje de 120 volts en la casa como la tuya.

UNIDAD IV: SISTEMAS ÓPTICOS

10.- ÓPTICA GEOMÉTRICA.

Principio de Huygens.

El principio de Huygens nos muestra como construir la envolvente para una onda electromagnética en el instante $t + \Delta t$, dada un frente de onda en un momento anterior a t . El principio consiste en considerar cada punto de un frente de onda como una fuente puntual de una onda esférica en el instante $t + \Delta t$, los frentes de onda se unen por medio de una envolvente para formar un nuevo frente de onda en ese instante. Después de tiempo Δt , el radio de la envolvente será $v\Delta t$, donde v es la velocidad de la onda, y el nuevo frente de onda (envolvente) será tangente a cada uno de los frentes puntuales individuales.

El principio es ilustrado en la figura 32, que muestra un frente de onda circular en el momento t . Dicha figura muestra ocho fuentes esféricas de Huygens. Cada una con centro en el frente de onda circular de tiempo t y cada una tiene un radio de $v\Delta t$. La posición del frente de onda en el tiempo $t + \Delta t$ y es tangente común a las fuentes esféricas individuales.

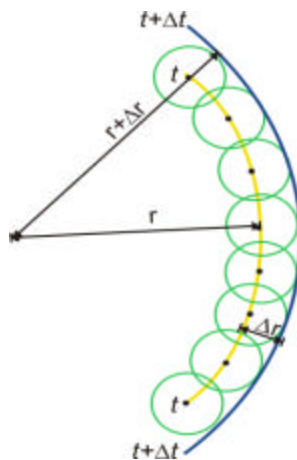


Figura 32

10.1.- Reflexión y refracción de la luz. 10.2.- Espejos planos y esféricos

El azul de los lagos, el ocre de los desiertos, el verde de los bosques y todos los colores del arco iris pueden ser disfrutados por todas aquellas personas que posean el sentido de la vista. La rama de la física que estudia el comportamiento de la luz y de otras ondas electromagnéticas es la óptica, con la cual podemos apreciar mejor el mundo visible. El conocimiento de la luz nos permite entender porque el cielo es azul, diseñar dispositivos ópticos como los telescopios, microscopios, cámaras y lentes. Los principios básicos de la óptica también se encuentran en el corazón del desarrollo moderno como el láser, las fibras ópticas, los hologramas, las computadoras ópticas y las nuevas técnicas de formación de imágenes para fines médicos.

La luz, junto con las otras formas de radiación electromagnética, es un tema fundamental para la física y todavía no entendida del todo. La luz presenta dos comportamientos: como si fuera una onda o una partícula. La energía que transmite es tan grande que la hace parecer como una onda

continua, una onda con un campo eléctrico y un campo magnético. La interacción de la luz con lentes, espejos, prismas, transparencias y otros objetos, permite entenderla como una onda. Por otro lado, cuando la luz es emitida o absorbida por un sistema de átomos parece comportarse como una partícula.

Figura 33

Aunque una onda de luz se expande a partir de su fuente, podemos aproximar su viaje como si fuera en línea recta, lo hacemos así para la onda de la figura 33. El estudio de las propiedades de las ondas de luz bajo esa aproximación se llama *óptica geométrica*.

La figura 34 muestra un ejemplo de ondas de luz que viajan en líneas aproximadamente rectas. Una haz estrecho de luz (rayo incidente), inclinado hacia abajo a la izquierda y viajando a través de aire, encuentra una superficie plana de vidrio. La parte de luz que es reflejada por la superficie, forma un rayo dirigido hacia arriba a la derecha, viajando como si el rayo original hubiera rebotado en la superficie. El resto del rayo de luz pasa por la superficie entre el aire y el vidrio, formando un rayo dirigido hacia abajo a la derecha (figura 34). En este caso la luz puede viajar a través del vidrio, por lo que se dice que el vidrio es transparente, ya que podemos ver a través de él.

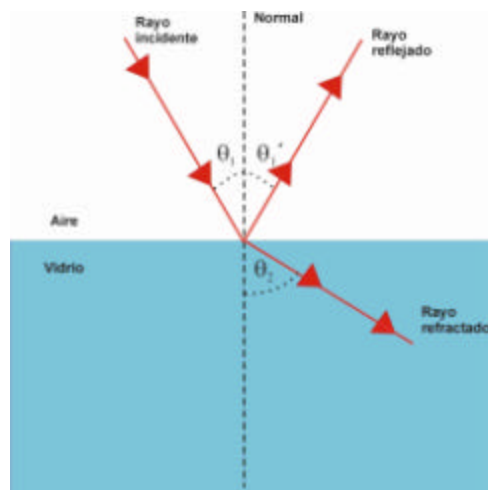


Figura 34

Cuando la luz atraviesa una superficie (o interfase) que la separa en dos o más rayos, se dice que hay una refracción, y que la luz es refractada. A menos que el rayo incidente de luz sea perpendicular a la interfase, la refracción por la superficie cambia la dirección del rayo de luz incidente, y se dice que el rayo es “inclinado” por la refracción (Figura 34).

En la figura 34, se representan los rayos de luz con un rayo incidente, un rayo reflejado, un rayo refractado y los frentes de onda. Cada rayo se orienta con respecto a una línea, llamada normal, que es perpendicular a la superficie que divide a los dos medios, en este caso el aire y el vidrio. El ángulo de incidencia es q_1 , el ángulo de reflexión es q_1' , y el ángulo de refracción es q_2 , todos los ángulos son medidos con respecto a la normal. Al plano que contiene los rayos de incidencia y la normal, se llama plano de incidencia.

La ley de reflexión y la ley de refracción son:

LEY DE REFLEXIÓN: Un rayo reflejado queda en el plano de incidencia y tiene un ángulo de reflexión igual al ángulo de incidencia. Esto se muestra en la figura 34, y significa que:

$$q_1 = q_1'$$

(El ángulo del rayo refractado se identificará del ángulo del rayo incidente con el tilde).

LEY DE REFRACCIÓN: Un rayo refractado queda en el plano de incidencia y tiene un ángulo de refracción θ_2 , este se relaciona con el ángulo de incidencia θ_1 por la ecuación

$$n_1 \text{ sen } q_1 = n_2 \text{ sen } q_2$$

Aquí los símbolos n_1 y n_2 son una constante adimensionales llamadas índice de refracción, que están asociadas con los medios involucrados en la refracción. Esta ecuación se conoce como ley de Snell. El índice de refracción de un medio es igual al c/v , donde v es la velocidad de luz en ese medio y c es la velocidad de la luz en el vacío.

10.3.- Lentes cóncavas y convexas. Instrumentos ópticos

La lente es un objeto transparente con dos superficies refractoras cuyas ejes centrales coinciden. El eje central común es el eje central de la lente. Cuando una lente es rodeada por el aire, la luz refractada del aire hacia la lente, cruza la lente y es otra vez refractada del lente hacia el aire. Cada una de estas refracciones puede cambiar la dirección de la luz.

Una lente que ocasiona que los rayos de luz inicialmente paralelo al eje central converjan a un punto, se llama lente convergente. Si, en cambio, ocasiona que los rayos diverjan, la lente es divergente. Cuando un objeto se pone delante de una lente de cualquiera tipo, la refracción por la superficie de la lente de los rayos de luz del objeto puede producir una imagen del objeto del otro lado de la lente.

En esta guía sólo se considerarán lentes delgadas, una lente delgada es aquella donde su espesor es más pequeño que la distancia del objeto (p) a la lente, la distancia de la imagen (i) y los radios de curvatura r_1 y r_2 de las dos superficies de la lente. Sólo se considerarán rayos de luz con ángulos pequeños de incidencia a la lente, con respecto al eje central.

Figura 35

La distancia focal (f), la distancia del objeto (p) y la distancia de la imagen (i), en lentes delgadas, se relacionan por medio de la ecuación:

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

Si tomamos el índice de refracción del aire como 1, el índice de refracción del vidrio (n) e incluimos los radios de curvatura r_1 y r_2 , la ecuación anterior se transforma en:

$$(n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f}$$

llamada a menudo ecuación del fabricante de lentes. Aquí r_1 es el radio de curvatura de la superficie de la lente el objeto, y r_2 es el radio de curvatura de la superficie de la lente a la otra superficie. De las dos ecuaciones anteriores se deduce que: *Una lente sólo puede producir una imagen de un objeto porque puede desviar los rayos de luz; pero sólo puede desviar los rayos de luz si su índice de refracción difiere del índice del medio circundante.*

La figura 35a muestra una lente delgada con superficies convexas. Cuando se envían rayos que son paralelos al eje central de la lente a través de la lente, se refractan dos veces, como se muestra en la ampliación de la figura 35b. Esta refracción doble causa que los rayos atraviesen un punto F_2 común a una distancia f del centro de la lente. Por lo tanto, esta lente es una lente convergente. Si ahora se envían rayos paralelos al eje central de la lente en dirección opuesta a través de la lente, se encuentra que otro punto F_1 (Foco real) del otro lado de la lente. Para una lente delgada, estos dos puntos focales son equidistantes de la lente.

La figura 35c muestra una lente delgada con lados cóncavos. Cuando se envían rayos que son paralelos al eje central de la lente a través de esta lente, se refractan dos veces, como se muestra en la figura 35d; estos rayos divergen, nunca atraviesan un punto común, así esta lente es una lente divergente. Sin embargo, las extensiones de los rayos atraviesan un punto F_2 común a una distancia f del centro de la lente. De la lente tiene un punto focal virtual a las F_2 . Otro enfoque virtual existe en el lado opuesto de la lente a las F_1 , simétricamente opuesto si la lente es delgada.

Ahora consideramos dos tipos de imagen formadas en lentes convergentes y divergentes. La figura 36a muestra un objeto O fuera del punto focal F_1 de una lente convergente. Los dos rayos dibujados en la figura muestran que la lente forma una imagen real invertida I del objeto O del lado de la lente, opuesto el objeto.

Figura 36

Cuando el objeto O se pone dentro del punto focal F_1 , como en la figura 36b, la lente forma una imagen virtual I en el mismo lado de la lente, del mismo lado del objeto y con la misma orientación. Una lente convergente puede formar una imagen real o una imagen virtual, dependiendo si el objeto es fuera o dentro del punto focal, respectivamente.

La figura 36c muestra un objeto O delante de una lente divergente. Sin tener en cuenta la distancia del objeto (sin tener en cuenta si O es dentro o fuera del punto focal virtual), esta lente produce una imagen virtual que está en el mismo lado del el objeto y tiene la misma orientación.

Tomamos la distancia de la imagen I como positiva cuando la imagen es real y negativa cuando la imagen es virtual. Las imágenes reales formadas por una lente son opuestas al objeto, y las imágenes virtuales se forman del lado del objeto.

La amplificación lateral m producida por lentes convergentes y divergentes está dada por las ecuaciones:

$$|m| = \frac{h'}{h} \quad \text{Amplificación lateral}$$

$$m = -\frac{i}{p} \quad \text{Amplificación lateral}$$

Donde h' es la altura de la imagen, h es la altura del objeto, i es la distancia de la lente a la imagen y p es la distancia del objeto a la lente.

La figura 37a muestra un objeto O fuera del punto focal F_1 de una lente convergente. Podemos localizar gráficamente la imagen dibujando un diagrama del rayo trazando tres rayos especiales. Estos rayos especiales, pasan a través de la lente para formar la imagen, de la siguiente forma:

1. Un rayo es inicialmente paralelo al eje central de la lente atravesará punto focal F_2 (rayo 1 en figura 37a).
2. Un rayo que inicialmente atraviesa punto focal F_1 atravesará la lente paralelo al eje central (rayo 2 en la figura 37a).
3. Un rayo que se dirige inicialmente hacia el centro de la lente atravesará la lente sin cambio en su dirección (rayo 3 en figura 37a) y se encuentra con la lente donde sus dos lados son casi paralelos.

La imagen del punto se localiza donde se cortan los tres rayos, en el lado puesto de la lente.

La figura 37 muestra cómo pueden usarse las extensiones de los tres rayos especiales para localizar la imagen de un objeto puesta dentro del punto focal F_1 de una lente convergente. Observe que la descripción de rayo 2 requiere modificación (ahora es un rayo cuya extensión se dirige hacia atrás).

Es necesario modificar las descripciones de los rayos 1 y 2 para usarlos en localizar una imagen puesta (en cualquier parte) delante de una lente divergente. Por ejemplo, en la figura 37c, nosotros encontramos la intersección del rayo 3 y las extensiones dirigidas hacia atrás de rayos 1 y 2.

11.- ÓPTICA FÍSICA

11.1.- Dispersión y color

Dispersión

La luz blanca puede desplegarse en sus colores componentes por medio de un prisma de vidrio, así como por difracción. Isaac Newton demostró que un prisma podía separar la luz blanca en un espectro y que por otro prisma colocado en forma inversa podía combinar esa luz y convertirla de nuevo en luz blanca. Descubrió que una pequeña porción del espectro no se desplegaría en los otros colores al pasar la luz por un segundo prisma. Sin embargo, la descomposición de la luz blanca en colores no es sólo un truco que se pueda realizar con un prisma, también es la causa de la aberración cromática, de lo atractivo de los diamantes y el vidrio cortado e incluso de la belleza del arco iris.

La producción de un espectro continuo por medio de un prisma se debe a la variación de la velocidad de las ondas con la longitud de onda que se presenta comúnmente en medios transparentes. La longitud de onda depende del índice de refracción (o color) de la luz se denomina *Dispersión*. El agua, el vidrio, los plásticos transparentes y el cuarzo son materiales dispersivos. Por lo general, las longitudes de onda más cortas viajan con velocidades de onda ligeramente más pequeñas que las longitudes de onda más grandes. Esto equivale a que el índice de refracción del prisma no sea constante a lo largo del espectro visible, sino que disminuye en forma continua a medida que aumentan las longitudes de onda del violeta al rojo. Puesto que el índice de refracción es mayor para el violeta que para el rojo, la luz del primer color se desvía un ángulo mayor que la del segundo color. Este efecto de un prisma es exactamente opuesto al dispersivo de una rejilla de difracción, la cual desvía más la luz roja que la violeta.

Los diamantes son muy valorados como gemas por su rareza y belleza, producto en parte de su gran índice de refracción y de su considerable dispersión. Las gemas se cortan y se pulen para refractar y reflejar la luz que incide sobre ellas. Los colores brillantes que se observan en diamantes en otros casos incoloros de deben a la dispersión de la luz que se refracta y refleja en el interior. El giro ligero de un diamante cortado en caras en forma apropiada causa el cambio de los colores y el destello de las caras diferentes cuando varía el ángulo de incidencia de la luz.

Ejemplo: La luz de una fuente de hidrógeno incide perpendicularmente sobre un prisma de vidrio de buena calidad que tiene un ángulo de 30° . Determine la separación angular de los rayos de luz emergentes, suponiendo que la longitud onda del rojo es igual 656 nm y longitud onda del vilote es igual 434 nm. El índice de refracción del vidrio a esta dos longitudes de onda corresponde a 1.514 (rojo) y a 1.528 (violeta).

Solución.- Puesto que la luz incide perpendicularmente en el prisma, ningún cambio en la dirección del rayo ocurre en la primera interfaz. Vemos que el rayo incide en la superficie posterior con un ángulo de 30° . Éste es el punto en el que ocurrirá el cambio de dirección de la luz incidente. Podemos calcular los ángulos de los rayos refractados (transmitidos) respecto de la normal a la superficie.

Para el rojo obtenemos:

$$n_i \sin \mathbf{q}_i = n_t \sin \mathbf{q}_t$$

$$\sin \mathbf{q}_t (\text{rojo}) = n_i \sin \mathbf{q}_i / n_t = 1.514 \sin 30^\circ / 1.000 = 0.7550$$

$$\mathbf{q}_t (\text{rojo}) = 49.20^\circ$$

Para el violeta:

$$1.528 \operatorname{sen} 30^\circ / 1.000 = 0.7640$$

$$q \text{ (violeta)} = 49.82^\circ$$

La separación angular es $q \text{ (violeta)} - q \text{ (rojo)} = 0.62^\circ$. Advierta que la luz violeta se desvía un ángulo mayor porque el índice de refracción es mayor para este color que para el rojo. La formación de un arco iris por efecto de las gotas de agua en la atmósfera constituye otro efecto de la dispersión. En un arco iris, las gotas de agua dispersan la luz solar reflejada, develando los colores del espectro a través del cielo.

Color

El espectro visible contiene un intervalo continuo de color que varía uniformemente del violeta en extremo hasta el rojo oscuro en el otro. Sin embargo, podemos aproximar el espectro utilizando únicamente tres bandas independientes de color, que representan intervalos iguales de longitud de onda. Estas bandas se denominan los tres **colores primarios aditivos** de luz: rojo, verde y azul. Al mezclar estos tres colores en diversas combinaciones, podemos crear una amplia gama de otros colores. Por ejemplo, la combinación de la luz roja y la verde produce el amarillo. La suma de la luz azul a la luz roja da lugar al magenta, en tanto que el azul sumado al verde produce el cian. Si mezclamos los tres colores primarios en diversas proporciones podemos obtener la gama completa del resto de los colores, incluso el morado, el café y el naranja. Si sumamos los tres primarios con igual intensidad, el resultado es luz blanca. La producción de colores de esta manera se denomina “mezcla de colores por adición”.

La televisión a color genera imágenes a color por medio de la mezcla de color aditiva. Si se observa desde muy cerca el frente de un tubo de imagen de televisión, verá un patrón de puntos muy próximos dispuesto con grupos de tres. Cada punto contiene un material fluorescente que brilla cuando lo excita un haz de electrones. El sistema utiliza tres materiales diferentes para producir la luz roja, verde y azul. Al controlar la intensidad de la luz de los puntos independiente, es posible producir una amplia gama de colores.

También podemos color por la sustracción. En este proceso generamos color filtrando la luz de manera selectiva, eliminando así ciertas longitudes del haz. Por ejemplo, un filtro rojo quita el verde y el azul de la luz blanca, lo que origina un haz rojo. De igual manera, un filtro verde transmite luz verde y uno azul transmite luz azul. Sin embargo, no podemos combinar estos filtros para producir otros colores. Puesto que el filtro rojo sólo deja pasar dicho color, la combinación de rojo más filtro verde o de rojo más filtro azul no deja pasar la luz. Por ello, los filtros rojo, verde y azul no son apropiados para producir otros colores mediante la sustracción.

Utilizamos el término “colores complementarios para cualquier par de colores de luz que pueden combinarse para producir luz blanca. De ese modo, el color complementario para el rojo es el cian, el del azul, el amarillo, y el del verde, el magenta. Estos tres **colores son los colores primarios sustractivos**. Los filtros de estos colores pueden utilizarse sucesivamente para producir otros colores. Por ejemplo, al pasar luz blanca en forma sucesiva a través de filtros amarillo y magenta se genera luz roja. El filtro amarillo quita la luz azul en tanto que el filtro magenta hace lo mismo con la verde. La luz que queda es la roja.

11.2.- Interferencia y difracción

Difracción por una sola rendija

Estamos familiarizados con las sombras que proyecta un objeto sobre una pared, como una mano, que bloquea parte de un haz luminoso, y sabemos que la sombra tiene aproximadamente la misma forma geométrica que el objeto. El experimento de doble rendija de Young muestra que la luz no pasa por los objetos en líneas rectas simples, sino que más bien se dispersa en frentes de onda que pueden interferir entre sí.

Ésta dispersión de la luz que pasa a través de una pequeña abertura o alrededor de un borde afilado se conoce como **difracción**. La dispersión difractiva es exactamente lo que esperaríamos del principio de Huygens y Young recurrió a ella para iluminar sus dos rendijas.

La luz siempre se dispersa a medida que viaja, pero los efectos difractivos se vuelven observables sólo cuando la luz atraviesa una abertura suficientemente pequeña o pasa por un borde afilado. Por ejemplo, la sombra de un cojinete de bola (que tiene simetría circular) difracta la luz en torno de su borde interfiere constructivamente en el centro de la sombra. Lo anterior es consecuencia necesaria de la teoría ondulatoria de la luz.

El patrón producido por una onda luminosa plana que ilumina una sola rendija depende del tamaño de ésta respecto de la longitud de onda. Cuando la rendija es muy ancha en comparación con la longitud de onda, el patrón se asemeja mucho a la sombra geométrica de la rendija. Como en el caso de las ondas producidas en el agua de un estanque. El patrón se dispersa cuando el ancho de la rendija se hace más estrecho. La explicación para el patrón de la difracción de una sola rendija es similar a la del patrón de doble rendija.

Interferencia de la luz

En 1807, Tomas Young (1773-1829) publicó su *Disertación sobre filosofía natura* que contenía la descripción de un experimento óptico conocido ahora como experimento de Young de doble rendija. Ésta demostración de los efectos de interferencia establece firmemente la teoría ondulatoria de la luz sobre bases experimentales y proporciona medios directos para medir las longitudes de onda.

Para comprender porqué el experimento de la doble rendija de Tomas Young resultó crucial para la teoría ondulatoria de la luz necesitamos examinar primero los efectos de interferencia de dos fuentes de onda en fase. Mostraremos después que el arreglo experimental de Young producía estos mismos efectos, lo que implica que la luz es una onda.

Como se sabe, en una perturbación ondulatoria debida a dos o más fuentes casi siempre puede considerarse como la suma algebraica de las ondas individuales. Si las fuentes individuales vibran con frecuencias diferentes, no hay nada espacial respecto de la perturbación resultante. Sin embargo, si dos o más fuentes vibran a la misma frecuencia y con una fase relativa constante, ocurren interesantes efectos de interferencia.

Considere un pequeño corcho que vibra de arriba abajo sobre la superficie de un cuerpo e agua. Su movimiento genera ondas circulares en el agua que se difunden a partir del corcho. Si ahora se ponen a vibrar con la misma frecuencia dos corchos, cada uno de ellos ocasiona ondas circulares en el agua que se difunden a partir del punto de contacto. Las ondas de éstas dos fuentes interfieren entre sí. En algunas direcciones, se combinan constructivamente formando ondas de

mayor amplitud. En otras direcciones, la combinación es destructiva, por lo que hay poca o ninguna amplitud de onda. Lo anterior da como consecuencia que se formen valles y crestas reforzadas.

La condición para la *interferencia constructiva* está en que las ondas de dos fuentes con la misma frecuencia lleguen al mismo punto juntas con la misma fase.

Cuando dos ondas llegan exactamente fuera de fase, ocurre la interferencia destructiva, y la onda resultante está disminuida.

El montaje experimental de Tomas Young permitía que la luz solar que salía de una pequeña abertura incidiera sobre dos rendijas muy pequeñas. Cuando se proyectaba la luz de las dos rendijas sobre una pantalla aparecía tiras oscuras dividiendo el área en porciones luminosas y oscuras igualmente espaciadas.

Young se dio cuenta que para ocurriera interferencia la luz que incidía en las dos rendijas debía ser coherente. El propósito de la primera abertura era asegurar que sólo la luz que incidía en las dos rendijas surgía de la misma fuente y que por ello era coherente.

Una vez que Young concluyó su explicación del patrón de interferencia de doble rendija descubrió que al medir el espacio entre las rendijas, la distancia L a la pantalla y las posiciones y de los máximos y mínimos podía determinar la longitud de onda de la luz. Young recurrió a un análisis para determinar que las longitudes de onda de la luz variaba desde aproximadamente 400 nm en el extremo violeta hasta 700nm en el extremo rojo. (Figura 38)

Las ecuaciones correspondientes son:

Franjas claras:

$$y/x = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Franjas oscuras:

$$y/x = n\lambda/2 \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Figura 38

Ejemplo:

En el experimento de Young las dos ranuras están separadas 0.04 mm, y la pantalla se encuentra alejada 2m de las ranuras. La tercera franja clara a partir del centro está desplazada 8.3 cm de la franja central. Determine la longitud de onda de la luz incidente.

Solución: Para la tercera franja clara, $n = 3$, por lo tanto:

$$yd/x = 3\lambda$$

$$\lambda = yd/3x = (8.3 \times 10^{-2} \text{ m})(4 \times 10^{-5} \text{ m})/3(2 \text{ m})$$

$$= 5.53 \times 10^{-7} \text{ m} = 553 \text{ nm}$$

11.3.- Polarización

Con base en la interferencia y la difracción de la luz hemos apoyado la teoría ondulatoria de la misma. Sin embargo, otra importante propiedad de la luz, denominada polarización no es consecuencia sólo de que la luz sea una onda sino de ser una onda transversal. Las ondas longitudinales, como el sonido en el aire, no presentan polarización pero la luz, así como otra radiación electromagnética, pueden polarizarse. La característica de las ondas transversales consiste en que su movimiento oscilante ocurre en planos perpendiculares a la dirección en que se mueve la propia onda. Las ondas electromagnéticas incluyendo la luz visible, son ondas transversales que consisten en campos eléctricos y magnéticos oscilantes perpendiculares entre sí.

Las ondas electromagnéticas pueden generarse por medio de cargas eléctricas oscilantes como la corriente que oscila en una antena de radio o TV o de un electrón en un átomo. La dirección de la oscilación determina la orientación del campo eléctrico de la onda. En la mayor parte de las fuentes luminosas comunes, por ejemplo, la llama de una vela, el Sol o una lámpara incandescente, los diversos átomos oscilantes se orientan al azar. Aunque el campo eléctrico de cada onda producida por un átomo particular se ubica en un solo plano, el haz completo de luz contiene campos eléctricos oscilantes en todos los planos. Sin embargo, si las cargas oscilantes se confinan al movimiento en un plano individual, como en la corriente oscilante en una antena, entonces el campo eléctrico total del haz resultante oscila únicamente en esa dirección. Se dice que una onda de éstas características está polarizada y la orientación del vector del campo eléctrico se toma como la dirección de **polarización**. La onda completa tiene un campo magnético oscilante senoidalmente acoplado al campo eléctrico, aunque por lo general nos referiremos sólo al campo eléctrico para indicar la dirección de polarización.

Una analogía mecánica útil para la luz polarizada corresponde al movimiento de ondas transversales a lo largo de una cuerda. Si se sacude una cuerda de arriba a abajo, la onda está polarizada verticalmente en un plano. Tal onda puede atravesar una rendija vertical pero no una horizontal. De manera similar, si se sacude una cuerda de un lado a otro, la onda queda confinada en un plano horizontal; puede atravesar una rendija horizontal, más no una vertical.

Es posible producir luz polarizada filtrando luz ordinaria por un polarizador, que es un material que transmite sólo ondas que oscilan en un solo plano. Varios materiales tienen ésta propiedad entre los cuales se incluye el mineral turmalina que existe en forma natural. Cuando un haz ordinario de luz incide en un cristal de turmalina, parte de la luz se absorbe y parte se transmite. Si

un segundo cristal de turmalina se coloca detrás de primero y se alinea en la misma orientación, se transmite luz. Pero si el segundo cristal se gira noventa grados en torno al eje del haz luminoso, la luz no lo atraviesa. Es posible explicar ésta observación en términos de la polarización. El haz luminoso inicial no está polarizado. Lo imaginamos como una mezcla de polarizaciones aleatorias. Cuando éste haz incide en el primer cristal, la turmalina deja pasar sólo la luz polarizada a lo largo del eje de polarización del cristal. La luz que emerge del primer cristal está totalmente polarizada a lo largo de la dirección correspondiente. Cuando la luz incide en el segundo cristal de turmalina, se absorbe la totalidad de la misma, pues el segundo cristal se ha girado de modo que su eje de polarización está a 90° del correspondiente al primer cristal.

Los polarizadores cristalinos como la turmalina no se utilizan mucho en la actualidad debido a que se han desarrollado polarizadores plásticos económicos. (Figura 39)

La ecuación que corresponde al o anterior es la conocida como la ley de Malus y es:

$$I = I_m \cos^2 q$$

En donde I_m es la cantidad máxima de luz transmitida cuando los dos polarizadores se alinean a lo largo de la misma dirección de polarización.

Un polarizador ideal deja pasar 100% de la luz incidente que está polarizada en un plano a lo largo de su dirección de polarización y 0% de la luz que se polariza a 90° respecto de su dirección de polarización. Puesto que la luz no polarizada es una mezcla de todas las polarizaciones posibles, un polarizador ideal sólo transmite 50% de la intensidad de la luz no polarizada no incidente.

Figura 39

Ejemplo:

Dos polarizadores ideales se alinean con un ángulo de 30° entre sus direcciones de polarización. Si incide sobre de ellos luz no polarizada de intensidad I_0 . ¿Cuál es la intensidad de la luz transmitida?

Solución: la luz que pasa a través del primer polarizador corresponde a la mitad de la intensidad incidente, por lo que:

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

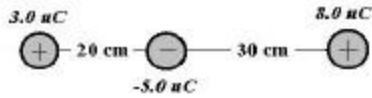
La cantidad I_1 se convierte en la I_m de la Ley de Malus. La intensidad de la luz que emerge de segundo polarizador es:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \mathbf{q} = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 30^\circ = 0.375 I_0$$

IV. EJERCICIOS DE AUTOEVALUACIÓN

- Dos monedas reposan sobre una mesa, con una separación de 1.5 m y contienen cargas idénticas. ¿De qué magnitud es la carga en cada una, si una de las monedas experimenta una fuerza de 2 N?**
 - $q = 2 \times 10^{-5} \text{ C}$
 - $q = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$
 - $q = 0.2 \times 10^{-5} \text{ C}$
 - $q = 0.02 \times 10^{-5} \text{ C}$
- La radiación electromagnética capaz de afectar el sentido de la vista se llama:**
 - rayo Gama
 - luz visible
 - rayos X
 - rayos Cósmicos
- Cuando una onda es detenida pasando solamente una parte de ella en un sentido se le llama:**
 - frecuencia
 - radiación
 - polarización
 - reflexión
- Es la energía que se transmite por cargas en sus partículas.**
 - cinética
 - potencial
 - eléctrica
 - térmica
- Las cargas de igual signo se repelen y las de diferente signo se atraen, es un principio:**
 - dinámica
 - electrostático
 - hidráulico
 - eléctrico
- Menciona un ejemplo de propagación de una onda electromagnética.**
 - La luz
 - El magneto
 - La frecuencia
 - La longitud de onda
- La frecuencia es:**
 - longitud de onda por segundo
 - vibraciones por segundo
 - magnitud de onda por segundo
 - velocidad por segundo
- En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, el electrón ($q = -e$) circunda a un protón ($q = e$) en una órbita de radio $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$. La atracción del protón por el electrón aporta la fuerza centrípeta necesaria para mantener al electrón en la órbita. Encuentra la fuerza de atracción eléctrica entre las partículas.**
 - 82 nN
 - 82 mN
 - 82 N
 - 82 GN
- ¿Cuál es la ecuación de las ondas?**
 - $V = f\Omega$
 - $V = f\lambda$
 - $V = mc^2$
 - $V = ma$

10. Tres cargas puntuales se colocan sobre el eje x como se muestra en la figura. Determina la fuerza neta sobre la carga de -5 mC ocasionada por las otras dos cargas.



- A. 0.6 N
 B. 6.0 N
 C. 60.0 N
 D. 600.0 N
11. De los siguientes ejemplos ¿cuál corresponde al espectro electromagnético?
 A. El sonido
 B. El cuerpo humano
 C. La vibración de una cuerda de guitarra
 D. El ruido
12. Un núcleo de helio tiene una carga de $+2e$ y uno de neón de $+10e$, donde e es el cuanto de carga, $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Encuentra la fuerza de repulsión ejercida sobre cada uno de ellos debido al otro, cuando se hallan a una distancia de 3 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$).
 A. 0.51 nN
 B. 0.51 mN
 C. 0.51 N
 D. 0.51 GN
13. El campo magnético es producido por la presencia de:
 A. imanes
 B. metales no ferrosos
 C. materiales aislantes
 D. Metales no imantados

14. El campo eléctrico es producido por la presencia de:
 A. imanes
 B. metales ferrosos
 C. materiales cargados eléctricamente
 D. metales no imantados

15. ¿Cuál es la fórmula de la Ley de Coulomb?
 A. $\omega = \pi/2r$
 B. $F_g = Gm_1m_2/r^2$
 C. $F_e = Kq_1q_2/r^2$
 B. $F_e = Gq_1q_2/r^2$
16. ¿Cuál es la relación que identifica a la intensidad del campo eléctrico?
 A. La fuerza eléctrica es igual a la carga por la intensidad del campo eléctrico
 B. La fuerza eléctrica es igual a la corriente por la longitud de onda
 C. La velocidad de propagación de una onda es igual al producto de su longitud por su frecuencia
 D. La velocidad de propagación de una onda es menor al producto de su longitud por su frecuencia
17. ¿Qué estudia la electrodinámica?
 A. cargas eléctricas en reposo
 B. cargas eléctricas con velocidad constante
 C. cargas eléctricas neutras
 D. cargas aceleradas
18. Es el producto de las masas de dos cuerpos y siempre es de atracción, nos referimos a la ley de:
 A. Faraday
 B. Coulomb
 C. La gravitación universal
 D. De Gauss

19. ¿Cuándo se produce una corriente eléctrica?
- Cuando un conductor cruza líneas de fuerza de un campo magnético
 - Cuando se rechazan las líneas de fuerza de un campo magnético
 - Cuando se destruyen las líneas de fuerza de un campo magnético
 - Cuando se igualan las líneas de fuerza de un campo magnético
20. ¿Qué fórmula cumple con la Ley de Ohm?
- $V = RI$
 - $E = F_e/q$
 - $E = \rho Vg$
 - $V = R/I$
21. ¿Cuál es la fórmula de potencia?
- $P = V/I$
 - $P = VI$
 - $P = VI^2$
 - $P = VR$
22. ¿Qué estudia la electrostática?
- cargas en movimiento
 - cargas oscilatorias
 - cargas en reposo
 - cargas aceleradas
23. Señala la diferencia entre un rayo gamma y una microonda:
- La frecuencia aumenta en el rayo gamma
 - La longitud disminuye 12 veces
 - La frecuencia y la longitud son iguales en magnitud
 - La frecuencia disminuye en el rayo gamma
24. ¿Cuál es la masa de un electrón?
- 9.1×10^{-31} kg
 - 1.67×10^{-27} kg
 - 1.67×10^{27} kg
 - 9.1×10^{31} kg
25. Los siguientes enunciados corresponden a la ley de Coulomb, excepto uno; ¿cuál es?
- productos de cargas
 - es una ley universal
 - puede ser de atracción y de repulsión
 - Es una ley del inverso al cuadrado
26. ¿Cuál es la ecuación de la intensidad del campo eléctrico?
- $F_e = Kq_1q_2/r^2$
 - $E = KQ/r^2$
 - $I = V/R$
 - $I = VR$
27. Las ondas electromagnéticas se caracterizan por:
- tener doble onda, horizontal y vertical
 - requerir un medio para su propagación
 - ser todas excepto la luz
 - ser sólo la luz
28. Dos partículas cargadas se atraen entre sí con una fuerza F. Si la carga de alguna de las partículas se aumenta al doble y también se duplica la distancia que las separa, entonces la fuerza F será:
- F
 - 2F
 - F/2
 - F/4

29. ¿Cuál es la resistencia eléctrica de un dispositivo que permite que circule por él una corriente eléctrica con intensidad de 100 mA cuando se conecta a una batería de 12 V?

- A. 1200 Ω
- B. 0.12 Ω
- C. 120 Ω
- D. 88 Ω

30. ¿Cuál es la fórmula de la intensidad del campo eléctrico?

- A. $E = q/F$
- B. $E = F/q$
- C. $F = qE$
- D. $F = q/E$

31. Dadas las resistencias $R_1 = 7W$, $R_2 = 5.2W$ y $R_3 = 6.3W$, encuentra la resistencia equivalente si las tres resistencias las conectas de la siguiente manera: R_1 y R_2 en paralelo, y R_3 en serie.

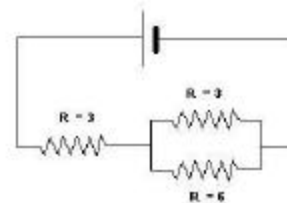
- A. 9.28 Ω
- B. 92.8 Ω
- C. 928 Ω
- D. 9280 Ω

32. ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico a una distancia de 2 m de una carga de -12 nC ?

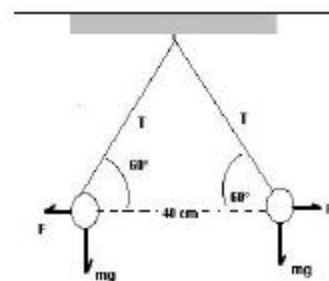
- A. 27 N/C
- B. 270 N/C
- C. 0.27 N/C
- D. 2.7 N/C

33. Considerando el circuito que se muestra en la figura, y sabiendo que el voltaje entre los polos de la pila es de 1.5 V, determina la resistencia total equivalente del conjunto de R_1 , R_2 y R_3

- A. 5 Ω
- B. 50 Ω
- C. 0.5 Ω
- D. 0.05 Ω



34. Como se muestra en la figura, dos bolas idénticas, cada una con una masa de 0.10 g, portan cargas idénticas y están suspendidas por un hilo de igual longitud. La posición que se muestra es la de equilibrio. Encuentra la carga de cada bola.



- A. $q = 0.10 \mu\text{C}$
- B. $q = 10 \mu\text{C}$
- C. $q = 0.010 \mu\text{C}$
- D. $q = 0.0010 \mu\text{C}$

35. Dos cargas están colocadas sobre el eje x : $+3 \text{ mC}$ en $x = 0$ y -5 mC en $x = 40 \text{ cm}$. ¿Dónde debe de colocarse una tercera carga q si la fuerza resultante sobre ésta debe ser cero?
- A. 1.375 m
 - B. 137.5 m
 - C. 1375 m
 - D. 0.1375 m
36. La rapidez de la luz en cierto vidrio es $1.91 \times 10^8 \text{ m/s}$. ¿Cuál es el índice de refracción del vidrio?
- A. 1.57
 - B. 157
 - C. 15.7
 - D. 0.157
37. Un haz de luz choca contra una superficie de agua con un ángulo incidente de 60° . Determina la dirección de los rayos reflejado.
- A. 60°
 - B. 41°
 - C. 14°
 - D. 6°
38. El ángulo crítico para la luz que pasa de la sal de roca al aire es de 40.5° . Calcula el índice de refracción de la sal de roca.
- A. 1.54
 - B. 154
 - C. 15.4
 - D. 0.154
39. ¿Cuál es el ángulo crítico cuando la luz pasa del vidrio ($n = 1.50$) al aire?
- A. 41.8°
 - B. 48°
 - C. 4.18°
 - D. 0.418°
40. Una alberca ($n = 1.3333$) tiene 60 cm de profundidad. Calcula la profundidad aparente cuando se observa verticalmente desde el aire.
- A. 45 cm
 - B. 4.5 cm
 - C. 0.45 cm
 - D. 450 cm

VI. BIBLIOGRAFÍA

Básica

- Tippens, P.E. *Física: conceptos y aplicaciones*. México Mc Graw - Hill/ interamericana, 1989. 2ª ed.

Complementaria

- Alonso, Marcelo y Rojo, Onofre. *Volumen I; Mecánica; volumen II: Física. Campos y ondas*. México, Fondo Educativo Interamericano, 1981.
- Cetto, Ana María, et al., *Temas de nuestro tiempo*. México, Trillas, 1993.
- Orear, J. *Física*. México, Limusa, 1989.
- P.S.S.C., *Física*. 2 vol. México, Reverté, 1975.
- Stollberg, Robert y Hill, Faith Fich. *Física: fundamentos y fronteras*. México, Publicaciones Cultural, 1969.
- White, H.E. *Física moderna*. México, UTEHA, 1990.

RESPUESTAS A LA AUTOEVALUACIÓN

1	A
2	B
3	C
4	C
5	B
6	A
7	B
8	A
9	B
10	A
11	B
12	A
13	A
14	C
15	C
16	A
17	B
18	C
19	A
20	A

21	B
22	C
23	B
24	A
25	B
26	B
27	A
28	C
29	C
30	B
31	A
32	A
33	A
34	A
35	A
36	A
37	A
38	A
39	A
40	A

TABLA DE ACIERTOS

Puntuación	Calificación
0 - 23	5
24 - 27	6
28 - 31	7
32 - 35	8
36 - 39	9
40	10