

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

INGENIERÍA EN LOGÍSTICA Y TRANSPORTE

3ER. SEMESTRE

UNIDAD DIDÁCTICA:
FÍSICA

UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

CLAVE
13142313

UNIVERSIDAD ABIERTA Y A DISTANCIA DE MÉXICO





UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	3
COMPETENCIA ESPECÍFICA.....	4
LOGROS.....	4
3.1 CAMPO ELÉCTRICO	5
3.1.1 LEY DE COULOMB	11
3.1.2 POTENCIAL ELÉCTRICO	17
3.1.3 LEY DE GAUSS PARA EL CAMPO ELÉCTRICO.....	23
3.2 MAGNETISMO.....	27
3.2.1 CAMPO MAGNÉTICO	27
3.2.2 LEY DE AMPERE	31
3.2.3 LEY DE OHM	35
3.2.4 LEY DE FARADAY.....	43
3.3 CIRCUITOS.....	45
3.3.1 RESISTORES.....	46
3.3.2 CAPACITORES.....	48
3.3.3 LEYES DE KIRCHOFF	50
3.3.4 CIRCUITO RC	51
CIERRE DE UNIDAD.....	54
FUENTES DE CONSULTA.....	55



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

PRESENTACIÓN

En esta unidad estudiarás los fenómenos electromagnéticos. La primera parte está destinada al estudio de la electricidad en reposo, lo cual involucra el estudio de cargas eléctricas, las fuerzas entre ellas y su comportamiento en materiales. Posteriormente estudiarás el movimiento de las cargas eléctricas y los voltajes que se producen.

El estudio de la electricidad es indispensable pues interviene en casi todas las cosas a nuestro alrededor, está en la iluminación procedente del cielo, en la chispa debajo los pies al arrastrarlos sobre una alfombra, y es lo que mantiene juntos a los átomos para que formen moléculas.

Dentro de la segunda parte de esta unidad describe lo que el campo magnético para después señalar la relación entre las corrientes eléctricas con el magnetismo. El término magnetismo proviene de la región de Magnesia, una isla en el Mar Egeo, donde los griegos encontraron ciertas piedras hace más de 2000 años, éstas piedras, llamadas magnetitas, tenían la propiedad inusual de atraer trozos de hierro. Los imanes fueron primero empleados en la construcción de brújulas utilizados para la navegación, por los chinos, en el siglo XII.

Los temas de magnetismo y electricidad se desarrollaron de manera independiente hasta 1820, cuando Hans Christian Oersted descubrió que una corriente eléctrica afecta a una brújula magnética, fue entonces cuando se observó que el magnetismo estaba relacionado con la electricidad.

Al finalizar la unidad aprenderás a manejar diversos circuitos electrónicos, a través de este estudio comprenderás cómo es posible utilizar el magnetismo y la electricidad para operar motores y otros dispositivos eléctricos indispensables para la humanidad.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

COMPETENCIA ESPECÍFICA

Identifica conceptos eléctricos y magnéticos para comprender el funcionamiento de motores de corriente alterna y directa, a través del uso de ecuaciones electromagnéticas en el contexto del transporte.

LOGROS

- Reflexionar sobre el uso de la electricidad y el magnetismo dentro de la vida cotidiana y dentro de la logística y el transporte.
- Conocer los conceptos previos que poseen los alumnos sobre el tema del electromagnetismo.
- Reforzar a través de ejercicios prácticos la adquisición teórica del campo eléctrico, la ley de Coulomb, el potencial eléctrico y la ley de Gauss.
- Consolidar los conceptos magnéticos como: campo magnético, ley de Ampere, ley de Ohm y ley de Faraday.
- Utilizar las leyes del electromagnetismo para resolver problemas de circuitos electrónicos.
- Vincular los conceptos revisados sobre electromagnetismo con los motores eléctricos



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

3.1 CAMPO ELÉCTRICO

En este tema revisarás uno de los conceptos que dan forma a la teoría electromagnética, el concepto de “campo eléctrico”. El campo se entiende, en el caso eléctrico, como una acción a distancia que se produce alrededor de una partícula cargada en reposo, lo asociamos a una magnitud, es decir que es medible, en este caso, la fuerza que se ejerce sobre una partícula cargada de prueba.

También estudiarás algunos fenómenos eléctricos cuando hay movimiento de cargas.

Antes de comenzar a introducir el concepto de campo eléctrico es importante que hablemos sobre qué es la carga eléctrica, la conservación de ésta y cómo es que se llega a cargarse eléctricamente un objeto.

Experimentalmente se determinó que existen dos tipos de carga eléctrica; se les llamó positiva y negativa. Los electrones tienen carga negativa, y los protones tienen carga positiva.

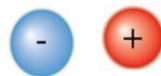


Fig. 1 Electrón y protón

Las cargas de un mismo signo se repelen; cargas de signo contrario, se atraen.

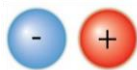


Fig.2 Cargas positivas y negativas

En un átomo neutro hay igual cantidad de electrones y de protones, de modo que no hay carga neta; el equilibrio entre cargas positivas y negativas es exacto. Los



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

objetos materiales están hechos de átomos, lo cual significa que se componen de electrones y protones. Como característica común, los objetos tienen números iguales de electrones y protones y, por consiguiente, son eléctricamente neutros.

Por lo tanto, en un sistema aislado, la carga eléctrica se conserva. La materia es neutra, es decir, tiene la misma cantidad de cargas negativas y positivas. Cuando en un objeto hay un ligero desequilibrio producido por la añadidura o por la remisión de electrones, se dice que el objeto está cargado eléctricamente. Aunque los electrones interiores en un átomo están muy estrechamente ligados al núcleo atómico de carga opuesta, los electrones más externos de muchos átomos están ligados muy holgadamente y se les puede echar fuera con facilidad.

Los electrones se retienen con mayor firmeza en el caucho o plástico que en el cabello, por ejemplo. De aquí que, cuando se pasa un peine a través del cabello, los electrones se transfieren del cabello al peine. Entonces, el peine tiene un exceso de electrones y se dice que está cargado negativamente. El cabello, en cambio, tiene una deficiencia de electrones y se dice que está cargado positivamente.

Si frotas una varilla de vidrio o plástico con seda, encontrarás que la varilla se ha cargado positivamente; la seda tiene mayor afinidad por los electrones que la varilla de vidrio o plástico. Los electrones se transfieren por frotamiento de la varilla a la seda.



Fig. 3 Varilla de vidrio y un trozo de seda



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Así, un objeto que tiene números desiguales de electrones y protones tiene carga eléctrica. Si tiene más electrones que protones, se dice que el objeto está cargado negativamente. Si tiene menos electrones que protones, se dice que el objeto está cargado positivamente.

Definición de campo eléctrico

El campo eléctrico en un punto en el espacio se define como la fuerza eléctrica que actúa sobre una carga positiva de prueba colocada en ese punto, dividido por la magnitud q_0 de la carga de prueba¹.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Las unidades del vector $\vec{E}$ en el sistema internacional de unidades son Newton/Coulomb. Por consiguiente, la fuerza eléctrica sobre una carga q colocada en un campo eléctrico sería:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Fig. 4 Carga de prueba en el campo eléctrico de una distribución de cargas.

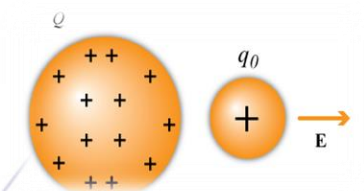


Fig. 5. Campo eléctrico de una distribución de cargas

¹ Por carga prueba se entiende una partícula cargada de tamaño cero.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Para calcular el campo eléctrico en un punto P, de una distribución de cargas continua, dividimos la distribución de carga en elementos infinitesimales de carga Δq , así el campo eléctrico debido a uno de esos elementos infinitesimales, que se encuentra a una distancia r del punto P, sería:

$$\Delta \vec{E} = k \frac{\Delta q}{r^2} \hat{r}$$

Donde $\hat{r}$ es el vector unitario dirigido desde el elemento de carga Δq al punto P.

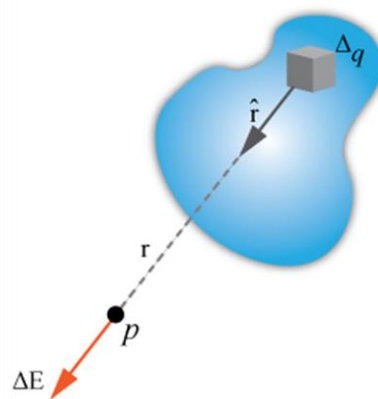


Fig. 5 Elemento infinitesimal de carga Δq a una distancia r del punto.

El campo eléctrico debido a todos los elementos infinitesimales de carga sería:

$$\vec{E} = k \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Donde i es el i -ésimo elemento de la distribución continua.

El campo total en el límite cuando $\Delta q_i \rightarrow 0$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

$$\vec{E} = k \lim_{\Delta q_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{r}_i$$

Lo que es igual a la integral sobre toda la distribución de carga:

$$\vec{E} = k \int \frac{dq}{r^2} \hat{r}$$

La densidad de carga eléctrica puede estar distribuida sobre una línea, una superficie o un volumen. Para estos casos usamos el concepto de densidad de carga, veamos a continuación los tipos que existen:

Densidad de carga lineal

Cuando la carga Q se encuentra distribuida a lo largo de una línea de longitud l , se define la densidad de carga lineal como:

$$\lambda = \frac{Q}{l}$$

Donde λ tiene unidades de Coulombs por metro [C/m].

Densidad de carga superficial

Cuando la carga Q se encuentra distribuida en una superficie de área A , se define la densidad de carga superficial como:

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

Donde σ tiene unidades de Coulombs por metro cuadrado [C/m²].



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Densidad de carga volumétrica

Cuando la carga Q se encuentra distribuida en un volumen V , se define la densidad de carga volumétrica como:

Donde ρ tiene unidades de $\rho = \frac{Q}{V}$ Coulombs por metro cúbico (C/m^3).

Líneas de campo eléctrico

Una forma de representar el campo eléctrico de manera gráfica es dibujando líneas que sean paralelas al vector campo eléctrico en cualquier punto en el espacio. A estas líneas se les llama líneas de campo eléctrico. El vector campo eléctrico E es siempre tangente a las líneas de campo eléctrico en cada punto.

La densidad de líneas de campo eléctrico, es decir el número de líneas por unidad de área es proporcional a la magnitud del campo eléctrico en esa región. Para dibujar líneas de campo eléctrico seguimos las siguientes reglas:

Regla 1

- Las líneas deben iniciar en la carga positiva y terminar en la negativa.

Regla 2

- El número de líneas que se alejan de una carga positiva o se dirige hacia una carga negativa deben ser proporcionales a la magnitud de la carga

Regla 3

- Ninguna línea del campo eléctrico se cruza.

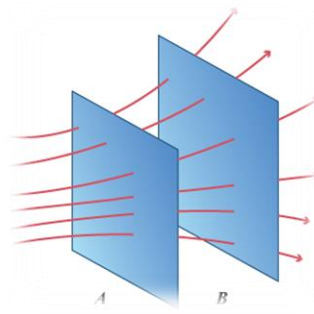


Fig.6 El campo eléctrico en la superficie A es mayor que en la superficie B. Esto se muestra en la densidad de líneas por unidad de área.

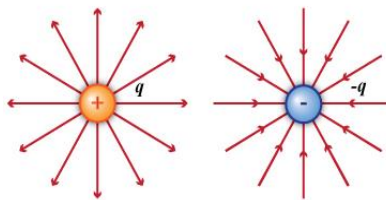


Fig. 7 Líneas de campo eléctrico de una carga positiva y de una carga negativa.

A continuación, profundizaremos acerca de la fuerza entre cargas eléctricas, para comprender lo poderoso de tener una ecuación para encontrar el campo eléctrico ya sea de una partícula o de una distribución de cargas.

3.1.1 LEY DE COULOMB

A la magnitud de la fuerza de interacción eléctrica entre dos cargas puntuales, q_1 y q_2 , se le conoce como ley de Coulomb y se presenta de la siguiente manera:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Donde r es la separación entre las dos cargas y k es la constante de proporcionalidad llamada constante de Coulomb con un valor de:

$$k = 8.9876 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

que también puede representarse como:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Donde:

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$$

y es llamada permitividad del vacío.

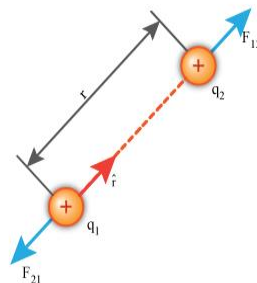


Fig. 8. La fuerza que se ejerce sobre una de las cargas depende de la distancia que la separa de la otra carga y del producto de sus cargas.

La forma vectorial de la Ley de Coulomb

En muchas ocasiones es más sencillo trabajar con la representación vectorial de fuerza, principalmente cuando las cargas no se encuentran sobre una línea recta. La forma vectorial de la ley de Coulomb de una fuerza eléctrica ejercida por una carga puntual q_1 sobre la carga puntual q_2 , separadas, una distancia r , sería:

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$

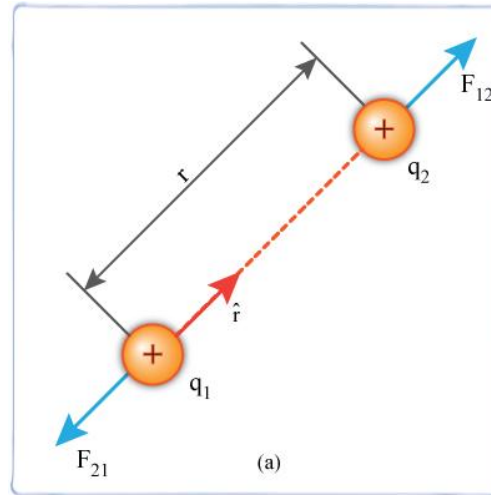


Fig. 9 Se ilustra la fuerza que se ejerce sobre una carga positiva por otra carga del mismo signo.

Donde $\hat{r}_{12}$ es el vector unitario dirigido de la carga q_1 a la carga q_2 , y por la Tercera Ley de Newton, la carga q_2 ejerce sobre q_1 una fuerza igual de magnitud pero de sentido contraria.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Si las cargas son iguales, el signo del producto será positivo y la fuerza será de repulsión; si las cargas son negativa y positiva, la fuerza será de atracción.

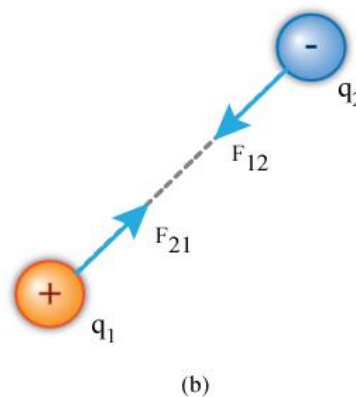


Fig. 10 Se ilustra la fuerza que se ejerce sobre una carga negativa por otra carga del mismo signo.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Principio de Superposición

Cuando se necesita calcular la fuerza que se ejerce sobre una partícula cargada por más de dos partículas, se realizan las operaciones de par en par y, posteriormente, se suman los resultados. Este es un principio básico llamado **principio de superposición**. El principio de superposición indica que la fuerza que se ejerce sobre una partícula debido a varias cargas puede calcularse por separado en cada par de cargas, y luego sumar vectorialmente para obtener la fuerza resultante que se ejerce sobre ella:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \dots$$

Donde f_{12} es la fuerza que ejerce la carga puntual 2 sobre la carga puntual 1, es la fuerza que ejerce la carga puntual 3 sobre la carga puntual 1, y así sucesivamente.

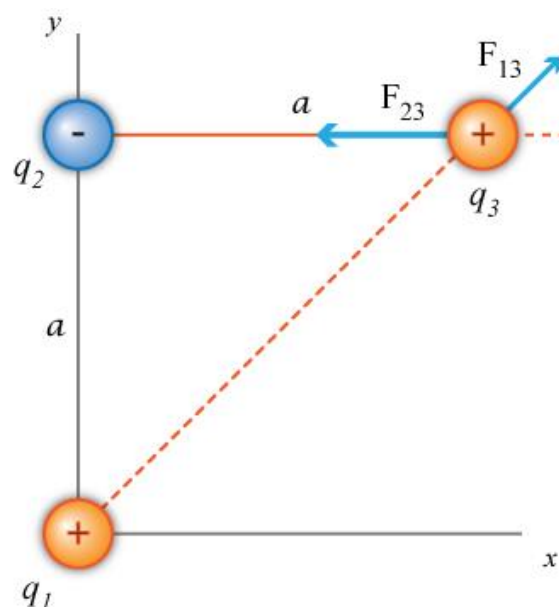


Fig. 11 Se muestra la fuerza que se ejerce sobre una partícula cargada positivamente debido a dos partículas cargadas.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Campo eléctrico de una carga puntual

Si sabemos la magnitud y la dirección del campo eléctrico en un punto del espacio generado por una carga eléctrica puntual, sabremos la fuerza que se ejercería sobre cualquier partícula cargada en ese lugar.

Consideremos la carga q . Esta carga crea un campo eléctrico en todos los puntos que le rodea. Si colocamos una partícula cargada de prueba q_0 , a una distancia r de la carga q , la fuerza que se ejerce sobre la carga q_0 , sería:

$$\vec{F} = k \frac{qq_0}{r^2} \hat{r}$$

Donde $\hat{r}$ es el vector unitario que va desde la carga q hacia la carga q_0 .

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Tenemos entonces:

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

Si la carga q es positiva, la dirección del campo eléctrico apunta hacia fuera de la carga; si la carga q es negativa, el campo eléctrico apunta hacia la carga q .

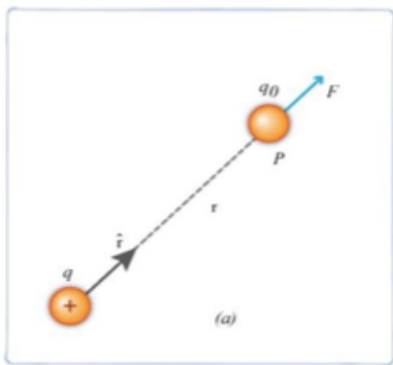


Fig. 12. Partícula cargada de prueba carga q .

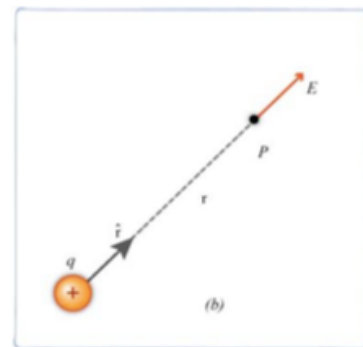


Fig. 13. Campo eléctrico en el a una distancia r de la punto p .

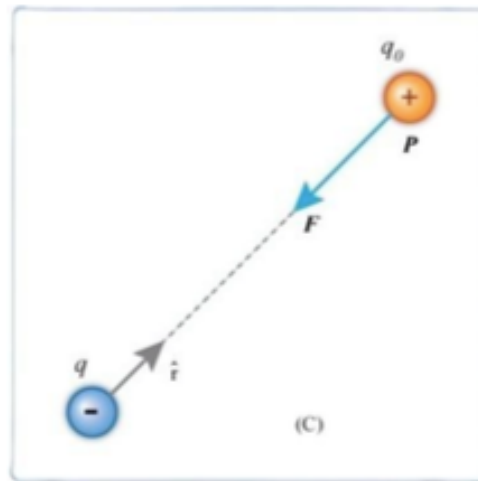


Fig. 14. Si la carga q es negativa, la fuerza sobre la partícula de prueba apunta hacia la carga q .

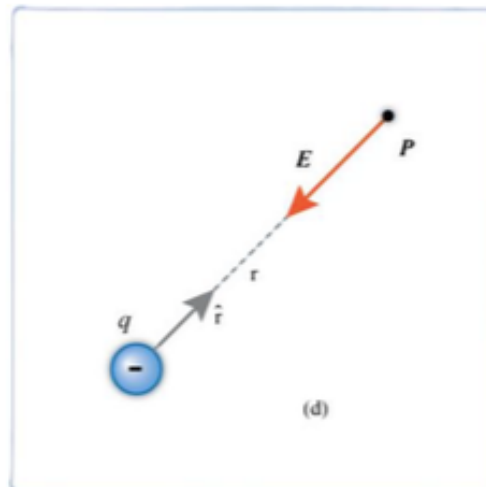


Fig. 15. Si la carga q es negativa, el campo eléctrico apunta hacia la carga q .

Movimiento de partículas en un campo eléctrico uniforme

Si una partícula con carga q y masa m se mueve en un campo eléctrico $\vec{E}$, la fuerza que se ejerce sobre la partícula es $q\vec{E}$,

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

Y de acuerdo a la segunda Ley de Newton

$$\vec{F} = m\vec{a} = q\vec{E}$$

La aceleración de la partícula cargada se encuentra al despejar $\vec{a}$,



$$\vec{a} = \frac{q\vec{E}}{m}$$

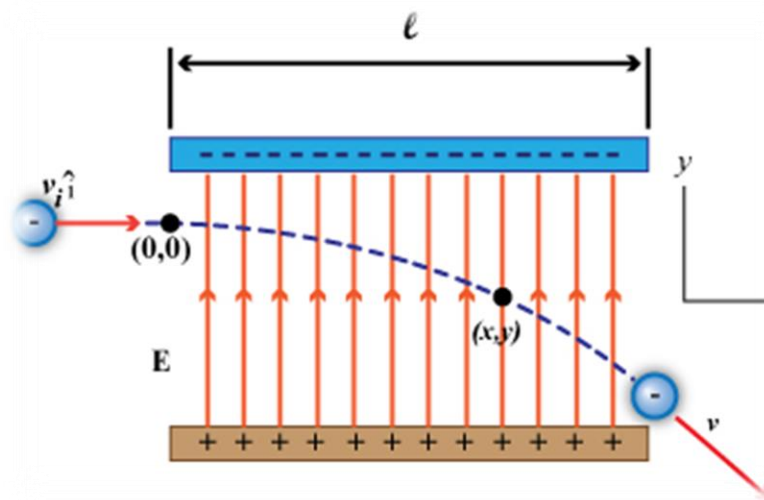


Fig. 16 Una partícula cargada moviéndose en un campo eléctrico uniforme.

3.1.2 POTENCIAL ELÉCTRICO

Cuando una partícula se mueve en un campo eléctrico, el campo ejerce una fuerza que puede hacer trabajo sobre la partícula. Este trabajo puede expresarse en términos de la energía potencial eléctrica como lo desarrollaremos a continuación.

La energía potencial eléctrica depende de la posición de la partícula cargada en el campo eléctrico. Describimos la energía potencial eléctrica usando el concepto de potencial eléctrico o simplemente potencial. En un circuito, una diferencia de potencial de un punto a otro se le llama voltaje. Los conceptos de potencial y voltaje son básicos para entender el funcionamiento de circuitos que veremos posteriormente.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Si una partícula q_0 tiene un desplazamiento infinitesimal de $d\vec{s}$, el trabajo realizado por un campo eléctrico $\vec{E}_0$ sobre una carga de prueba q_0 es:

$$\vec{F} \cdot d\vec{s} = q_0 \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Como esta cantidad de trabajo es realizado por el campo, la energía potencial del sistema campo-carga cambia por una cantidad

$$dU = -q_0 \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Para un desplazamiento de la carga desde el punto A al punto B, el cambio en la energía potencial del sistema, $\Delta U = U_B - U_A$, es:

$$\Delta U = -q_0 \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Como la fuerza $q_0 \vec{E}$ es conservativa, la integral de línea no depende de la trayectoria recorrida por la carga desde el punto A al punto B.

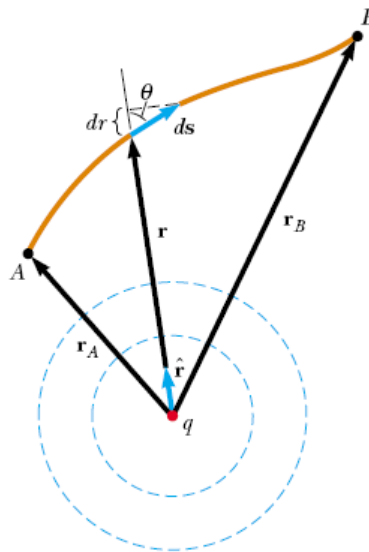


Figura 17. El potencial eléctrico entre los puntos A y B depende sólo de la distancia radial r_A y r_B a la carga q .

Para una posición dada de la carga de prueba en el campo, el sistema campo-carga tiene una energía potencial U relativa a la configuración del sistema que se define como $U = 0$. Si se divide la energía potencial por la carga de prueba, se obtiene una cantidad física que depende exclusivamente de la distribución de carga. La energía potencial por unidad de carga U/q_0 es independiente del valor de q_0 y tiene un valor determinado en cada punto del campo eléctrico.

A la cantidad U/q_0 se le llama potencial eléctrico o simplemente potencial V . El potencial eléctrico, en cualquier punto en un campo eléctrico, es:

$$V = \frac{U}{q_0}$$

El potencial eléctrico es una cantidad escalar. Si la carga se mueve de la posición A, a la posición B en un campo eléctrico, el sistema campo-carga tiene un cambio en la energía potencial.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Definimos la diferencia de potencial, $\Delta V = V_B - V_A$, entre los puntos A y B en un campo eléctrico como el cambio en la energía potencial del sistema, cuando una carga de prueba se mueve entre los dos puntos, dividido entre la carga de prueba q_0 ,

$$\Delta V = \Delta U / q_0$$

Que se puede escribir como:

$$\Delta V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Al igual que la energía potencial, lo importante con el potencial eléctrico son las diferencias.

Se puede tomar un punto del campo eléctrico, por ejemplo, A, de tal manera que el potencial eléctrico sea convenientemente cero. Al hacer la diferencia,

$$\Delta V = V_B - V_A = V_B, \text{ se facilita el trabajo.}$$

Todos los puntos en un plano perpendicular a un campo eléctrico uniforme se encuentran al mismo potencial eléctrico.

A la superficie formada por esta distribución continua de puntos que tienen el mismo potencial eléctrico se le llama **superficie equipotencial**.

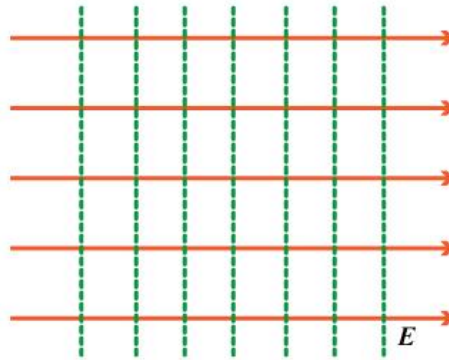


Fig 18. Superficies equipotencial

Si se mueve una carga q desde el punto A al punto B sin cambiar la energía cinética de la carga, el trabajo realizado sobre la carga cambia la energía potencial del sistema Y como:

$$\Delta V = \Delta U / q$$

Entonces:

$$W = q\Delta V$$

La unidad del potencial eléctrico en el Sistema Internacional de medidas es el volt (V)

$$1V = 1 \frac{J}{C}$$

El electrón volt (eV) se define como la energía que un sistema carga-campo gana o pierde cuando una carga de magnitud e , un electrón o un protón, se mueve a



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

través de una diferencia de potencial de 1 V. Como $1V = 1J/C$ y debido a que la carga fundamental es $+1.60 \times 10^{-19} C$, un electrón-volt sería:

$$1 eV = 1.60 \times 10^{-19} C \cdot V$$

El campo eléctrico $\vec{E}$ y el potencial eléctrico V están relacionados de acuerdo con la expresión:

$$\Delta V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Para una diferencia de potencial dV entre dos puntos separados una distancia ds tenemos:

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{s}$$

Si el campo eléctrico tiene una sola componente, por ejemplo E_x , entonces $\vec{E} \cdot d\vec{s} = E_x dx$, por lo tanto:

$$dV = -E_x dx$$

De donde se obtiene:

$$E_x = -\frac{dV}{dx}$$

Lo mismo puede hacerse con las componentes y y z .

Cuando una carga se mueve a lo largo de una superficie equipotencial una distancia $d\vec{s}$ entonces $dV = 0$ porque el potencial es constante a lo largo de una superficie equipotencial, y como:

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Entonces el campo eléctrico debe ser perpendicular al desplazamiento a lo largo de la superficie equipotencial, por lo que las superficies equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo eléctrico que pasan a través de ellas.

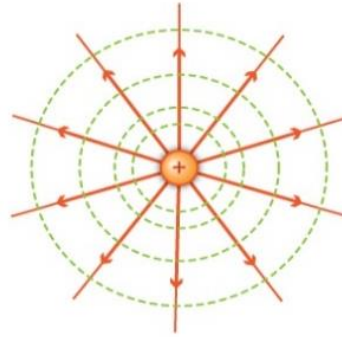


Fig.19 Líneas de campo eléctrico y las superficies equipotenciales mostradas con líneas punteadas

3.1.3 LEY DE GAUSS PARA EL CAMPO ELÉCTRICO

Otra forma para calcular campos eléctricos es usando el concepto de flujo eléctrico. Llamamos flujo eléctrico Φ_E al producto de la magnitud de campo eléctrico E , y el área de la superficie perpendicular al campo

$$\Phi_E = EA$$

Las unidades del flujo eléctrico en el Sistema Internacional de unidades son Newton por metros cuadrados por Coulombs.

$$[Nm^2/C]$$

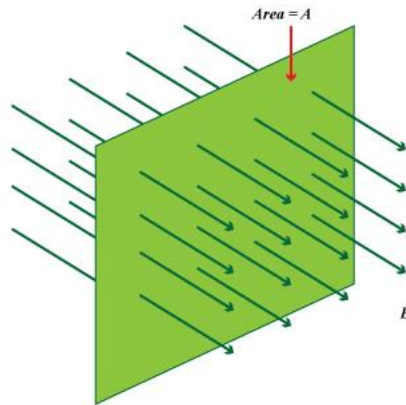


Fig. 20 Se ilustra el flujo eléctrico a través de una superficie de área A.

Si la superficie no es perpendicular al campo eléctrico, la superficie a considerar sería la proyección de la superficie a un plano orientado perpendicularmente al campo eléctrico.

$$\Phi_E = EA \cos \theta$$

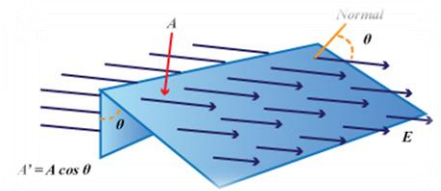


Fig. 21 Flujo eléctrico a través de una superficie de área A no perpendicular al flujo

Si el campo eléctrico es variable sobre una superficie, entonces, para evitar cambios en la variación del campo, consideramos un elemento de área infinitesimal, en ese caso, el flujo es:

$$\Delta \Phi_i = E_i \Delta A_i \cos \theta_i$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

De acuerdo a la definición del producto punto o producto escalar, la expresión anterior puede escribirse como:

$$\Delta\Phi_i = \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i$$

Al sumar la contribución de todos los componentes obtenemos el flujo a través de la superficie:

$$\Delta\Phi_i = \sum_i \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i$$

El flujo total lo obtenemos al aproximar cada elemento de área a cero:

$$\Phi_E = \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \sum_i \vec{E}_i \cdot \Delta\vec{A}_i$$

Con lo que obtenemos la definición general de flujo eléctrico:

$$\Phi_E = \int_{\text{Superficie}} \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

Una de las leyes del electromagnetismo desarrollada por Maxwell es la Ley de Gauss, la cual relaciona el flujo del campo eléctrico con la carga eléctrica que lo produce. Así, la Ley de Gauss establece que el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es proporcional a la carga eléctrica total encerrada

por la superficie dividida por ϵ_0 $\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

La ley de Gauss es válida para cualquier distribución de cargas y para cualquier superficie cerrada. Puede ser usada de dos formas: si conocemos la distribución de cargas y si tiene suficiente simetría para evaluar la integral, se puede encontrar el campo. Si conocemos el campo, podemos usar la Ley de Gauss para encontrar la distribución de cargas.

Cálculo del campo eléctrico debido a una carga puntual

Para calcular el campo eléctrico por el método de la Ley de Gauss, establecemos una superficie esférica *gaussiana* alrededor de una carga puntual $+q$, como se muestra en la siguiente figura:

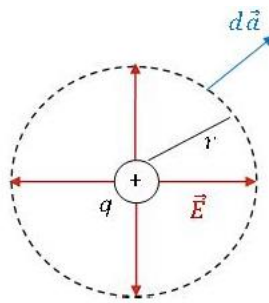


Fig. 22. Superficie gaussiana alrededor de una carga puntual $+q$

El flujo a través de la esfera:

$$\begin{aligned}\Phi &= \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \\ &= q/4\pi\epsilon_0 r^2 \oint d\vec{A} = q/4\pi\epsilon_0 r^2 \oint dA \\ \Phi &= \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q/\epsilon_0\end{aligned}$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

3.2 MAGNETISMO

Como se expuso en el tema anterior, la Ley de Coulomb expresa que la fuerza entre dos partículas cargadas depende de la magnitud de la carga sobre cada una de su distancia de separación, sin embargo, existe una excepción, y esta existe si y solo si las cargas están en movimiento una con respecto a la otra, ya que la fuerza entre cargas eléctricas depende también del movimiento de las mismas.

Además de la fuerza eléctrica, hay una fuerza generada por el movimiento de las cargas, y se denomina **fuerza magnética**. En realidad, tanto las fuerzas eléctricas con las fuerzas magnéticas son aspectos diferentes del mismo fenómeno de electromagnetismo.

3.2.1 CAMPO MAGNÉTICO

Cuando una carga eléctrica está en movimiento, la alteración del espacio debido al movimiento de la carga produce el campo magnético. Al igual que el campo eléctrico, el campo magnético es un almacén de energía. Cuando mayor sea el movimiento de la carga, mayor será la magnitud del campo magnético que rodea a la carga.

Usamos el símbolo $\vec{B}$ para representar al campo magnético y en el sistema internacional de unidades la unidad derivada es el Tesla (T) para el campo magnético.

$$1\text{ T} = 1\text{ Ns/C}$$

Es una unidad comúnmente usada para el campo eléctrico es el Gauss (G). Esta unidad, que no pertenece al sistema internacional de unidades, se relaciona con el Tesla de la siguiente manera:



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$$

Dentro de un campo magnético lo único que podemos medir es la fuerza que se ejerce sobre una partícula cargada de prueba en movimiento. De forma experimental se encuentra que la magnitud de la fuerza que se ejerce sobre la partícula es proporcional al campo magnético, a la carga y a la velocidad de la partícula, la dirección de la fuerza depende de la dirección del campo magnético de acuerdo a la siguiente expresión, que se conoce, por razones históricas, como la fuerza de Lorentz:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

Donde $\vec{v}$ es la velocidad de la partícula.

- Partícula en un campo magnético constante con $E=0$

La fuerza magnética sobre una partícula cargada q moviéndose con velocidad $\vec{v}$ es:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Donde $\vec{B}$ es el campo magnético. De acuerdo con esta expresión, la fuerza magnética $\vec{F}$ es perpendicular a la velocidad $\vec{v}$ de la partícula y al campo magnético $\vec{B}$. Debido a esto, ningún trabajo se realiza sobre la partícula por el campo magnético. Entonces, por sí mismo, un campo magnético no puede cambiar la magnitud de la velocidad de la partícula, pero si puede cambiar su dirección.

Si la magnitud del campo eléctrico es constante la magnitud de la fuerza que se ejerce sobre la partícula es también constante y tiene el valor de:



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

$$F = qv\text{sen}(\theta)$$

Donde $v = |\vec{v}|$, $B = |\vec{B}|$ y θ es el ángulo entre $\vec{v}$ y $\vec{B}$. Si la velocidad inicial de la partícula es perpendicular a la partícula, entonces:

$$\text{sen}(\theta) = 1$$

Y la fuerza es:

$$F = qvB$$

La partícula se mueve en un círculo con la fuerza magnética dirigida hacia el centro del círculo. Esta fuerza dividida por la masa de la partícula debe ser igual a la aceleración centrípeta de la partícula.

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{F}{m}$$

Donde R es el radio del círculo. Si despejamos R y sustituimos el valor de F , tenemos:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

La frecuencia angular sería:

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m}$$

En esta frecuencia es una constante independiente del radio de la órbita de la partícula o de su velocidad y se le llama frecuencia de ciclotrón.

Si la velocidad inicial no es perpendicular al campo magnético, entonces la partícula aún tiene una componente circular del movimiento en el plano normal al campo, que también se dirige a velocidad constante en la dirección del campo. El resultado neto es un movimiento en espiral en la dirección del campo magnético.

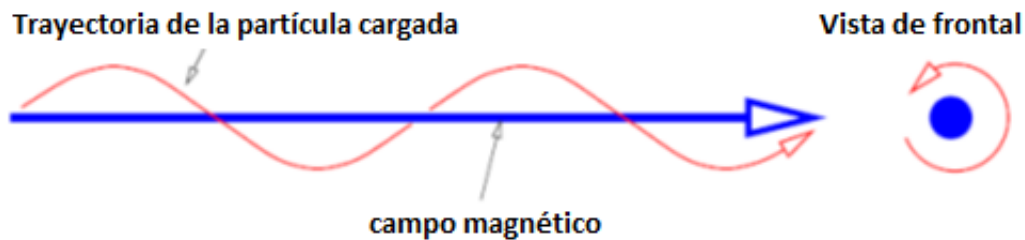


Fig.23. Movimiento en espiral de una partícula cargada en la dirección del campo magnético. El movimiento se compone de un movimiento circular alrededor del vector del campo más un movimiento de traslación a lo largo del campo.

El radio del círculo es:

$$R = \frac{mv_p}{qB}$$

Donde v_p es la componente del vector $\vec{v}$ perpendicular al campo magnético.

Si tenemos un campo magnético y eléctrico perpendiculares, entonces es posible que una partícula cargada se mueva de tal forma que las fuerzas eléctricas y magnéticas se cancelen mutuamente.

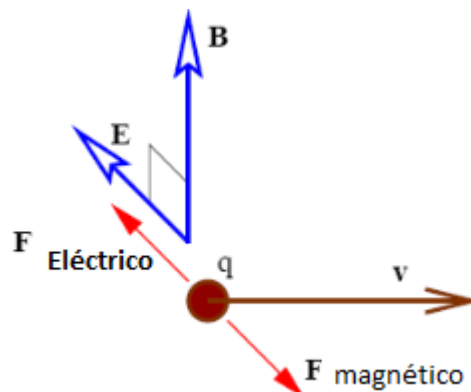


Fig.24. En un campo eléctrico y magnético mutuamente perpendiculares una partícula cargada puede moverse a velocidad constante $\vec{v}$ con magnitud igual a $v = \frac{E}{B}$, y dirección perpendicular a ambos campos.



Para que esto suceda, de acuerdo a la ecuación de la fuerza de Lorentz, la condición sería:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = 0$$

Lo que implica que $\vec{v}$ tendría que ser perpendicular al campo magnético y eléctrico, y tener una magnitud igual a :

$$v = \frac{E}{B}$$

3.2.2 LEY DE AMPERE

La Ley de Ampere menciona que cualquier configuración de corrientes continuas crea campos magnéticos y se expresa de la siguiente manera:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

Esta expresión es válida sólo si los campos eléctricos son constantes. Para el caso de campos eléctricos que varían en el tiempo, Maxwell generalizó la Ley de Ampere incluyendo un término que llamo corriente de desplazamiento, I_d ,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 I_d$$

En donde $I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$, por lo tanto,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Esta relación nos describe el hecho que los campos magnéticos son producidos por corrientes eléctricas y por cambios en los campos eléctricos.

Veamos un ejemplo de aplicación de la ley al encontrar el campo magnético de un solenoide.

Campo magnético en un solenoide

Un solenoide es una espira en forma de hélice. Con esa configuración es posible mantener un campo magnético uniforme en la parte interior de la espira cuando pasa una corriente eléctrica a través del alambre. Cuando las espiras están muy unidas, cada una de ellas puede ser tratada como una espira circular y el campo magnético total sería la suma vectorial de cada uno de los campos debido a cada espira.

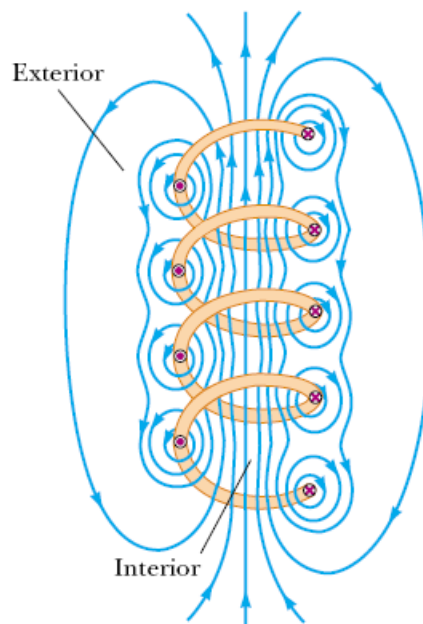


Figura 25. Se muestra el campo magnético en un solenoide a través del cual pasa una corriente eléctrica.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Las líneas de campo en el interior son casi paralelas y muy cercanas una de otra lo que indica que el campo magnético es fuerte. Uno de los extremos se comporta como si fuera el polo norte magnético y el otro como si fuera el polo sur. El solenoide ideal se caracteriza por tener las espiras muy juntas con una longitud mucho mayor al radio de las espiras.

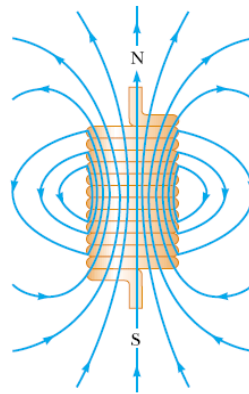


Figura 26. Se muestran las líneas de campo de un solenoide ideal.

Usemos la expresión de la Ley de Ampere para obtener una expresión cuantitativa del campo magnético en el interior del solenoide.

El campo magnético $\vec{B}$ en el interior es uniforme y paralelo al eje, y las líneas de campo magnético en el exterior forma círculos alrededor del solenoide.

Consideremos la trayectoria de longitud l y ancho w .

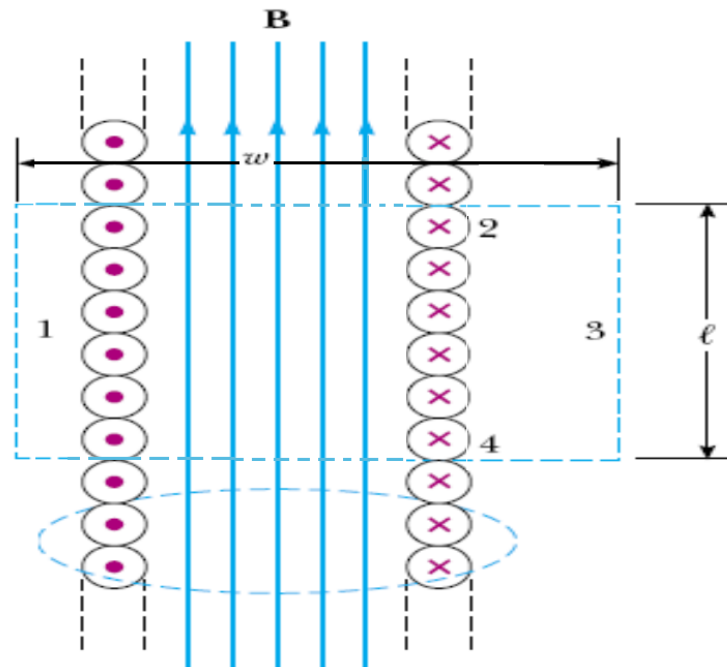


Figura 27. Trayectoria que se evalúa para calcular el campo magnético de un solenoide ideal.

Al aplicar la Ley de Ampere a esta trayectoria, evaluamos:

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$

Sobre cada lado de la trayectoria

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \int_{\text{Trayectoria 1}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} + \int_{\text{Trayectoria 2}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} + \int_{\text{Trayectoria 3}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} + \int_{\text{Trayectoria 4}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$

La contribución en la trayectoria 1, 2 y 3 son cero porque el campo magnético es perpendicular a la trayectoria. Entonces, la única contribución es del lado 1, porque el campo magnético es uniforme y paralelo a la trayectoria. Por consiguiente

$$\int_{\text{Trayectoria 1}} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = Bl$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Considerando el número de espiras circulares N , presentes en la longitud l del solenoide, la corriente total a través del rectángulo sería NI . Entonces, tenemos

$$\oint B ds = BL = \mu_0 NI$$

Despejando, obtenemos el campo magnético en esa trayectoria:

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I$$

Si definimos el número de vueltas por unidad de longitud como $n = \frac{N}{l}$, reescribimos el campo magnético dentro de un solenoide ideal como:

$$B = \mu_0 n I$$

3.2.3 LEY DE OHM

Cuando hay un flujo de cargas eléctricas en movimiento que pasan a través de una superficie de material de área A en cierto intervalo de tiempo se denomina corriente eléctrica. Podemos observar una ilustración de esto en la imagen.

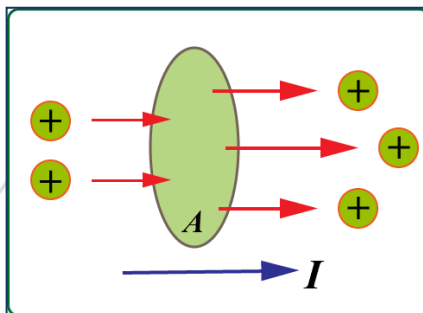


Figura 28. La corriente eléctrica es el flujo de portadores de carga a través de una superficie de área A .



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Para hacer un flujo de corriente, es necesario empujar a las cargas, ¿qué tan rápido se mueven? esto depende de la naturaleza del material. Para la mayoría de las sustancias, la densidad de corriente J es proporcional a la fuerza por unidad de carga f :

$$J = \sigma f$$

El factor de proporcionalidad σ es una constante empírica que varía de un material a otro; se llama la **conductividad² del medio**. En realidad, los manuales generalmente llaman a su recíproco, **resistividad³**:

$$\rho = 1/\sigma.$$

En principio, la fuerza que impulsa a las cargas es electromagnética por lo que:

$$J = \sigma (E + v \times B)$$

Normalmente, la velocidad de las cargas es suficientemente pequeño que el segundo término puede ser ignorado.

$$J = \sigma E$$

A esta relación se le llama Ley de Ohm y a los materiales que siguen este comportamiento se les conocen como **óhmicos**.

Otra forma de expresar la ley de Ohm es definiendo el término de resistencia de un conductor. La resistencia es la relación de la diferencia de voltaje en el conductor entre la corriente

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

² Capacidad de un cuerpo o medio para conducir la corriente eléctrica.

³ Grado de dificultad que encuentran los electrones a su desplazamiento.

UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Modelo microscópico de la corriente eléctrica en materiales conductores

Veamos uno de los modelos que describe el paso de la corriente eléctrica en materiales conductores. Tomemos una sección de un conductor de largo Δx y de área transversal A , el volumen de esta sección del conductor sería $A\Delta x$.

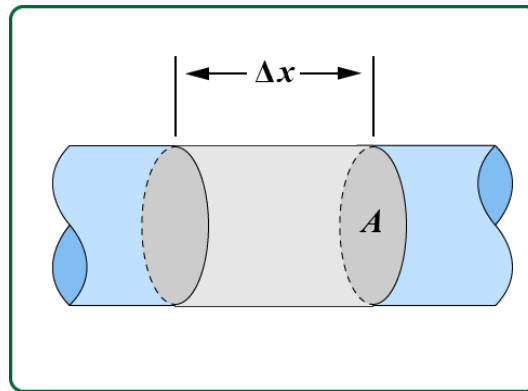
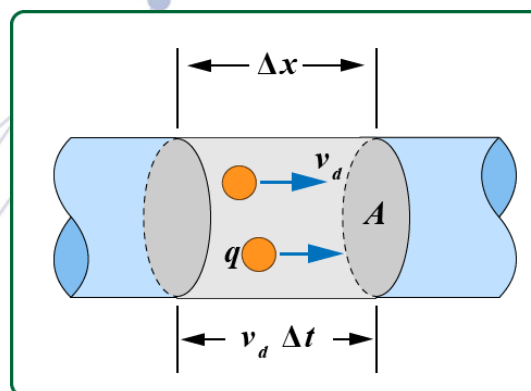


Fig. 29. Se muestra una sección de un conductor

Ahora, sea n el número de portadores de carga por unidad de volumen, entonces, el número total de portadores de carga en ese volumen es $nA\Delta x$. La carga total, ΔQ , sería la carga de cada portador, q , por el número total de portadores.

$$\Delta Q = q(nA\Delta x)$$

Podemos observar en la figura que los portadores de carga entran a esta sección del conductor con una rapidez v_d , el desplazamiento que experimentan sería igual a la longitud de la sección del conductor, Δx .





UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Fig. 30. Se muestra el paso de los portadores de carga en una sección del conductor.

Supongamos que toma a los portadores de carga hacer tal recorrido en un intervalo de tiempo Δt , entonces, la carga total se puede reescribir como $\Delta Q = q(nAv_d\Delta t)$ y la corriente promedio sería la carga total que se desplaza a través de la sección del conductor en el intervalo de tiempo Δt ,

$$I_{prom} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{q(nAv_d\Delta t)}{\Delta t} = q(nAv_d)$$

A la rapidez v_d , se le llama rapidez de arrastre e indica la rapidez promedio con que se desplaza el portador de carga en el conductor.

La conducción eléctrica en materiales conductores fue modelada en 1900 por el físico alemán Paul Drude. Una de las suposiciones importantes es que en un conductor existen electrones libres que son los responsables de la conducción, las colisiones entre ellos son independientes del movimiento de los electrones antes de la colisión y que la energía que ganan los electrones se pierde al chocar contra los átomos del conductor. Estos choques contra los átomos del conductor se observan por el calentamiento que sufre este durante el paso de la corriente.

De este modelo se obtiene el siguiente valor para la velocidad de arrastre de los electrones:

$$\vec{v}_d = \frac{q\vec{E}}{m_e}\tau$$

Donde τ es el tiempo entre colisiones sucesivas de electrones, m_e es la masa del electrón, q la carga y $\vec{E}$ el campo eléctrico al que se encuentra sujeto el electrón.

La magnitud de la corriente eléctrica sería:

$$I = \frac{q^2 E}{m_e} \tau$$



La ley de Ohm indica que la densidad de corriente es proporcional al campo eléctrico, cuya constante de proporcionalidad es la conductividad σ del conductor.

$$J = \sigma E$$

De acuerdo con esto, el modelo nos indica que la conductividad, que es el recíproco de la resistividad, es

$$\sigma = \frac{q^2 \tau}{m_e}$$

Y la resistividad

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{m_e}{q^2 \tau}$$

Podemos observar que, de acuerdo al modelo, la conductividad y la resistividad son independientes del campo eléctrico.

Potencia

Para cuantificar la forma en que se disipa la energía al paso de la corriente, es necesario definir un concepto similar al que usamos en mecánica clásica, el concepto de potencia. Observemos el siguiente circuito:

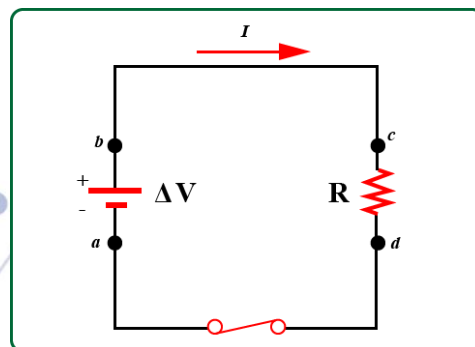


Fig.31. Circuito con una resistencia y una batería



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Este circuito se compone de una batería que aplica una diferencia de potencial ΔV al circuito, una resistencia R , por donde circula una corriente I . Esta resistencia en la práctica puede ser una lámpara, un calentador o un aparato eléctrico.

Si consideramos que los alambres que forman el circuito no presentan ninguna resistencia al movimiento de los portadores de carga, la energía que la batería entrega al circuito la entrega directamente a la resistencia, la rapidez con que se entrega energía al elemento le llamamos potencia P , y $P = I\Delta V$

Como la diferencia de potencial $\Delta V = IR$ entonces la potencia se puede expresar como:

$$P = I^2 R = \frac{\Delta V^2}{I}$$

Fuerzas sobre corrientes en conductores

Ahora veamos la forma de medir la fuerza que se ejerce sobre un conductor por el que pasan cargas en movimiento y se encuentra en un campo magnético. En muchas aplicaciones prácticas del electromagnetismo, las cargas en movimiento pasan a través de un conductor como el cobre. Recordemos que un conductor es un material en el cual las partículas cargadas se pueden mover libremente. En un aislante, las partículas cargadas se encuentran fijas en un lugar. Los conductores prácticos normalmente tienen un aislante que rodea para confinar el movimiento de las partículas en trayectoria particulares.

Si el conductor es de la forma de un alambre, podemos calcular la fuerza magnética sobre el alambre si sabemos el número de partículas móviles (N) por unidad de longitud del alambre, la carga de cada partícula q , y la velocidad de las



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

partículas que se mueven a través del alambre $\vec{v}$. La fuerza total sobre un segmento de alambre de longitud L es:

$$\vec{F} = qNL\vec{v} \times \vec{B}$$

Si $\hat{n}$ es el vector unitario en la dirección de $\vec{v}$, entonces:

$$\vec{F} = qNLv\hat{n} \times \vec{B}$$

Como la cantidad qNv es la corriente en el alambre, entonces:

$$\vec{F} = iL\hat{n} \times \vec{B}$$

Expresión que indica el valor de la fuerza sobre un alambre por el que pasa una corriente eléctrica i en un campo magnético $\vec{B}$.

Torque en un Dipolo Magnético y Motores Eléctricos

Revisemos ahora el torque que se ejerce sobre una espira por el que circula una corriente eléctrica y se encuentra dentro de un campo magnético. En la siguiente figura se muestra una espira montada sobre un eje dentro de un campo magnético. Por la espiral circula una corriente eléctrica i .

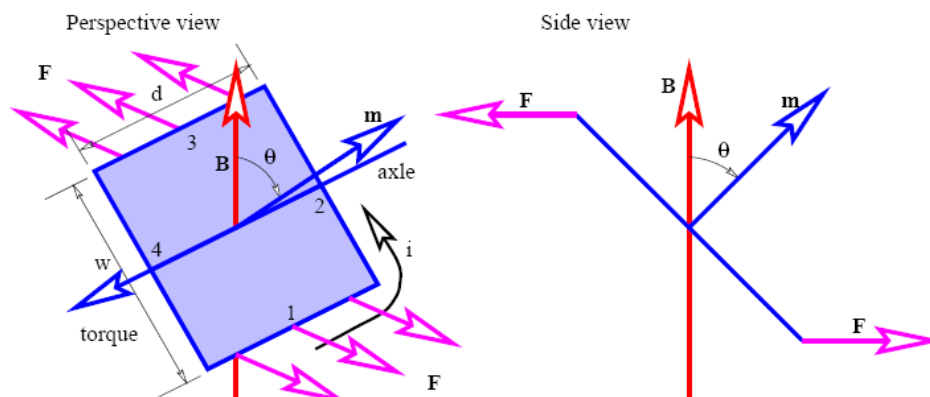


Fig.32 Se muestra una espira montada sobre un eje dentro de un campo magnético. Las fuerzas sobre las corrientes en los segmentos 1 y 3 de la espira generan una torca alrededor del eje.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

La corriente en los segmentos de la espira 2 y 4 experimentan una fuerza paralela al eje. Estas fuerzas no generan un torque neto. Sin embargo, las fuerzas magnéticas sobre los segmentos de la espira 1 y 3 tiene cada una a magnitud de $F = idB$, donde B es la magnitud del campo magnético. Estas fuerzas generan un torque en el sentido contrario a las manecillas del reloj igual a:

$$\tau = 2F \left(\frac{w}{2} \right) \sin(\theta) = iwdB \sin(\theta)$$

Que se puede representar en forma vectorial de la siguiente manera:

$$\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}$$

Donde $\vec{m}$ es un vector normal a la espira con magnitud igual a iwd . A este vector se le llama momento dipolar magnético.

La espira puede ser de cualquier forma no solamente rectangular. En el caso general, la magnitud del momento magnético es igual a la corriente i por el área S de la espira,

$$m = iS$$

En el ejemplo que se muestra en la figura el área es

$$S = wd$$

La dirección de $\vec{m}$ está determinada por la regla de la mano derecha, dobla tus dedos de la mano derecha alrededor de la espira en la dirección de la corriente y tu dedo pulgar apuntará en la dirección del momento magnético.

En analogía con el dipolo eléctrico en un campo eléctrico, la energía potencial del dipolo magnético en un campo magnético es:

$$U = -\vec{m} \cdot \vec{B}$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

3.2.4 LEY DE FARADAY

En este tema revisaremos el efecto producido por campos magnéticos que varían en el tiempo. Michael Faraday, al mismo tiempo y de forma independiente que Joseph Henry, mostró que se puede inducir una fuerza electromotriz en un circuito variando el campo magnético. Se puede inducir una corriente eléctrica cuando el flujo magnético a través del circuito cambia con el tiempo.

Cuando un imán se mueve hacia la espiral, el amperímetro indica que una corriente se induce sobre ella. Si el imán se acerca, la corriente inducida sobre la espiral tiene una dirección, que se muestra con la deflexión de la aguja hacia la derecha, cuando el imán se aleja, la corriente inducida tiene una dirección contraria. ¡Lo sorprendente de este fenómeno es que no se necesita una batería para generar corriente en el conductor!

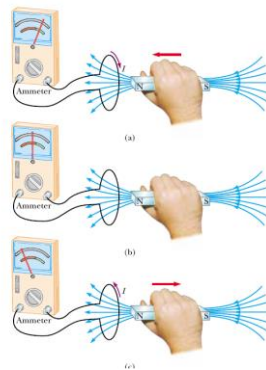


Figura 33. La mano mueve un imán hacia la espiral y el amperímetro muestra la aguja moviéndose hacia la derecha cuando el imán se acerca a la espiral, y se muestra un movimiento de la aguja hacia la izquierda cuando el imán se aleja de la espiral.

La forma de expresar esta observación empírica hecha por Michael Faraday en 1831, es:

La fuerza electromotriz inducida es directamente proporcional al cambio del flujo magnético en el tiempo a través del circuito.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

Esta expresión se conoce como Ley de Inducción de Faraday, y matemáticamente se expresa como:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Donde $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ es el flujo magnético a través del circuito. Si el circuito consiste de N espiras con área A y el flujo magnético es Φ_B , la fuerza electromotriz inducida sería igual a :

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

El signo en la expresión de la Ley de inducción de Faraday tiene un significado físico importante, indica que:

La corriente inducida en la espira está en la dirección que crea un campo magnético que se opone al cambio en el flujo magnético a través del área encerrada por la espira.

Expresión conocida como la Ley de Lenz

Ejemplo: calculemos la fuerza electromotriz inducida sobre una espira de área A que se encuentra en un campo magnético $\vec{B}$. Las líneas del flujo magnético forman un ángulo θ con la superficie de la espira. Por lo que tenemos que la fuerza electromotriz inducida sería:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} B A \cos\theta$$

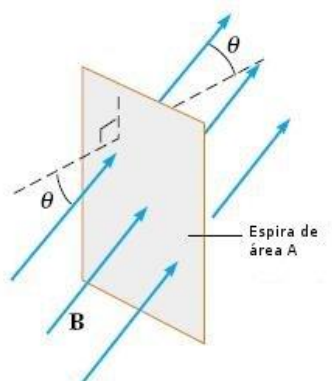


Figura 34. Se muestran la línea de flujo del campo magnético que pasan a través de una superficie de área A

3.3 CIRCUITOS

En este tema se analizan los circuitos eléctricos simples. Estos circuitos contienen uno, dos o tres elementos básicos: resistencias, condensadores e inductores, se pueden combinar en serie o en paralelo. Las resistencias o también llamados resistores, pueden ser las resistencias internas de los elementos de los circuitos reales, como batería, alambres, aparatos eléctricos. Las combinaciones más complejas de estos elementos pueden ser analizado usando una herramienta conocida como Leyes de Kirchhoff, que son consecuencia de la ley de la conservación de la energía y la ley de conservación de la carga eléctrica.

Las corrientes que pasan por los circuitos analizados son constantes en magnitud y dirección, a esto le llamamos corriente directa, que es una corriente con dirección constante. Modelarás al final del tema un circuito RLC que te permitirá conocer, de manera integral, el funcionamiento de dispositivos eléctricos con aplicaciones importantes en la vida diaria.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

3.3.1 RESISTORES

Un circuito simple está constituido de una batería y un resistor, la batería aplica una diferencia de potencial lo cual produce que las cargas se muevan. La diferencia de potencial es constante lo que produce una corriente constante en magnitud y dirección, a esto se le llama corriente directa. A la fuente se le conoce como **Fuente de Fuerza Electromotriz, FEM**. La FEM es el voltaje máximo que puede producirse entre las terminales del circuito, se asume que los alambres que unen al circuito no tienen resistencia.

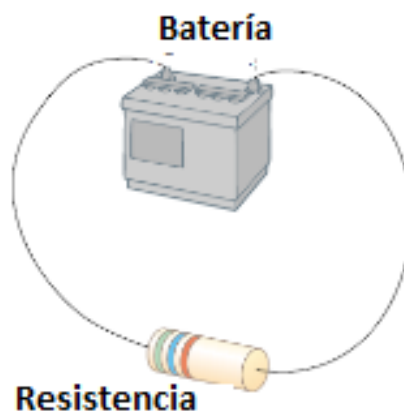


Figura 35. Circuito compuesto de una batería y una resistencia

La terminal positiva de la batería se encuentra a un potencial más alto que la terminal negativa. Dentro de la batería existe cierta resistencia al flujo de la corriente, a esta resistencia se le conoce como resistencia interna de la batería, r . Podemos considerar este circuito como se muestra en la siguiente figura:

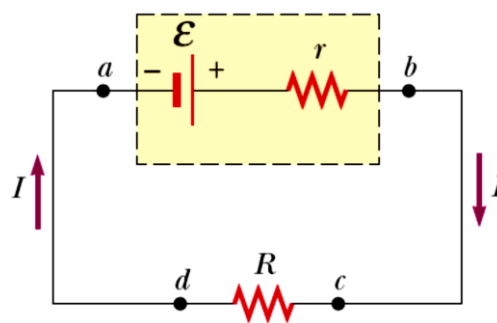


Figura 36. Se muestra la resistencia interna de la batería



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

La batería tiene una resistencia interna, por lo cual, el voltaje en las terminales no es el mismo que la FEM. El voltaje en las terminales de la batería es:

$$\Delta V = V_b - V_a = \varepsilon - Ir$$

En donde I es la corriente que pasa por el circuito y ε es la FEM de la batería. Entonces, en una batería o pila de 1.5 V, el valor corresponde a la FEM y la diferencia de potencial real depende de la corriente que pasa por la batería. Al revisar la figura anterior, el voltaje en las terminales de la batería debe ser igual al voltaje en la resistencia R , también llamada resistencia de carga. El voltaje en la resistencia sería:

$$\Delta V = IR$$

Y como la FEM de la batería es:

$$\varepsilon = \Delta V + Ir$$

Entonces tenemos:

$$\varepsilon = IR + Ir$$

Despejando la corriente I ,

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

La corriente depende de la resistencia interna de la batería y de la resistencia externa. Si la resistencia de carga es mucho mayor que la resistencia interna, se puede despreciar el valor de r .

Al escribir la relación anterior en términos de la potencia, tenemos:

$$I\varepsilon = I^2R + I^2r$$

Como $\wp = I\Delta V = I^2R$, obtenemos

$$\wp = \wp_c + \wp_i$$

3.3.2 CAPACITORES

En este subtema estudiamos el condensador, un dispositivo que se encuentra presente en la mayoría de los circuitos eléctricos, además de los resistores ya estudiados. El condensador es un dispositivo electrónico que sirve para almacenar energía. El más sencillo de todos es el condensador de placas paralelas.

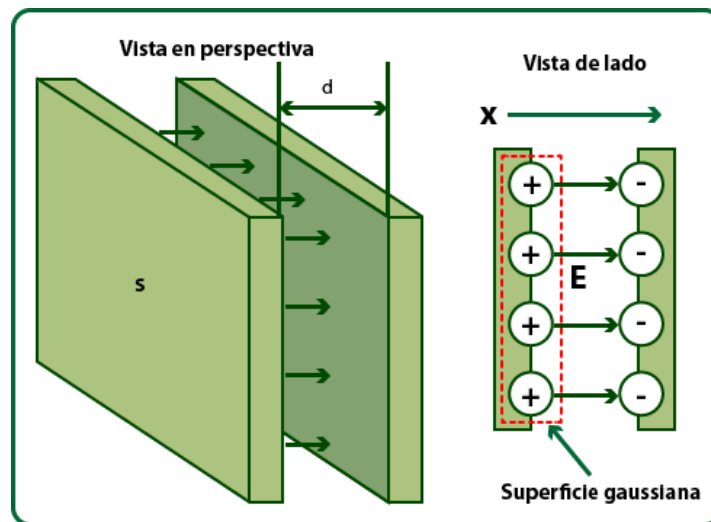


Figura 37. Condensador de placas paralelas

Un condensador de placas paralelas consiste de dos placas conductoras de área S separadas por una distancia d . La carga positiva q se encuentra en una de las placas, mientras la carga negativa $-q$ se encuentra en otra de las placas. El campo eléctrico entre las placas es $E = \sigma/\epsilon_0$, donde la carga por unidad de área dentro de la placa izquierda es $\sigma = q/S$. La densidad en la placa derecha es $-\sigma$. Toda la carga se encuentra dentro de las superficies, de esta manera contribuye al campo eléctrico que cruza el espacio entre ambas placas.

La expresión para el campo eléctrico se obtiene al aplicar la Ley de Gauss a la hoja cargada en la placa positiva. El factor $\frac{1}{2}$ presente en la ecuación para una hoja cargada aislada está ausente aquí debido a que todo el flujo eléctrico sale de la



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

superficie gaussiana en el lado derecho, el lado izquierdo de la superficie gaussiana está dentro del conductor donde el campo eléctrico es cero, al menos en una situación estática. En este caso el campo eléctrico se relaciona con el potencial eléctrico escalar. De la expresión:

Integramos a través del espacio de las placas conductoras para encontrar la diferencia de potencial entre las placas, y como E es constante, tenemos:

$$\Delta V = Ed = qd/(\epsilon_0 S)$$

Observamos que la relación indica que el potencial eléctrico es proporcional a la carga, y la constante de proporcionalidad en este caso es $d/(\epsilon_0 S)$, el inverso de esta constante se le llama capacitancia,

$$C = (\epsilon_0 S)/d$$

La expresión nos da la capacitancia para un condensador de placas paralelas. La relación anterior representa la cantidad de carga que el condensador de placas paralelas puede almacenar por unidad de diferencia de potencial entre las placas. El signo positivo corresponde a la placa que se encuentra al más alto potencial, el que contiene la carga positiva. Los condensadores tienen diferentes formas geométricas, por lo que la relación anterior puede cambiar para cada condensador. La relación entre la diferencia de potencial, la carga y la capacitancia es

$$C = \frac{q}{\Delta V}$$

Relación que es válida para todo tipo de condensador.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

3.3.3 LEYES DE KIRCHHOFF

Los circuitos pueden ser analizados con la relación conocida como la Ley de Ohm, $\Delta V = IR$ y la relación de resistencia equivalente en serie o en paralelo. Sin embargo, circuitos más complicados no pueden ser tan fácilmente reducidos a una simple espiral.

Para estos casos es necesario usar dos principios conocidos como Reglas de Kirchhoff:

Regla de las corrientes: las corrientes se conservan, la suma de las corrientes que entran un nodo deben ser las mismas que abandonen dicho nodo, es decir, las cargas no se almacenan en ningún punto del circuito, la carga se conserva, tenemos que:

$$\sum I_{\text{entran}} = \sum I_{\text{salen}}$$

Regla de la malla. La suma de la diferencia de potencial a lo largo de todos los elementos de una malla en circuito cerrado debe ser cero:

$$\sum_{\text{malla cerrada}} \Delta V = 0$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

3.3.4 CIRCUITO RC

Un circuito con una resistencia y un condensador se le conoce como circuito RC. En un circuito de corriente directa la corriente siempre va en la misma dirección. No existe corriente si el switch está abierto. Si el switch se cierra, inicia una corriente en el circuito y el condensador comienza a cargarse.

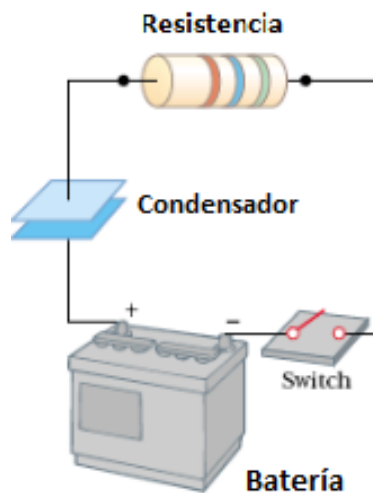


Figura 38. Circuito con una resistencia y un condensador.

Mientras el condensador se carga, existe una corriente en el circuito debido al campo eléctrico que se establece entre los alambres por la batería, hasta que el condensador se carga completamente, en ese momento deja de circular carga y la corriente es cero.

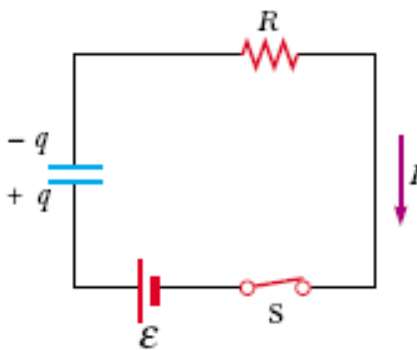


Figura 39. Circuito que muestra la carga del condensador



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

De manera cuantitativa, analicemos el circuito de acuerdo con la regla de las mallas de Kirchhoff. Consideremos el análisis siguiendo la malla en el sentido contrario a las manecillas del reloj, obtenemos:

$$\mathcal{E} - \frac{q}{C} - IR = 0$$

Donde $\frac{q}{C}$ es la diferencia de potencial a través del condensador y IR es la diferencia de potencial a través de la resistencia. Los signos son positivos si existe un aumento en la diferencia de potencial y negativo cuando hay una caída de potencial. La corriente inicial en el circuito es cuando el switch se cierra y la carga en el condensador es cero, entonces: $I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$

Cuando el condensador está a su máxima carga, las cargas dejan de fluir, la corriente en el circuito es cero y la diferencia de potencial de la batería está aparece en el condensador. Entonces tenemos para $I = 0$, la carga en el condensador:

$$Q = C\mathcal{E}$$

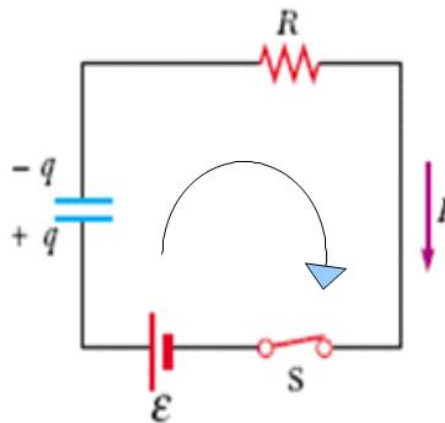


Figura 40. Análisis del circuito usando la regla de las mallas de Kirchhoff.



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

La dependencia de la carga y la corriente se obtiene al resolver la ecuación

$$\varepsilon\varepsilon - \frac{q}{c} - IR = 0$$

En este caso, como $I = \frac{dq}{dt}$,

$$\frac{dq}{dt} = \frac{c\varepsilon}{RC} - \frac{q}{RC}$$

Por la tanto,

$$\frac{dq}{q - c\varepsilon} = -\frac{1}{RC} dt$$

Al integrar la expresión para q $q = 0$ y $t = 0$ obtenemos,

$$q(t) = C\varepsilon \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = Q(1 - e^{-t/RC})$$

Donde e es la base de los logaritmos naturales.

Si diferenciamos la ecuación anterior, tenemos una expresión para la corriente

$$I(t) = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$



UNIDAD 3. ELECTROMAGNETISMO

CIERRE DE UNIDAD

¡Felicidades! Concluiste la revisión del material de lectura de esta Unidad Didáctica. Los conocimientos que adquiriste en los materiales revisados te ayudarán a reconocer propiedades físicas importantes en los materiales que usaras como profesional en Logística y transporte, además de identificar algunas reacciones físicas en materiales tanto de uso cotidiano como aquellos que deberás manejar en tu profesión como Técnico Superior Universitario o bien, como Ingeniero.

Esta unidad te mostró las teorías, fórmulas y leyes que se asocian con el estudio del electromagnetismo, incluidos los resistores, condensadores y circuitos. Si bien estos fenómenos de la física son fáciles de encontrar en la vida cotidiana, no es sencillo asimilar cómo funcionan, el texto que acabas de revisar te ayudará a entender de manera clara cómo es que funcionan tanto las fuerzas eléctricas como magnéticas.

Tus conocimientos se ampliarán en la Unidad Didáctica “Físicoquímica de materiales”, de esta manera ampliarás el panorama asociado a las propiedades y los fenómenos de la materia, que es básico en tu formación disciplinar como profesional en Logística y transporte.



FUENTES DE CONSULTA

- Robert A. Morse. (2005). "Conceptualizing ideal circuit elements in the AP Physics C syllabus" .*The Physics Teacher* .43 (8), pages 540-543
- Yaakov Kraftmakher. (2011). "Demonstrations with an LCR Circuit," *The Physics Teacher*, 49(3) pages 168-170
- Gettys, W. E., Keller, F. J. & Skove, M. J. (2005). *Física para Ciencias e Ingeniería*. Madrid: McGraw-Hill.
- Halliday, D., Resnick, R. & Walker, J. (2001). *Fundamentos de Física*. México: CECSA.
- Hewitt, P. G. (2009). *Física conceptual*. México: Perason Educación Addison Wesley Longman.
- M. Alonso & E. J. Finn. (2008) *Física*. España: Pearson.
- Resnick, R., Halliday, D. & Krane, K. S. (2002). *Física*. México: CECSA.
- Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D. & Freedman, R. A. (2004). *Física universitaria*. México: Pearson Addison-Wesley.
- Tipler, P. A. & Mosca, G. (2005). *Física para la ciencia y la tecnología*. Barcelona: Editorial Reverté.