



# **APUNTES ELECTRÓNICOS DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO**

**2016**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ARQUITECTURA Y  
DISEÑO  
CARRETERA TRANSPENINSULAR ENSENADA-  
TIJUANA  
NUMERO 3917, COLONIA PLAYITAS**

**Ensenada, B.C., C.P. 22860. Teléfono 646-1750744, Fax  
646-1744333**

**E-mail: [Jorge.mata@uabc.edu.mx](mailto:Jorge.mata@uabc.edu.mx)**

# CONTENIDO

## 1.- ELECTROSTÁTICA Y LA LEY DE COULOMB

- 1.1.- Carga y fuerza eléctrica
  - 1.1.1.- Carga eléctrica y sus propiedades
  - 1.1.2.- Conductores y aisladores
  - 1.1.3.- Ley de Coulomb, (caso de 3 cargas)
- 1.2.- Campo eléctrico
  - 1.2.1.- Concepto de campo eléctrico
  - 1.2.2.- Cálculo del campo debido a cargas puntuales
  - 1.2.3.- Concepto de cálculo del campo debido a distribuciones continuas
  - 1.2.4.- Dipolos dentro de un campo eléctrico
- 1.3.- Ley de Gauss
  - 1.3.1.- Flujo eléctrico
  - 1.3.2.- Ley de Gauss
  - 1.3.3.- Concepto de cálculo del campo utilizando Ley de Gauss en aislantes
  - 1.3.4.- Concepto de cálculo del campo utilizando Ley de Gauss en conductores aislados

## 2.- POTENCIAL ELÉCTRICO Y CAPACITORES

- 2.1.- Potencial eléctrico y energía potencial eléctrica
  - 2.1.1.- Concepto de diferencia de potencial y de energía potencial eléctrica
  - 2.1.2.- Deducción del potencial
  - 2.1.3.- Potencial eléctrico debido a cargas puntuales
  - 2.1.4.- Cálculo de energía potencial debido a cargas puntuales
  - 2.1.5.- Superficies equipotenciales
  - 2.1.6.- Concepto de potencial debido a distribuciones continuas de carga
- 2.2.- Capacitores
  - 2.2.1.- Concepto de capacitor y capacitancia
  - 2.2.2.- Cálculo de la capacitancia en capacitores
  - 2.2.3.- Arreglo de capacitores
    - 2.2.3.1.- Serie
    - 2.2.3.2.- Paralelo
    - 2.2.3.3.- Mixto
  - 2.2.4.- Capacitores con dieléctrico diferente al vacío
  - 2.2.5.- Almacenamiento de energía en un capacitor

## 3.- PRINCIPIOS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

- 3.1.- Fuentes de Fuerza Electromotriz
    - 3.1.1.- Fuentes de corriente directa
    - 3.1.2.- Fuente de corriente variable
  - 3.2.- Corriente Eléctrica
    - 3.2.1.- Concepto de corriente eléctrica
    - 3.2.2.- Densidad de corriente eléctrica
  - 3.3.- Resistividad y resistencia
    - 3.3.1.- Cálculo de la resistividad dependiente del medio
    - 3.3.2.- Cálculo de la resistencia dependiente de la temperatura
    - 3.3.3.- Bases microscópicas de la conducción en sólidos
    - 3.3.4.- Código de colores
  - 3.4.- Arreglo de resistencias
    - 3.4.1.- Serie
    - 3.4.2.- Paralelo
    - 3.4.3.- Mixto
  - 3.5.- Ley de Ohm
    - 3.5.1.- Materiales óhmicos y no-óhmicos
    - 3.5.2.- Potencia
  - 3.6.- Leyes de Kirchhoff
    - 3.6.1.- Ley de corrientes y voltajes
    - 3.6.2.- Análisis de nodos y mallas
- ## 4.- CAMPO MAGNÉTICO
- 4.1.- Fuerza y campo magnético
    - 4.1.1.- Fuerza de Lorentz
    - 4.1.2.- Magnetismo en materiales
  - 4.2.- Ley de Ampere
    - 4.2.1.- Ley de Ampere
    - 4.2.2.- Campo magnético debido a un alambre con corriente
  - 4.3.- Ley de Biot-Savart
    - 4.3.2.- Cálculo de algunos campos utilizando la ley de Biot-Savart
  - 4.4.- Inducción Magnética
    - 4.4.1.- Ley de Faraday
    - 4.4.2.- Ley de Lenz
    - 4.4.3.- FEM de Movimiento
    - 4.4.4.- Auto inductancia
    - 4.4.5.- Energía en un campo Magnético
  - 4.5.- Introducción a la teoría electromagnética
    - 4.5.1.- Espectro electromagnético
    - 4.5.2.- Ecuaciones de Maxwell

## **CARGA Y FUERZA ELÉCTRICA.**

### **I.- ELECTROSTÁTICA Y LA LEY DE COULOMB**

#### **Carga y fuerza eléctrica**

##### **Carga eléctrica y sus propiedades**

Benjamín Franklin (1706-1790) a través de experimentos se encontró que hay dos tipos de cargas eléctricas y les asigno los nombres de positiva y negativa

La carga eléctrica siempre se conserva, cuando un cuerpo se frota con otro, no se recrea carga en el proceso, la electrificación se debe a una transferencia de cargas de un cuerpo a otro. Un cuerpo gana carga eléctrica negativa mientras que otro gana carga eléctrica positiva. A partir de la comprensión de la estructura atómica se sabe que los electrones tienen carga eléctrica negativa y nos permite comprender que al frotar vidrio en seda los electrones son transferidos del vidrio a la seda, de igual manera al frotar caucho con piel los electrones se transfieren de la piel a la caucho, con lo cual la piel se queda con carga positiva (falta de electrones) y el caucho con carga negativa (exceso de electrones).

Propiedades de la carga eléctrica:

- La carga se conserva
- La carga esta cuantizada
- Existen dos tipos de carga en la naturaleza positivas y negativas

##### **1.1.2.- Conductores y aisladores**

Los materiales que conducen electricidad se denominan conductores. Los materiales que no conducen electricidad se denominan aislantes.

Los materiales conductores poseen una estructura electrónica que permite el movimiento libre de algunos electrones. Las cargas positivas de los átomos de algún material conductor no se mueven, puesto que residen en los núcleos pasados, algunos conductores solidos típicos

Los semiconductores son aquellos que pueden cambiar de aislante a conductor y vuelva a aislante. Los semiconductores fueron descubiertos apenas unos 50 años.

Existen dos tipos de semiconductores intrínsecos y extrínsecos. Un ejemplo de los intrínsecos que son los cristales químicamente puros. Y los extrínsecos se hacen por dopaje, que es la adicción de cantidades minúsculas de otros materiales que pueden actuar como donantes o receptores de electrones.

Una carga eléctrica es aquella propiedad de determinadas partículas subatómicas que se produce cuando se relacionan unas con otras, esta interacción es electromagnética y se hace con las cargas positivas y negativas de la partícula. Cualquier elemento considerado materia tiene un conjunto de cargas, positivas, negativas y fraccionadas (Quarks), existe un movimiento de las partículas que contiene este elemento y genera a su vez un campo electromagnético que interactúa con su entorno, lo que lo rodea también tiene electromagnetismo por lo que la interacción entre campos es constante.

La Carga Eléctrica es una unidad del Sistema Internacional de Unidades, se define como:

“La cantidad de carga que pasa por la sección transversal de un determinado conductor eléctrico durante el lapso de un segundo y cuando la corriente eléctrica es de un amperio.”

Existen dos tipos de cargas eléctricas, cargas positivas y cargas negativas, si te fijas bien, te darás cuenta que si incluyes el signo en los valores de las cargas, el valor de la fuerza eléctrica en esta expresión puede venir acompañada de un signo. Este signo será:

Positivo. Cuando la fuerza sea de repulsión (las cargas se repelen). (+ · + = + o - · - = +)

Negativo. Cuando la fuerza sea de atracción (las cargas se atraen). (+ · - = - o - · + = -)

Por tanto, si te indican que dos cargas se atraen con una fuerza de 5 N, no olvides que en realidad la fuerza es -5 N, porque las cargas se atraen. La Ley de Coulomb, se establece que las cargas iguales se repelen, las cargas diferentes se atraen. Todo depende según la afirmación del físico que escribió la ley, de la sobre o por el cuerpo cargado de electricidad.

A través de experimentos se declararon las siguientes propiedades para las cargas eléctricas:

- Conservación de la carga: En un sistema aislado, la carga total se conserva.
  - Tipos de carga: positiva o negativa, es decir, de atracción o de repulsión. Las cargas iguales tienden a repelerse mientras que las cargas contrarias se atraen.
  - Cuantización de la carga: La carga se cuantifica en proporción a la cantidad de carga elemental que es el electrón de un átomo. En el Sistema Internacional un electrón posee  $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$ .

En 1785 Coulomb publicó sus experimentos utilizando una balanza de torsión sobre la influencia de una carga que sobre otra carga puntual en lo que se denominó: Ley de Coulomb.

, Donde  $\hat{u}_r$  es el vector unitario en la dirección y sentido del vector  $\mathbf{r} - \mathbf{r}'$  y  $k$  es una constante cuyo valor es:  $k = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$ . Aunque normalmente  $k$  se expresa en función de otra constante, la permitividad eléctrica del vacío,  $\epsilon_0$ :  $k = 1/4\pi\epsilon_0$ ,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ .

Se ha calculado experimentalmente que esta ley se cumple para distancias de hasta 10-13 metros, a partir de las cuales es necesario tomar en consideración efectos cuánticos.

Teniendo en cuenta que:  $\hat{u}_r = \mathbf{r} - \mathbf{r}' / |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ , la ley de Coulomb puede escribirse como:

$$F = K \left( \frac{q_1 * q_2}{r^2} \right)$$

## I.- ELECTROSTÁTICA Y LA LEY DE COULOMB

### Carga y fuerza eléctrica

#### Carga eléctrica y sus propiedades

Benjamín Franklin (1706-1790) a través de experimentos se encontró que hay dos tipos de cargas eléctricas y les asignó los nombres de positiva y negativa

La carga eléctrica siempre se conserva, cuando un cuerpo se frota con otro, no se recrea carga en el proceso, la electrificación se debe a una transferencia de cargas de un cuerpo a otro. Un cuerpo gana carga eléctrica negativa mientras que otro gana carga eléctrica positiva. A partir de la comprensión de la estructura atómica se sabe que los electrones tienen carga eléctrica negativa y nos permite comprender que al frotar vidrio en seda los electrones son transferidos del vidrio a la seda, de igual manera al frotar caucho con piel los electrones se transfieren de la piel a la caucho, con lo cual la piel se queda con carga positiva (falta de electrones) y el caucho con carga negativa (exceso de electrones).

Propiedades de la carga eléctrica:

- La carga se conserva
- La carga está cuantizada
- Existen dos tipos de carga en la naturaleza positivas y negativas

### 1.1.2.- Conductores y aisladores

Los materiales que conducen electricidad se denominan conductores. Los materiales que no conducen electricidad se denominan aislantes.

Los materiales conductores poseen una estructura electrónica que permite el movimiento libre de algunos electrones. Las cargas positivas de los átomos de algún material conductor no se mueven, puesto que residen en los núcleos pasados, algunos conductores sólidos típicos

Los semiconductores son aquellos que pueden cambiar de aislante a conductor y vuelva a aislante. Los semiconductores fueron descubiertos apenas unos 50 años.

Existen dos tipos de semiconductores intrínsecos y extrínsecos. Un ejemplo de los intrínsecos que son los cristales químicamente puros. Y los extrínsecos se hacen por dopaje, que es la adicción de cantidades minúsculas de otros materiales que pueden actuar como donantes o receptores de electrones.

### LEY DE COULOMB

La Ley de Coulomb, es una fuerza entre dos cargas cualesquiera en reposo.

Fue descubierta por Presley en 1766, y redescubierta por Cavendish pocos años después, pero fue Coulomb en 1785 quien la sometió a ensayos experimentales directos. Entendemos por carga puntual una carga eléctrica localizada en un punto geométrico del espacio. Evidentemente, una carga puntual no existe, es una idealización, pero constituye una buena aproximación cuando estamos estudiando la interacción entre cuerpos cargados eléctricamente cuyas dimensiones son muy pequeñas en comparación con la distancia que existen entre ellos.

Los cuerpos cargados sufren una fuerza de atracción o repulsión al aproximarse.

El valor de dicha fuerza es proporcional al producto del valor de sus cargas.

La fuerza es de atracción si las cargas son de signo opuesto y de repulsión si son del mismo signo.

La fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa.

Estas conclusiones constituyen lo que se conoce hoy en día como la ley de Coulomb.

Si te fijas bien, te darás cuenta que si incluyes el signo en los valores de las cargas, el valor de la fuerza eléctrica en esta expresión puede venir acompañada de un signo. Este signo será:

positivo. cuando la fuerza sea de repulsión (las cargas se repelen). ( + · + = + o - · - = +

Negativo. Cuando la fuerza sea de atracción (las cargas se atraen). ( + · - = - o - · + = - )

Por tanto, si te indican que dos cargas se atraen con una fuerza de 5 N, no olvides que en realidad la fuerza es -5 N, porque las cargas se atraen.

- **Expresión vectorial de la fuerza eléctrica.**

La fuerza eléctrica descrita en la ley de Coulomb no deja de ser una fuerza y como tal, se trata de una magnitud vectorial que en el Sistema Internacional de Unidades se mide en Newtons (N). Su expresión en forma vectorial es la siguiente:

$$F = k \left( \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \right) \cdot \mathbf{ur}$$

Donde el nuevo valor  $\vec{u} \rightarrow r$  es un vector unitario en la dirección que une ambas cargas. Observa que si llamamos  $\vec{r} \rightarrow$  al vector que va desde la carga que ejerce la fuerza hacia la que la sufre,  $\vec{u} \rightarrow r$  es un vector que nos indica la dirección de  $\vec{r} \rightarrow$

$$\vec{u}_r = \vec{r} / r$$

No olvides que debes incluir el signo de las cargas cuando utilices la expresión de la ley de Coulomb.

La Ley de Coulomb dice que "la fuerza electrostática entre dos cargas puntuales es proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, y tiene la dirección de la línea que las une. La fuerza es de repulsión si las cargas son de igual signo, y de atracción si son de signo contrario".

En términos matemáticos, esta ley se refiere a la magnitud  $F$  de la fuerza que cada una de las dos cargas puntuales  $q_1$  y  $q_2$  ejerce sobre la otra separadas por una distancia  $r$  y se expresa en forma de ecuación como:

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

$F$  = fuerza (Newton)

$K = 9 \cdot 10^{-9} \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$  = constante de coulomb

$r$  = distancia (metros)

$q$  = cargas eléctricas (coulombs)

Ejemplo:

Una carga de  $3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  se encuentra 2 m de una carga de  $-8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , ¿Cuál es la magnitud de la fuerza de atracción entre las cargas?

$$F = 9 \cdot 10^{-9} \left( \frac{(3 \cdot 10^{-6} \text{ C})(-8 \cdot 10^{-6} \text{ C})}{2\text{m}^2} \right)$$

$$F = 9 \cdot 10^{-9} \left( -6 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{m}^2} \right)$$

$$F = -54 \cdot 10^{-3} \text{ N} = -0.054 \text{ N}$$

## 1.2.- CAMPO ELÉCTRICO

El concepto de campo, que puede usarse para describir ciertas fuerzas. Un campo eléctrico,  $E(r)$ , se define en cualquier punto en del espacio  $r$ , como la fuerza eléctrica neta sobre una carga, dividida entre esa carga.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q}$$

Las unidades del campo eléctrico son newton por coulomb (N/C).

## CONSTANTE DIELECTRICA O PERMIVIDAD DEL MEDIO

Dado que la constante la ley de Coulomb  $K$  depende del medio, esta suele expresarse en términos de otra constante denominada constante dieléctrica o permitividad del medio ( $\epsilon$ ):

En el caso del vacío se cumple que  $\epsilon = \epsilon_0$ , donde la permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) equivale a  $8.85 \cdot 10^{-12} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ .

Para medios distintos del vacío, se utiliza una magnitud adimensional denominada constante dieléctrica relativa o permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ), que se obtiene por medio del cociente entre la permitividad del medio ( $\epsilon$ ) y la permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ):

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

## CAMPO ELÉCTRICO

El campo eléctrico se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga. La dirección del campo se toma como la dirección de la fuerza que ejercería sobre una carga positiva de prueba. El campo eléctrico está dirigido radialmente hacia fuera de una carga positiva y radialmente hacia el interior de una carga puntual negativa.

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

- Carga eléctrica para una carga puntual.

$$E = \frac{F}{q} = C \left( \frac{Q}{r^2} \right)$$

El campo eléctrico está dirigido radialmente hacia fuera de una carga puntual en todas las direcciones. Los círculos representan superficies equipotenciales esféricas. El campo eléctrico de cualquier número de cargas puntuales, se puede obtener por la suma vectorial de los campos individuales. Un campo dirigido hacia fuera se toma como positivo; el campo de carga negativa está dirigido hacia el interior de la carga.

Esta expresión de campo eléctrico se puede obtener también, aplicando la ley de Gauss.

1.- Una carga de  $5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  se introduce a una región donde actúa un campo de fuerza de  $0.04 \text{ N}$ . ¿Cuál es la intensidad del campo eléctrico en esa región?

$$E = \frac{F}{q} = \frac{0.04 \text{ N}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ C}} = 8000 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

### 1.3.- LEY DE GAUSS

El campo eléctrico producido por objetos cargados estáticos puede obtenerse por dos procedimientos equivalentes: mediante la ley de Coulomb o mediante la ley de Gauss, ley debida a Karl Friedrich Gauss (1777-1855) físico y matemático alemán que hizo muchas aportaciones a la física tanto teórica como experimental la ley de Coulomb y el potencial eléctrico, en este se presenta la ley de Gauss. La ley de Coulomb es una forma simple y directa de expresar la fuerza eléctrica. Por otro lado, la ley de Gauss es más sutil, más elegante y, a veces, más útil. La ley de Gauss requiere una sofisticación matemática mayor que la ley de Coulomb; pero, como recompensa, usándola se adquiere un conocimiento más profundo de la interacción eléctrica.

La ley de Gauss se puede aplicar para evaluar el campo eléctrico si la distribución de carga es suficientemente simétrica. Como se verá más adelante, si el campo eléctrico se conoce, la ley de Gauss se puede utilizar para calcular la carga que lo produce.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$$

## LEY DE GAUSS

El flujo eléctrico total fuera de una superficie cerrada es igual a la carga encerrada, dividida por la permitividad.

$$\phi = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

El flujo eléctrico a través de un área, se define como el campo eléctrico multiplicado por el área de la superficie proyectada sobre un plano perpendicular al campo. La ley de Gauss es una ley general, que se aplica a cualquier superficie cerrada. Es una herramienta importante puesto que nos permita la evaluación de la cantidad de carga encerrada, por medio de una cartografía del campo sobre una superficie exterior a la distribución de las cargas. Para geometrías con suficiente simetría, se simplifica el cálculo del campo eléctrico.

Otra forma de visualizar esto es considerar una sonda de área  $A$ , que puede medir el campo eléctrico perpendicular a esa área. Si se escoge cualquier trozo de superficie cerrada y realizamos sobre esa superficie la medida del campo perpendicular, al multiplicarlo por su área, obtendremos una medida de la carga eléctrica neta dentro de esa superficie, sin importar como está configurada esa carga interna.

- **FLUJO ELÉCTRICO**

El concepto de flujo eléctrico es de utilidad en la asociación con la ley de Gauss. El flujo eléctrico a través de un área plana se define como el campo eléctrico multiplicado por la componente del área perpendicular al campo. Si el área no es plana, entonces la evaluación del flujo requiere generalmente una integral de área puesto que el ángulo estará cambiando continuamente.

$$\text{Flux} = \phi = EA \cos\theta$$

Aplicaciones de la ley de gauss.

La ley de Gauss es una herramienta poderosa para el cálculo de los campos eléctricos cuando son originados por una distribución de cargas con suficiente simetría para poderse aplicar.

Si la distribución de cargas adolece de la simetría necesaria para aplicarle la ley de Gauss, entonces el campo debe obtenerse, sumando los campos de carga puntuales de los elementos de carga individuales.

## POTENCIAL ELÉCTRICO.

Se dice que el potencial eléctrico en un punto del espacio de un campo eléctrico es la energía potencial eléctrica que adquiere una unidad de carga positiva situada en dicho punto.

$$V = \frac{E_p}{q}$$

Donde:

V es el potencial eléctrico en un punto del campo eléctrico. Su unidad en el S.I. es el julio por culombio (J/C) que en honor a Alesandro Volta recibe el nombre de Voltio.

$E_p$  es la energía potencial eléctrica que adquiere una carga testigo positiva  $q'$  al situarla en ese punto.

Si introducimos una carga  $q'$  en el seno de un campo eléctrico, la carga sufrirá la acción de una fuerza eléctrica y como consecuencia de esto, adquirirá cierta energía potencial eléctrica (también conocida como energía potencial electrostática). Si lo vemos desde una perspectiva más simple, podemos pensar que el campo eléctrico crea un área de influencia donde cada uno de sus puntos tiene la propiedad de poder conferir una energía potencial a cualquier carga que se sitúe en su interior.

A partir de este razonamiento, se establece una nueva magnitud escalar propia de los campos eléctricos denominada potencial eléctrico y que representa la energía potencial electrostática que adquiere una unidad de carga positiva si la situamos en dicho punto.

El potencial eléctrico en un punto del espacio de un campo eléctrico es la energía potencial eléctrica que adquiere una unidad de carga positiva situada en dicho punto.

$$V = E_p q'$$

Donde:

V es el potencial eléctrico en un punto del campo eléctrico. Su unidad en el S.I. es el julio por culombio (J/C) que en honor a *Alesandro Volta* recibe el nombre de Voltio.

$E_p$  es la energía potencial eléctrica que adquiere una carga testigo positiva  $q'$  al situarla en ese punto.

El hecho de que todas las magnitudes sean escalares, permite que el estudio del campo eléctrico sea más sencillo. De esta forma, si conocemos el valor del potencial eléctrico V en un punto, podemos determinar que la energía potencial eléctrica de una carga q situada en él es:

$$V = \frac{E_p}{q} = K * \frac{q_1 * q_2}{r^2} \Rightarrow v = k * \frac{q}{r}$$

El potencial eléctrico del campo eléctrico creado por una carga puntual q se obtiene por medio de la siguiente expresión:

$$V = K \cdot q/r$$

Donde:

V es el potencial eléctrico en un punto.

K es la constante de la ley de Coulomb.

q es la carga puntual que crea el campo eléctrico.

R es la distancia entre la carga y el punto donde medimos el potencial.

## ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA.

La energía potencial se puede definir como la capacidad para realizar trabajo que surge de la posición o configuración. En el caso eléctrico, una carga ejercerá una fuerza sobre cualquier otra carga y la energía potencial surge del conjunto de cargas. Por ejemplo, si fijamos en cualquier punto del espacio una carga positiva Q, cualquier otra

carga positiva que se traiga a su cercanía, experimentará una fuerza de repulsión y por lo tanto tendrá energía potencial. La energía potencial de una carga de prueba  $Q$  en las inmediaciones de esta fuente de carga será:

$$U = \frac{kQq}{r}$$

Donde  $k$  es la constante de Coulomb.

En electricidad, normalmente es más conveniente usar la energía potencial eléctrica por unidad de carga, llamado expresamente potencial eléctrico o voltaje.

- Potencial referencia al infinito.

La expresión general para el potencial eléctrico como resultado de una carga puntual  $Q$  se puede obtener referenciándolo al potencial cero del infinito. La expresión para la diferencia de potencial es:

$$V = \frac{kQ}{r} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Para cualquier valor arbitrario de  $r$ . La elección de potencial igual a cero en el infinito es arbitraria, pero es lógica en este caso porque allí, tanto el campo eléctrico como la fuerza se aproximan a cero. La energía potencial eléctrica de una carga  $q$  en el punto  $r$  será entonces

$$U = \frac{kQq}{r}$$

Donde  $k$  es la constante de Coulomb.

## 2.- POTENCIAL ELÉCTRICO Y CAPACITORES

### 2.1.- Potencial eléctrico y energía potencial eléctrica

El potencial eléctrico o potencial electrostático en un punto es el trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva  $q$  desde el punto de referencia, dividido por unidad de carga de prueba. Dicho de otra forma, es el trabajo que debe realizar una fuerza externa para traer una carga unitaria  $q$  desde la referencia hasta el punto considerado en contra de la fuerza eléctrica.

El potencial eléctrico sólo se puede definir para un campo estático producido por cargas que ocupan una región finita del espacio. Para cargas en movimiento debe recurrirse a los potenciales *de Liénard-Wiechert* para representar un campo electromagnético que además incorpore el efecto de retardo, ya que las perturbaciones del campo eléctrico no se pueden propagar más rápido que la velocidad de la luz. Si se considera que las cargas están fuera de dicho campo, la carga no cuenta con energía y el potencial eléctrico equivale al trabajo necesario para llevar la carga desde el exterior del campo hasta el punto considerado. La unidad del sistema internacional es el voltio (V). Todos los puntos de un campo eléctrico que tienen el mismo potencial forman una superficie equipotencial.

La tensión eléctrica o diferencia de potencial (también denominada voltaje) es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. También se puede definir como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas. Se puede medir con un voltímetro

Si dos puntos que tienen una diferencia de potencial se unen mediante un conductor, se producirá un flujo de electrones. Parte de la carga que crea el punto de mayor potencial se trasladará a través del conductor al punto de menor potencial y, en ausencia de una fuente externa, este traslado de cargas es lo que se conoce como corriente eléctrica.

La energía potencial de una partícula cargada  $q$ , en un campo eléctrico depende de la magnitud de la carga y de la magnitud del campo eléctrico. Una cantidad que es independiente de la carga sobre la partícula es el potencial eléctrico.

### EJEMPLO POTENCIAL ELECTRICICO

¿Cuál es el potencial eléctrico creado por una carga puntual de  $-2 \text{ mC}$  en un punto situado a 5 metros de ella en el vacío?

$$V = K * \frac{-2 * 10^{-3}}{5} = -3600000 \text{ V}$$

### EJEMPLO ENERGIA POTENCIAL

Dos cargas  $q_1$  y  $q_2$  de  $-5 \text{ mC}$  y  $-3 \text{ mC}$  se encuentran separadas en el vacío una distancia de 50 cm. Posteriormente la distancia es de 1 m. Sabiendo que  $q_1$  está fija y  $q_2$  es móvil, calcular: La energía potencial inicial y final de  $q_2$ .

$$E_p = k * \frac{q_1 * q_2}{r_i}$$

$$E_{pi} = 9 * 10^9 \left( \frac{-5 * 10^{-3} * -3 * 10^{-3}}{.5} \right) = 270000 \text{ J}$$

$$E_p = k * \frac{q_1 * q_2}{r_f}$$

$$E_{pf} = 9 * 10^9 \left( \frac{-5 * 10^{-3} * -3 * 10^{-3}}{1} \right) = 135000 \text{ J}$$

### 2.1.3.- Potencial eléctrico debido a cargas puntuales

El potencial eléctrico o potencial electrostático en un punto, es el trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva desde dicho punto hasta el punto de referencia, dividido por unidad de carga de prueba. Dicho de otra forma, es el trabajo que debe realizar una fuerza externa para traer una carga positiva unitaria  $q$  desde el punto de referencia hasta el punto considerado en contra de la fuerza eléctrica a velocidad constante. Matemáticamente se expresa por:

$$v = \frac{w}{Q}$$

El potencial eléctrico sólo se puede definir unívocamente para un campo estático producido por cargas que ocupan una región finita del espacio. Para cargas en movimiento debe recurrirse a los potenciales de Liénard-Wiechert para representar un campo electromagnético que además incorpore el efecto de retardo, ya que las perturbaciones del campo eléctrico no se pueden propagar más rápido que la velocidad de la luz.

Si se considera que las cargas están fuera de dicho campo, la carga no cuenta con energía y el potencial eléctrico equivale al trabajo necesario para llevar la carga desde el exterior del campo hasta el punto considerado. La unidad del Sistema Internacional es el voltio (V).

Todos los puntos de un campo eléctrico que tienen el mismo potencial forman una superficie equipotencial. Una forma alternativa de ver al potencial eléctrico es que a

diferencia de la energía potencial eléctrica o electrostática, él caracteriza sólo una región del espacio sin tomar en cuenta la carga que se coloca ahí.

### 2.1.4.- Cálculo de energía potencial debido a cargas puntuales

La energía potencial gravitatoria estudiamos que un cuerpo que se encuentra a determinada altura de la superficie de la Tierra adquiere una determinada cantidad de energía potencial provocada por la acción de la fuerza gravitatoria. De igual forma, un cuerpo cargado que sufre la acción de una fuerza eléctrica adquiere energía potencial electrostática.

La energía potencial eléctrica que posee una carga puntual  $q_1$  en presencia de otra carga puntual  $q_2$  que se encuentran separadas cierta distancia es

$$V = \frac{Kq_1q_2}{r}$$

Determinar el valor del potencial eléctrico creado por una carga puntual  $q_1=12 \cdot 10^{-9} \text{ C}$  en un punto ubicado a 10 cm.

$$V = 9 \cdot 10^9 \frac{12 \cdot 10^{-9} \text{ C}}{.1 \text{ m}} = 1.080 \text{ v}$$

### 2.2.2.- Cálculo de la capacitancia

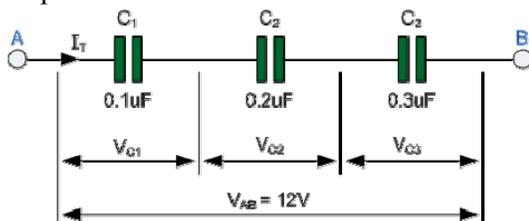
Capacitancia entre dos conductores que tienen cargas de igual magnitud y de signo contrario es la razón de la magnitud de la carga en uno u otro conductor con la diferencia de potencial resultante entre ambos conductores.

$$C = \frac{Q}{V}$$

Obsérvese que por definición la capacitancia es siempre una cantidad positiva. Además, como la diferencia de potencial aumenta al aumentar la carga almacenada en el condensador, la razón  $\frac{Q}{V}$  es una constante para un condensador dado. Por lo tanto, la capacitancia de un dispositivo es la medida de su capacidad de almacenar carga y energía potencial eléctrica.

### 2.2.3.- Arreglos de capacitores

Capacitores en Serie



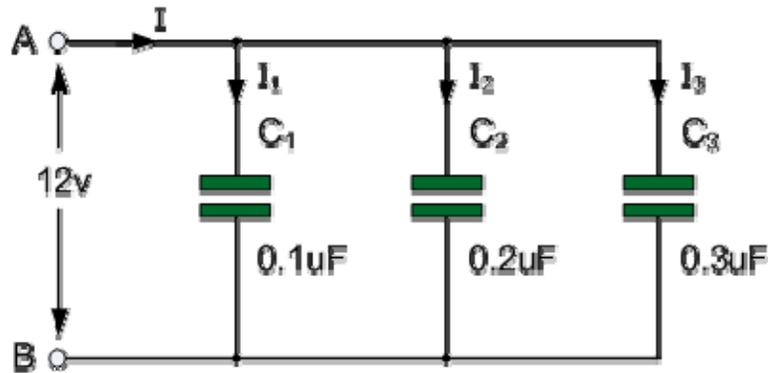
Donde la capacitancia total es el resultado de la siguiente fórmula:

$$CT = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

La capacidad total de los capacitores en serie se calcula sumando las inversas de cada una de las capacidades y calculando la inversa del resultado.

Cuando  $n$  condensadores se acoplan en serie, la carga eléctrica entre sus placas es la misma, en virtud del principio de conservación de la carga eléctrica. La diferencia de potencial entre los extremos del acoplamiento será igual a la suma de las diferencias de potencial entre las placas de cada uno de los condensadores acoplados, por la ley de conservación de la energía

### Capacitores en Paralelo



Donde la capacitancia total es el resultado de la siguiente fórmula:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3$$

La capacidad total de los capacitores en paralelo se calcula sumando las capacidades de cada uno de los capacitores.

Esta conexión se caracteriza porque la diferencia de potencial  $\Delta V$  es la misma para los tres, en este caso igual a la suministrada por la batería. La carga total acumulada por ellos es igual a la suma de  $q_1$  y  $q_2$  y  $q_3$

El valor de la capacidad eléctrica equivalente significa que en el circuito puede sustituirse la conexión en paralelo de los condensadores por un condensador de capacidad eléctrica  $C$  con una carga  $q$ .

En una conexión de condensadores en paralelo, la capacidad equivalente es la suma de la capacidad de cada uno de los condensadores.

## 3.- PRINCIPIOS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS

### 3.1 Concepto de corriente eléctrica

La corriente eléctrica o intensidad eléctrica es el flujo que existe de carga eléctrica por unidad de tiempo que recorre un material. En el sistema internacional de unidades se expresa en C/S (coulomb sobre segundo), que esto es igual a amperes.

Para medir la corriente eléctrica se utiliza un instrumento llamado galvanometro.

$$A = \frac{C}{S}$$

### CAPACITORES Y CAPACITANCIA

La capacitancia es la razón de carga obtenido por el potencial adquirido de los conductores. Unidad de capacidad es de Coulomb por Volt y se llama como Farad (F).

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

Existe una relación lineal entre la carga ganó y ganó potencial. Pendiente de la gráfica nos da la capacidad de la esfera.

$$\text{Tan}\theta \frac{Q}{V} = C$$

Como he dicho antes, faradio es la unidad de capacidad, sin embargo, que comúnmente usamos (pF) picofaradio =  $10^{-12}\text{F}$ , (mF) microfaradios =  $10^{-6}\text{F}$  y (NF) nanofaradios =  $10^{-9}\text{F}$ .

Esfera con radio  $r$ , y la carga  $q$  tiene capacidad;

$$V = k \frac{q}{r}$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{r}{k}$$

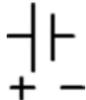
- Condensadores.

Los condensadores son dispositivos diseñados para almacenar carga. Se utilizan comúnmente en las computadoras o sistemas electrónicos. Se componen de dos placas conductor situado a una distancia entre sí. Que no se toquen entre sí. Cuando conectamos la placa con carga negativa con una esfera neutral, que comparten carga total hasta que los potenciales se igualan y las hojas del electroscopio se elevan. Luego, localizar una placa con una distancia  $d$  de  $B$ . Debido a que la placa base es neutral desde el principio. Puesto que  $B$  tiene una carga negativa que afecta a la placa  $A$  y que está cargada positivamente por inducción. Si ponemos material aislante entre las diferentes placas de plástico, como las hojas del electroscopio son un poco cerrados. Podemos concluir que, la capacitancia de las placas depende de la distancia entre las placas.

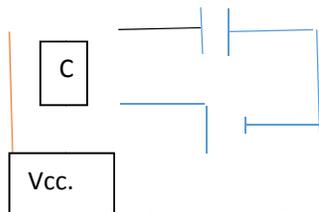
En un circuito que representan el condensador con el símbolo;



Y la batería que suministra la diferencia de potencial está representada por el símbolo;



Mostramos los condensadores y baterías en el circuito como se indica a continuación



Capacidad de un condensador depende de

- Área de las placas
- Distancia entre las placas  $d$
- Constante dieléctrica entre las placas  $\epsilon^\circ$

La capacitancia de las placas se encuentra con la siguiente fórmula;

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

La constante dieléctrica entre las placas  $\epsilon^\circ$  depende del tipo de material. Por ejemplo, el vacío a  $\epsilon = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$  y el agua  $\epsilon = 717 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$ .

## CORRIENTE ELÉCTRICA

La corriente eléctrica es la tasa de flujo de carga que pasa por un determinado punto de un circuito eléctrico, medido en Culombios/segundo, denominado Amperio. En la mayoría de los circuitos eléctrico de DC, se puede asumir que la resistencia al flujo de la corriente es una constante, de manera que la corriente en el circuito está relacionada con el voltaje y la resistencia, por medio de la ley de Ohm. Las abreviaciones estándares para esas unidades son  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ .

- Carga eléctrica.

La unidad de carga eléctrica es el Culombio (abreviado C). La materia ordinaria está hecha de átomos que tienen un núcleo cargado positivamente y electrones cargados negativamente rodeando al núcleo. La carga está cuantizada en múltiplo de la carga del electrón o protón:

***Carga del protón  $e=1.602 \times 10^{-19}$  coulombs.***

***Carga del electrón  $-e=1.602 \times 10^{-19}$  coulombs.***

Las influencias de las cargas están caracterizadas en función de las fuerzas entre ellas (ley de Coulomb), y el campo eléctrico y el voltaje producidos por ellas. Un Culombio de carga es la carga que fluiría a través de una lámpara de 120 vatios (120 voltios de AC) en un segundo. ¡Dos cargas de un Culombio cada una, separada por una distancia de un metro, se repelerán entre ellas con una fuerza de alrededor de 1 millón de toneladas!

La tasa de flujo de la corriente eléctrica se llama intensidad de corriente y se mide en Amperios.

- Corriente eléctrica convencional.

Aunque los electrones son los portadores de carga móvil, responsable de la corriente eléctrica en los conductores tales como los cables, se ha establecido la convención de tomar la dirección de la corriente eléctrica, como si las que se movieran fueran las cargas positivas. Algunos textos, invierten esta convención y toma la corriente eléctrica como la dirección del movimiento de electrones, y esto es obviamente una dirección física más realista, pero la gran mayoría de referencias toma la dirección de corriente convencional y en la mayor parte de este material, se va a seguir esa convención. En aplicaciones comunes, tales como la determinación de la dirección de una fuerza sobre un cable con corriente, el actual tratamiento como movimiento de cargas positivas o movimiento de cargas negativas, da resultados idénticos. Además de la ventaja del acuerdo con la mayoría de los textos, la dirección de corriente convencional, es la dirección desde alto voltaje a bajo voltaje, de alta energía a baja energía, y por tanto tiene cierto atractivo en su paralelo con el flujo del agua desde alta presión a baja presión (ver analogía del agua).

### Ejemplo

Una enfermera desea administrar 80  $\mu\text{g}$  de dexanetron en el talón de un jugador de futbol soccer. Si ella usa un dispositivo de iontoforesis que aplica una corriente de 0.14 mA, ¿en cuánto tiempo se administra esta dosis de sustancia? Suponga que el instrumento tiene una tasa de aplicación de 650 $\mu\text{g/C}$  y que la corriente circula con rapidez constante.

### Solución

Si la tasa de aplicación de la sustancia es de 650 $\mu\text{g/C}$ , para aplicar 80  $\mu\text{g}$  una carga total

$$q = \frac{80\mu\text{g}}{650\mu\text{g/C}} = 0.123 \text{ C}$$

La corriente circula con velocidad constante lo cual la integral es la siguiente

$$q = \int_0^t i dt = it$$

Al despejar t e insertamos los datos, el resultado es

$$q = it \Rightarrow t = \frac{q}{i} = \frac{0.123 \text{ C}}{0.14 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 880 \text{ S}$$

Eso equivale a que el tratamiento del atleta dura 15 minutos.

### 3.2.- Resistividad y resistencia

#### 3.2.1 Cálculo de la resistividad dependiente del medio

La resistividad,  $\rho$ , es una medida de la intensidad de oponerse de un material al flujo de corriente eléctrica. La resistencia, R, es la oposición de un material al flujo de corriente eléctrica.

#### 3.4.- Arreglo de resistencias

##### 3.4.1 Serie

Arreglo en serie: se obtiene conectando la salida de una resistencia con la entrada de otra resistencia. La resistencia total del arreglo, se obtiene sumando las resistencias individuales, por lo tanto, es obvio que la resistencia total es mayor que cualquiera de las resistencias individuales.

$$R_t = R_1 + R_2 + R_n$$

##### 3.4.2 Paralelo

Arreglo en paralelo: se obtiene conectando la entrada de una resistencia con la entrada de otra resistencia. La resistencia total del arreglo será menor que cualquiera de las resistencias individuales.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_n}$$

### 3.4. LEY DE OHM

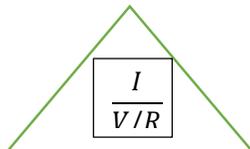
#### LEY DE OHM

La Ley de Ohm, postulada por el físico y matemático alemán *Georg Simon Ohm*, es una de las leyes fundamentales de la electrodinámica, estrechamente vinculada a los valores de las unidades básicas presentes en cualquier circuito eléctrico como son:

Tensión o voltaje, en volt (V).

Intensidad de la corriente, en ampere (A).

Resistencia en ohm (R) de la carga o consumidor conectado al circuito.



Debido a la existencia de materiales que dificultan más que otros el paso de la corriente eléctrica a través de los mismos, cuando el valor de su resistencia varía, el valor de la intensidad de corriente en amperes también varía de forma inversamente proporcional.

Por otro lado y de acuerdo con la propia Ley, el valor de la tensión o voltaje es directamente proporcional a la intensidad de la corriente; por tanto, si el voltaje aumenta o disminuye, el amperaje de la corriente que circula por el circuito aumentará o disminuirá en la misma proporción, siempre y cuando el valor de la resistencia conectada al circuito se mantenga constante.

- Fórmula matemática y representación de la ley de Ohm.

Desde el punto de vista matemático el postulado anterior se puede representar por medio de la siguiente Fórmula General de la Ley de Ohm:

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

## ARREGLOS DE RESISTENCIAS

En los circuitos eléctricos suelen emplearse unos dispositivos que se oponen al paso de la corriente eléctrica de una forma más pronunciada de lo normal. Estos dispositivos reciben el nombre de resistencias y pueden asociarse de tal forma que en conjunto equivalgan al valor de otra resistencia, llamada resistencia equivalente.

Se denomina resistencia resultante o equivalente, al valor de la resistencia que se obtiene al asociar un conjunto de ellas. Principalmente las resistencias se pueden asociar en serie, paralelo o una combinación de ambas llamadas mixta.

- Resistencias en serie.

Se dice que cuando dos o más resistencias se dice que están en serie, cuando cada una de ellas se sitúa a continuación de la anterior a lo largo del hilo conductor. Cuando dos o más resistencias se encuentran en serie la intensidad de corriente que atraviesa a cada una de ellas es la misma.

Si aplicamos la ley de Ohm a cada una de las resistencias de la figura anterior obtenemos que:

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n.$$

- Resistencias en paralelo.

Cuando dos o más resistencias se encuentran en paralelo, comparten sus extremos. Si disponemos de  $n$  resistencias en paralelo, todas las resistencias poseen la misma diferencia de potencial en sus extremos y la intensidad de entrada  $I$  se divide entre cada una de las ramas de tal forma que una asociación de resistencias en paralelo es equivalente a una única resistencia  $R$ , en la que se cumple que:

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots + \frac{1}{R_n}}$$

- Resistencias mixtas.

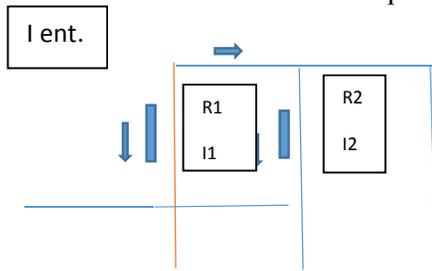
Generalmente, en los circuitos eléctricos no sólo parecen resistencias en serie o paralelo, sino una combinación de ambas. Para analizarlas, es común calcular la resistencia equivalente calcular la resistencia equivalente de cada asociación en serie y/o paralelo sucesivamente hasta que quede una única resistencia.

## LEY DE KIRCHHOFF

La suma de las corrientes que entran en un área cerrada del circuito (ver círculo rojo en el gráfico), es igual a la suma de las corrientes que salen.

Diciéndolo de otra manera y observando el segundo gráfico, donde el área bajo consideración es diferente (ver el círculo verde). La suma de corrientes que entran a un nodo debe ser igual a cero ("0"). Siempre se debe tomar a las corrientes que entran al nodo como positivas y a las del nodo como negativas. Entonces:

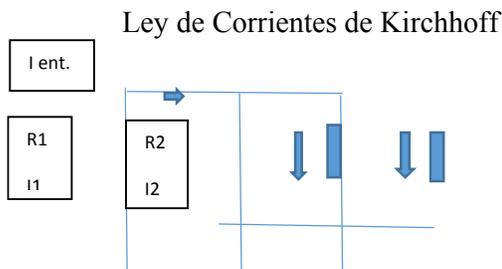
Corrientes que entran al nodo = corrientes que salen del nodo ó Corrientes que entran al nodo – corrientes que salen del nodo = 0



## LEY DE CORRIENTES DE KIRCHHOFF

En el caso de la figura anterior, la corriente que sale de la fuente  $I_{ent.}$ , se divide en dos, pasando  $I_1$  por el resistor  $R_1$  e  $I_2$  por el resistor  $R_2$ . Posteriormente estas dos corrientes se vuelven a unir y forman una sola corriente antes de regresar a la fuente original  $I_{ent.}$ . De esta manera se cumple nuevamente la ley de corrientes de Kirchhoff en el nodo que está debajo de la resistencia  $R_1$ .

$I_{ent.}$  (corriente que entra) =  $I_1 + I_2$  (corrientes que salen)



La ley de corrientes de Kirchhoff es muy útil, para encontrar el valor de una corriente en un circuito cuando conocemos las otras que alimentan un nodo.

Nota: Si bien en el gráfico el círculo rojo sólo abarca un área pequeña, podría abarcar un área mucho más grande. Este círculo podría abarcar un área mayor del circuito y la ley de corrientes de Kirchhoff se seguiría cumpliendo. Ver círculo verde en el gráfico anterior.

Esta ley, al igual que la ley de voltajes de Kirchhoff, fue creada por el físico prusiano Gustav Robert Kirchhoff que contribuyó grandemente en el campo de los circuitos eléctrico.

La ley de ohm no es una ley de naturaleza. Ni siquiera la obedecen todos los resistores. La corriente es directamente proporcional a la diferencia de potencial a través del resistor sobre un amplio intervalo de temperatura y un amplio intervalo de diferencias de potencial aplicadas. Para los resistores no óhmicos, la corriente y la diferencia de potencial no son directamente proporcional en absoluto, lo cual significa que muchos dispositivos eléctricos modernos u obedecen la ley de ohm.

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

I= intensidad de amperes

V= diferencia de potencial en voltios

R= resistencia en ohm

Determinar la resistencia que existe en un voltaje de 5 V y una corriente de 500 mA

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

$$V = 5 \text{ V}$$

$$I = 500 \text{ mA} = 0.5 \text{ A}$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5}{0.5} = 10$$

La resistencia es de 10 ohm

### 3.5- LEYES DE KIRCHHOFF

El trabajo realizado por el campo eléctrico para mover las cargas eléctricas a lo largo de un conductor se transforma íntegramente en calor. Este trabajo depende de la intensidad de la corriente que circula por el conductor, la resistencia que ofrece este al paso de corriente y el tiempo durante el cual circula.

### 4.- CAMPO MAGNÉTICO

El campo magnético B es una magnitud vectorial. Puede estar producido por una carga puntual en movimiento o por un conjunto de cargas en movimiento, es decir, por una corriente eléctrica.

La unidad de campo magnético en el Sistema Internacional es el tesla (T). Un tesla se define como el campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (culombio) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro del campo y perpendicularmente a las líneas de campo.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} * \vec{u}_r}{r^2}$$

q= La carga del campo

v= Velocidad de dicha carga

r= Distancia desde el punto donde de carga hasta el punto p donde está el campo magnético

$u_r$ = Es un vector unitario que va desde el punto donde se encuentra la carga hacia el punto donde se calcula el campo

$\mu_0$  = Es una constante denominada permeabilidad del espacio libre. Su valor en el Sistema Internacional es  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \text{ T} \frac{\text{m}}{\text{A}}$

## 4.1.- FUERZA

### 4.1.1.- FUERZA DE LORENTZ

Es conocido que un conductor por el que circula una corriente sufre una fuerza en presencia de un campo magnético. Puesto que la corriente está constituida por cargas eléctricas en movimiento, empezaremos por estudiar la fuerza sobre una única carga

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

qE= fuerza eléctrica

qv=fuerza magnética

Ejemplo

Una partícula alfa está compuesta por dos electrones, ésta se proyecta en un campo magnético de 1.2T con una velocidad de  $4 \cdot 10^6$  m/seg Determinar la fuerza magnética sobre la partícula cuando la dirección de la velocidad forma un ángulo de  $37^\circ$  con el flujo magnético.

$$\beta = \frac{7.2 * 10^{-18} N}{\left(4.6 * 10^6 \frac{m}{s}\right) (1.6 * 10^{-19} C) (\text{sen}45)} = 13.8310^{-6} = 13.83 \mu T$$

### 4.1.2.- Magnetismo en materiales

Las corrientes eléctricas tienen la capacidad de poder crear campos magnéticos, de los cuales existen también naturales y sintéticos. Los campos magnéticos creados por los materiales vienen de dos fuentes atómicas, los momentos orbitales y de spin de los electrones, que al estar en movimiento continuo experimenta en el material fuerzas sobre el campo magnético aplicado. Lo que caracteriza a los magnéticos de un material es que pueden cambiar por aleación con otros elementos, donde se modifican por interacciones atómicas.

## 4.2.- Ley de Ampere

La ley de ampere sirve para calcular el campo magnético de una distribución de elementos de corriente cuando la distribución tiene simetría cilíndrica (bucle cerrado) o esférica.

La ley de ampere es equivalente a la suma de la longitud multiplicado por el campo magnético en la dirección de la longitud, equivale a la permeabilidad multiplicándolo por la corriente eléctrica.

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

$\mu_0$  = constante de permeabilidad magnetica

I = intensidad de corriente

B = campo magnetico

Ejemplo:

Un solido vacío de 5 cm pasa una corriente eléctrica de 12 A y el campo magnético creado en su interior es de 0.1 T ¿cuantas espiras esta echo el solenoide?

Solucion:

L= 5 cm= .05m

I= 12A

B=0.1T

$$\mu = 4. \pi 10^{-7} \text{m. kg/C}^2$$

$$B = \frac{\mu_0 * I * N}{L}$$

$$N = \frac{B * L}{\mu_0 * I}$$

$$N = \frac{0.1 * .05}{4 * 10^{-7} * 12} = 322 \text{ espiras}$$

#### 4.4.1.- Ley de Faraday

El experimento fue realizado en 1830 por el químico y físico británico Michael Faraday, y de manera independiente por el físico estadounidense Joseph Henry. Su trabajo demostró que un campo magnético variable podía generar una diferencia de potencial en un conductor, lo suficientemente fuerte para producir una corriente eléctrica.

$$\oiint \vec{B} * d\vec{A}$$

Las dos integrales significan integración sobre dos variables, el elemento diferencial del área,  $d\vec{A}$ , debe describirse por dos variables espaciales, como x y y en coordenadas cartesianas, el vector  $d\vec{A}$  siempre apunta fuera del volumen encerrado y es perpendicular a la superficie en todas partes.

Ejemplo

Una bobina formada por 50 espiras cuadrados de 20 cm están en un campo magnético, que se encuentra paralelo al eje de la bobina,  $B=5 \text{ t}^2$  ¿cuál es fem inducida en la bobina?

Solución

$$\epsilon = - \frac{d\phi}{dt} = - \frac{d(10t^2)}{dt} = 20t \text{ V}$$

#### 4.4.2.- LEY DE LENZ

Consiste en unas reglas para determinar la dirección de una corriente inducida en un bucle. Una corriente inducida tiene una dirección tal que el campo magnético debido a la corriente inducida se opone al cambio en el flujo magnético que induce la corriente. La dirección de la corriente inducida puede usarse para determinar las ubicaciones de mayor o menor potencial.

Ejemplo

Ahí una varilla metálica con una medida de 25 cm de longitud se desliza, paralelamente, en un circuito en U, con una velocidad de 16 m/s, hacia la izquierda, en el seno de un campo magnético de .02 T, si la resistencia del circuito de 4 ohm, determine la fuerza electromotriz inducida y la fuerza que actúan sobre la varilla para mantener constante la velocidad.

La fem inducida:  $\epsilon = BIV = 0.2 * 0.25 * 15 = 8 \text{ V}$

La intensidad que recorre el circuito es:  $I = \frac{\epsilon}{R} = \frac{8}{4} = .02 \text{ A}$

$$F = I * L * B = .2 * .25 * .2 = 0.01 \text{ N}$$

## LEY DE BIOT – SAVART

Las observaciones experimentales realizadas demuestran que la fuerza que actúa sobre una carga ( $q_1$ ) depende de los siguientes puntos:

- La magnitud de la carga 1 y su velocidad
- La velocidad de la carga 2 y el campo eléctrico que esta produce sobre la carga 1.
- formula:

$$\mathbf{F}_{12} = q_1 \mathbf{v}_1 \times (\mathbf{v}_2 \times \mathbf{E}_{12})$$

Al introducir la velocidad de la luz como la constante de proporcionalidad que satisface los requerimientos experimentales se obtuvo la siguiente por formula:

$$\mathbf{F}_{12} = q_1 \mathbf{v}_1 \times \frac{1}{c^2} (\mathbf{v}_2 \times \mathbf{E}_{12})$$

Si esta ecuación se compara con  $\mathbf{F}_m = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  se obtiene la formula siguiente  $\mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \mathbf{v} \times \mathbf{E}$

Una definición de lo anterior es , ‘‘ como al desplazarse una carga  $q_2$  también se desplaza el campo eléctrico que esta carga produce es válido afirmar que un campo eléctrico que se desplaza ( o que varía con el tiempo) produce un campo magnético

Diferenciando la expresión que define el campo magnético se obtiene la siguiente ecuación :

$$d\mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \mathbf{v} \times d\mathbf{E}.$$

Ecuación de la velocidad

$$\mathbf{v} = d\mathbf{v} / dt.$$

También la ley de biot y savart establece que el campo magnético producido por una corriente cualquiera en un punto P , como lo muestra la siguiente formula

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \times I}{4 \pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times \boldsymbol{\mu}r}{r^2}$$

donde su módulo se puede calcular por medio de la siguiente formula que se muestra a continuación.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \times I}{4 \pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times \text{Sin } \alpha}{r^2} \propto$$

El producto vectorial de,  $d\mathbf{l}$  y  $r$  que provoca que  $B$  tenga la dirección perpendicular a tu pantalla orientado hacia dentro. En este caso el modulo se obtiene por medio de la siguiente expresión donde todo es desde el producto de campo magnético

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \times I}{4 \pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times \boldsymbol{\mu}r}{r^2}$$
$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \times I}{4 \pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times \text{Sin } \alpha}{r^2} \propto$$

Ejemplo:

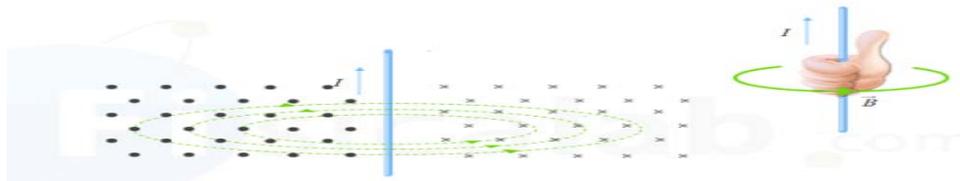
Una corriente eléctrica rectilínea crea un campo magnético de  $4 \cdot 10^{-4} \text{ T}$  en un punto situado a 3 cm de dicha corriente. ¿Cuál es la intensidad de la corriente eléctrica? ¿Hacia dónde está dirigido el campo magnético en los puntos situados a la derecha y a la izquierda del conductor rectilíneo, si el conductor se encuentra orientado verticalmente y la intensidad asciende hacia arriba?

$$B: 4 \times 10^{-4} \quad R: 3 \text{ CM} = 3 \times 10^{-2} \text{ m.}$$

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \times I}{2 \times \pi \times r} \hat{i} = \frac{B \times 2 \times \pi \times R}{\mu_0} \hat{i} = \frac{B \times 2 \times \pi \times R}{\mu_0}$$

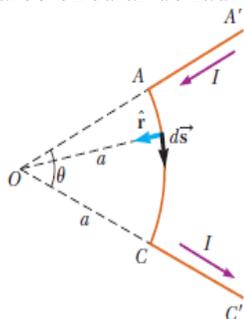
$$I = \frac{4 \times 10^{-4} \times 2 \times \pi \times 3 \times 10^{-2}}{4 \times \pi \times 10^{-7}} \quad I = 60 \text{ A}$$

Ahora aplicamos la regla de la mano derecha para saber cómo son los vectores de campo magnético que entran o salen de la pantalla ala derecha o izquierda del conductor.



Ejemplo con explicación paso a paso detallado:

Calcule el campo magnético en el punto O para el segmento de alambre portador de corriente que se muestra en la figura 30.5. El alambre consiste en dos porciones rectas y un arco circular de radio a, que subtiende un ángulo u.



**Figura 30.5** (Ejemplo 30.2) El campo magnético en O debido a la corriente en el segmento curvo AC es hacia la página. La aportación al campo en O debido a la corriente en los dos segmentos rectos es cero. La longitud del segmento curvo AC es s.

Conceptualizar La figura 30.6 muestra la aportación al campo magnético dB S en P debida a un solo elemento de corriente en lo alto del anillo. Este vector de campo se puede resolver en componentes dBx paralelo al eje del anillo y dB⊥ perpendicular al eje. Piense en las aportaciones al campo magnético de un elemento de corriente en la parte baja de la espira. Debido a la simetría de la situación, las componentes perpendiculares del campo debido a los elementos en las partes superior e inferior del anillo se cancelan. Esta cancelación se presenta para todos los pares de segmentos alrededor del anillo, de modo que puede ignorar la componente perpendicular del campo y enfocarse exclusivamente en las componentes paralelas, que simplemente se suman.

**Categorizar** Se pide encontrar el campo magnético debido a una distribución de corriente simple, así que este ejemplo es un problema representativo para el que la ley Biot-Savart es adecuada.

**Analizar** En esta situación cada elemento de longitud  $ds$  es perpendicular al vector  $\hat{r}$  en la ubicación del elemento. Por

lo tanto, para cualquier elemento,  $d\vec{s} \cdot \hat{r} = ds \sin 90^\circ = ds$ . Además, todos los elementos de longitud alrededor de la espira están a la misma distancia  $r$  de P, donde  $r^2 = a^2 + x^2$ .

A partir de la siguiente ecuación, encuentre la magnitud del campo en O debido a la corriente en un elemento de longitud  $ds$ : Integre esta expresión a lo largo de la trayectoria curva AC, y note que  $I$  y  $a$  son constantes:

$$dB = \frac{\mu_0 I ds}{4\pi a^2}$$

A partir de la geometría, observe que  $s = a\theta$  y sustituya:

**Finalizar**

la siguiente ecuación da la magnitud del campo Magnético en O. La dirección de  $B$  es hacia la página en O porque  $d\vec{s} \times \hat{r}$  es hacia la página para todo elemento de Longitud.

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} \int ds = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} s$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} (a\theta) = \frac{\mu_0 I}{4\pi a^2} \theta$$

### **FUERZA DE LORENTZ**

*La fuerza de Lorentz es la fuerza ejercida por el campo electromagnético que recibe una partícula cargada o una corriente eléctrica.*

*Para una partícula sometida a un campo eléctrico combinado con un campo magnético, la fuerza electromagnética total o fuerza de Lorentz sobre esa partícula se puede describir con la siguiente fórmula.*

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

$q$ : es la carga.

$\vec{v}$ : es la velocidad de la carga.

$\vec{B}$ : es el campo eléctrico.

**Ejemplo:** Una carga de  $2\text{nC}$  se proyecta con una velocidad de  $5 \times 10^4 \text{ m/s}$  en un ángulo de  $30^\circ$  con un campo magnético de  $3 \text{ mT}$ . ¿cuáles son la magnitud y dirección de la fuerza resultante?

Datos:

$$q = 2 \times 10^{-9} \text{ C}$$

$$v = 5 \times 10^4 \text{ m/s}$$

$$B = 3 \times 10^{-3} \text{ T}$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$F = qvB \sin \theta = (2 \times 10^{-9} \text{ C})(5 \times 10^4 \text{ m/s})(3 \times 10^{-3} \text{ T}) \sin 30^\circ$$

$$F = 1.50 \times 10^{-7} \text{ N hacia arriba}$$

### **LEY DE AMPERE**

Otras de las leyes fundamentales en electricidad es la ley de ampere, explica que la circulación de la intensidad del campo magnético en un contorno cerrado es proporcional de la corriente que recorre en ese contorno.

Nos permite calcular campos magnéticos a partir de las corrientes eléctricas, fue descubierta por André-Marie Ampere en 1826, esta ley se describe con la fórmula que aparece en la figura (1.1).

$$\oint B \, dl = \mu I T$$

Figura 1.1: Ley de ampere.

- $\mu$  es la permeabilidad del vacío.
- $dl$  es un vector tangente a la trayectoria elegida en cada punto.
- $I$  es la corriente neta que atraviesa la superficie delimitada por la trayectoria, y será positiva o negativa según el sentido con el que atraviere a la superficie.

Ejemplo 1:

Se tiene un conductor rectilíneo colocado en perpendicularmente al plano del papel, transportando una corriente de 5 amperios. Calcular el campo magnético sobre una recta en un punto situado a 3 cm del conductor.

Datos:

$I = 5A$  (Intensidad de corriente)

$B = ?$  (campo magnético)

$d = 3 \text{ cm} = 0.03 \text{ m}$  (distancia del conductor al punto donde se va a calcular el campo)

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{W}{A \cdot m}$  (constante de permeabilidad)

usando la ecuacion (  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi \cdot d}$  ) nos queda

$$B = \frac{\left(4\pi \times 10^{-7} \frac{W}{A \cdot m}\right) \cdot (5A)}{2\pi (3 \times 10^{-2} \text{ m})} = \frac{62,83 \cdot 10^{-7} W}{6,28 \cdot 10^{-2} m^2} = 10 \times 10^{-5} \frac{W}{m^2}$$

## ECUACIONES DE MAXWELL

La contribución de maxwell en el campo de electromagnetismo fue muy importante y muy relevancia ya que las leyes que formulo son fundamentales para los fenómenos electromagnéticos.

Maxwell la teoría electromagnética de la luz y la energía cinética de los gases, y explico la naturaleza de los anillos de Saturno y la visión en color, históricamente las ecuaciones de maxwell se obtuvieron a partir de leyes empíricas que se fueron generalizando de un modo inteligente hasta llegar al conocimiento actual de la interaccion electromagnética desde el punto de vista clásico. Sin embargo es posible ontener las ecuaciones de maxwell desde un punto de vista más teórico: la teoría de la relatividad.

La exitosa interpretación de Maxwell del campo electromagnético resulto en las ecuaciones de campo que lleva su nombre. Las ecuaciones de maxwell representan las y el magnetismo. Por simplicidad, se presentan las ecuaciones de maxwell como se aplican al espacio libre, es decir en ausencia de cualquier material dieléctrico o magnético. Las cuatro ecuaciones son:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = q/\epsilon$             | Ley de Gauss                 |
| 2. $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$                      | Ley de Gauss del magnetismo. |
| 3. $\oint \mathbf{E} \cdot ds = d\Phi B/dt$                      | Ley de Faraday.              |
| 4. $\oint \mathbf{B} \cdot ds = \mu I + \epsilon\mu(d\Phi E/dt)$ | Ley de Ampere-Maxwell.       |

Los elementos y las variables que intervienen para la formulación de las leyes de maxwell son las siguientes:

- $\vec{E}$  - Campo eléctrico existente en el espacio, creado por las cargas.
- $\vec{D}$  - Campo dieléctrico que resume los efectos eléctricos de la materia.
- $\vec{B}$  - Campo magnético existente en el espacio, creado por las corrientes.
- $\vec{H}$  - Campo magnético que resume los efectos magnéticos de la materia.
- $\rho$  - Densidad de cargas existentes en el espacio.
- $\vec{J}$  - Densidad de corriente, mide el flujo de cargas por unidad de tiempo y superficie y es igual a  $\vec{J} = \rho \vec{v}$ .
- $\epsilon$  - Permitividad eléctrica, característica de los materiales dieléctricos.
- $\mu$  - Permeabilidad magnética, característica de los materiales paramagnéticos.

1. **Ley de Gauss:** el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta dentro de dicha superficie dividida por  $\epsilon$ .
2. El flujo magnético neto a través de una superficie cerrada.
3. Es la ley afirma que la fem, que es la integral del campo eléctrico alrededor de cualquier trayectoria cerrada, es igual a la relación de cambio del flujo magnético a través de cualquier superficie limitada por dicha trayectoria.
4. La integral de línea de campo magnético depende de cualquier trayectoria cerrada es la suma de  $\mu$  veces la corriente neta a través de dicha trayectoria y  $\epsilon$   $\mu$  veces la rapidez de cambio del flujo eléctrico a través de cualquier superficie limitada por dicha trayectoria.

Aplicación de las ecuaciones de Maxwell:

Las ecuaciones de maxwell constituyen un pilar básico de la teoría electromagnética ya que por ahora se demostraron como válidas siempre. Esto es debido a que la teoría electromagnética siempre fue, sin saberlo, una teoría relativista.

Cuando se estudia desde el punto de vista cuántico estas ecuaciones solo deben ser revisadas para tener en cuenta el carácter discreto de los fotones, pero cuando tenemos gran cantidad de ellos podemos aplicar los resultados continuos sin ningún problema.

### Ejemplo 1

Una bocina consta de 200 vueltas de alambre y tiene una resistencia total de  $2 \Omega$ . Cada vuelta es un cuadrado de 18 cm de lado y se activa un campo magnético uniforme perpendicular al plano de la bobina. Si el campo cambia linealmente de 0 a 0.5 tesla en 0.8 seg. Cuál es la magnitud de la fem inducida en la bobina mientras está cambiando el campo?

El área de una vuelta de la bobina es:

$$\text{Lado} = 18 \text{ cm} = 0.18 \text{ m}$$

$$A = 0.18 \text{ m} \times 0.18 \text{ m} = 0.0324 \text{ m}^2$$

El flujo magnético a través de la bobina en  $t = 0$  es cero, puesto que  $B = 0$  en dicho momento.  $\Phi_2 = 0$

En  $t = 0.8$  seg. El flujo magnético a través de una vuelta de la bobina es:  $\Phi_1 = B \times A$

$$: \Phi_1 = 0.5 \text{ T} \times 0.0324 \text{ m}^2$$

$$\Phi_1 = 0.0162 \text{ T m}^2$$

Por tanto, la magnitud de la fem inducida es:

$$\Delta\Phi_B = \Phi_1 - \Phi_2 = 0.0162 \text{ Tm}^2 - 0 = 0.0162 \text{ Tm}^2$$

N= 200 vueltas.

$$\Delta t = 0.8 \text{ seg.}$$

$$\varepsilon = N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = N \frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = 200 \frac{0.0162 \text{ Tm}^2}{0.8 \text{ seg}} = \frac{3.24 \text{ Tm}^2}{0.8 \text{ seg}} = 4,05 \text{ voltios}$$

$$\varepsilon = 4,05 \text{ voltios.}$$

### Ejemplo 2

Una onda electromagnética en el vacío tiene una amplitud de campo eléctrico de 220 V/m calcule la amplitud del campo magnético correspondiente.

Solución:

Sabemos que en una onda electromagnética se cumple que:

$$\frac{E_{max}}{B_{max}} = c$$

$$B_{max} = \frac{E_{max}}{c} = \frac{220}{3,00 \times 10^8} = \text{por lo tanto } B_{max} = 733 \times 10^{-9} \text{ T} = 733 \text{ nT}$$

### Ejemplo 3

Calcula el valor máximo del campo magnético de una onda electromagnética en un medio donde la rapidez de la luz es dos tercios de la rapidez de la luz en el vacío, y donde la amplitud del campo eléctrico es 7,60 mV/m.

Solución:

$$\text{Datos: } E_{max} = 7,60 \times 10^{-3} \text{ V/m; donde } c_{medio} = \frac{2}{3} c_{vacio}$$

Sabemos que en una onda electromagnética se cumple que:

$$\frac{E_{max}}{B_{max}} = c_{medio} = \frac{2}{3} c_{vacio}$$

$$B_{max} = \frac{3 E_{max}}{2 c_{medio}} = \frac{3 \times (7,60 \times 10^{-3})}{2 \times (3,00 \times 10^8)}$$

$$B_{max} = 38 \times 10^{-12} \text{ T} = 38 \text{ pT.}$$

### Ejemplo 3

El filamento de una lámpara incandescente tiene una resistencia de 150  $\Omega$  y conduce una corriente directa de 1,00 A. El filamento mide 8,00 cm de largo y 0,900 mm de radio. A) calcule el vector de Poynting en la superficie del filamento. B) encuentre la magnitud de los campos eléctrico y magnético en la superficie del filamento.

Solución:

Datos:

$$R = 150 \Omega \quad I = 1,00 \text{ A} \quad \text{Longitud} = 0,08 \text{ m} \quad \text{radio} = 0,900 \text{ mm}$$

#### Parte a

$$\text{Sabemos que } S = I = \frac{\text{Potencia}}{A_{lateral}}$$

$$\text{Entonces } S = \frac{I^2 R}{2\pi r \cdot \text{longitud}} = \frac{(1,00)^2 (150)}{2\pi r \cdot (0,9 \times 10^{-3})(0,08)}$$
$$S = 332 \times 10^2 \text{ W/m}^2 = 332 \text{ kW/m}^2 \text{ (radialmente)}$$

#### Parte b

$$\Delta v = E d$$

$$\text{Entonces } IR = E \cdot \text{Long} \quad E = \frac{IR}{\text{Long}} = \frac{(1,00)(150)}{0,08}$$

Por lo tanto  $E = 1,88 \times 10^3 \text{ V/m}$

$$\text{Luego } B = \frac{E}{c} = \frac{1,88 \times 10^3}{3,00 \times 10^8}$$

$$B = 222 \times 10^{-6} \text{ T} = 222 \text{ } \mu\text{T}$$

**Palabras claves:**

**Fem:** Es la fuerza electromotriz, es toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado.

**BIBLIOGRAFIA**

- [1]. Kirchhoff, G. R. Leyes de Kirchhoff.
- [6]. Kirchhoff, G. R. Leyes de Kirchhoff
- [3]. Rodriguez-Dominguez, A. R. (2007). Ecuaciones de fuerza de Lorentz como ecuaciones de Heisenberg para un sistema cuántico en el espacio euclidiano 4D. *Revista mexicana de física*, 53(4), 270-280.]
- [4]. Kip, A. F., José, L., Ángelo, E. J., & Juste Iribarren, L. F. (1967). Fundamentos de electricidad y magnetismo.