

INTERACCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

INTRODUCCIÓN.

Cuando Tales de Mileto (año 600 A.C.) observó la propiedad que tenía el ámbar de atraer pequeños pedazos de paja cuando se le frotaba previamente, abrió una nueva ciencia, la electricidad.

Al frotar una varilla de vidrio con un paño de seda o una de ámbar con una piel de gato, atraen cuerpos ligeros, como pedacitos de papel. Experimentando con lo que ocurría al acercar estas varillas a un péndulo formado por una pequeña esfera de corcho suspendida de un hilo de seda, se llegó a la conclusión de que por el hecho del frotamiento, ambas varillas habían adquirido una propiedad física, opuesta la una de la otra.

Fue Benjamín Franklin el primero que llamó electricidad positiva a la electricidad que aparece sobre el vidrio y negativa a la que aparece sobre el ámbar.

Actualmente se admite que la materia en su estado normal es neutra, contiene cantidades iguales de electricidad positiva y negativa. Cuando un cuerpo no es neutro se le denomina ion (catión o anión).

LEY DE COULOMB. CARGA ELÉCTRICA.

En 1785 Charles Coulomb, utilizando una balanza de torsión, midió por primera vez, cuantitativamente, las atracciones y repulsiones eléctricas entre cargas y dedujo la ley que las rige:

"La fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas eléctricas puntuales, está dirigida a lo largo de la línea que las une, es directamente proporcional al producto de dichas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa"

$$\vec{F} = k \frac{q \cdot q'}{r^2} \vec{u}_r$$

donde k es una constante de proporcionalidad que depende de las unidades elegidas para medir las magnitudes que intervienen en la fórmula y del medio en el que se encuentren las cargas.

Si las cargas son del mismo signo, la fuerza resulta positiva y \vec{F} tiene el mismo sentido que \vec{u}_r , si son de signos contrarios, la fuerza resulta negativa y \vec{F} tiene sentido contrario a \vec{u}_r .

En el SI se ha elegido como unidad de carga el culombio (C), que se define como la carga que colocada frente a otra igual, en el vacío, y a un metro de distancia se repelen con una fuerza de $9 \cdot 10^9$ N. De acuerdo con esta definición el valor de K:

$$F = 9 \cdot 10^9 \text{ N} = k \cdot \frac{1 \text{ C} \cdot 1 \text{ C}}{1 \text{ m}^2} \quad - \quad k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Como el culombio es una unidad demasiado grande se utilizan los siguientes submúltiplos:

$$1 \text{ microculombio} = 1 \mu\text{C} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ C.}$$

$$1 \text{ picoculombio} = 1 \text{ pC} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ C.}$$

$$1 \text{ u.e} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

$$3 \cdot 10^9 \text{ uee} = 1 \text{ C.}$$

Con objeto de eliminar el factor 4π que aparece en bastantes fórmulas se introduce una nueva constante ϵ (épsilon), denominada constante dieléctrica del medio o permitividad del medio.

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad - \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{q \cdot q'}{r^2}$$

En el vacío:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q'}{r^2} \quad - \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$

En otro medio:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon} = \frac{1}{4\pi\epsilon'\epsilon_0} \quad \text{siendo} \quad \epsilon' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

donde ϵ es la constante dieléctrica del medio y ϵ_r es la constante dieléctrica relativa (con respecto al vacío).

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon'} \cdot \frac{q \cdot q'}{r^2} = \frac{1}{\epsilon'} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q \cdot q'}{r^2} = \frac{F_0}{\epsilon'}$$

Por tanto si la ϵ_r del azufre es 4, significa que es 4 veces más aislante que el vacío y las fuerzas de atracción o repulsión en este medio serán 4 veces menor.

En el estudio de las cargas se admiten dos principios como esenciales: su conservación y su cuantificación.

Conservación de la carga:

En todos los procesos observados en la Naturaleza, la carga neta de un sistema aislado permanece constante.

INTENSIDAD Y LÍNEAS DE FUERZA DEL CAMPO ELECTROSTÁTICO.

Toda carga eléctrica modifica las propiedades del espacio que la rodea creando a su alrededor un campo eléctrico, que podemos definir como *"aquella zona del espacio que rodea a una carga eléctrica, en cada uno de cuyos puntos, cualquier otra carga experimenta una fuerza"*.

Definimos el vector intensidad del campo eléctrico o simplemente vector campo en un punto, como la fuerza que ejerce el campo sobre la unidad de carga positiva colocada en dicho punto.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} \quad \vec{E} = k \frac{q \cdot q'}{r^2} \vec{u}_r = k \frac{q}{r^2} \vec{u}_r$$

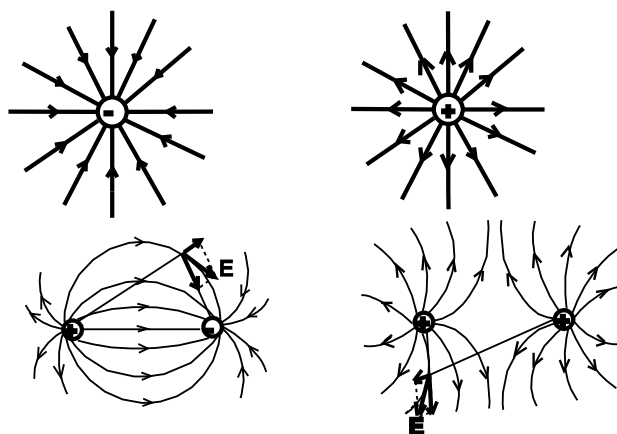
El vector campo es un vector de **origen** el punto donde se mide el campo, **dirección**: la recta que une la carga que crea el campo con el punto donde se calcula, **sentido**: aquél en que se movería una carga positiva colocada en ese punto, es decir hacia fuera del campo si la carga que crea el campo es positiva y hacia dentro si es negativa, y **módulo** el dado por la fórmula anterior.

El vector campo cumple el principio de superposición, de modo que cuando el campo es creado por varias cargas:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum \vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum \frac{q_i}{r^2} \vec{u}_{r_i}$$

Como ya sabemos el campo eléctrico se representa por las líneas de fuerza que:

- Indican la trayectoria que seguiría una carga positiva abandonada a la acción del campo.
- Son tangentes en todos sus puntos al vector campo.
- No se pueden cortar, ya que en ese punto el campo tendría dos direcciones.
- Su densidad superficial es proporcional a la intensidad del campo.
- Las líneas del campo eléctrico son abiertas, salen de las cargas positivas (**fuentes**) y van a morir a las negativas (**sumideros**).



ENERGÍA Y POTENCIAL DEL CAMPO ELECTROSTÁTICO; SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES.

Debido a que la fuerza eléctrica es central y newtoniana, el campo eléctrico es conservativo. Por tanto el trabajo realizado por la fuerza eléctrica sobre una carga q' que se desplace entre dos puntos será igual a la disminución de la energía potencial eléctrica de dicha carga.

$$W_{AB} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = - \Delta E_p = E_A - E_B \quad [1]$$

$$\Delta E_p = - \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{r} = - \int_A^B k \frac{q q'}{r^2} \vec{u}_r \cdot d\vec{r} = - k q q' \int_A^B \frac{dr}{r^2} = - q q' \left[-\frac{1}{r} \right]_A^B \quad [2]$$

$$E_{p_B} - E_{p_A} = k \frac{q q'}{r_B} - k \frac{q q'}{r_A} \quad [3]$$

Si elegimos como origen de energías potenciales el infinito, donde la interacción es nula.

$$E_{p_r} = k \frac{q q'}{r} \quad [4]$$

La energía potencial es positiva cuando las dos cargas son del mismo signo porque entre ambas existe una fuerza repulsiva, y es negativa, cuando las dos cargas son de signos distintos, ya que entonces entre ellas (al igual que ocurría en el campo gravitatorio) hay una fuerza atractiva.

Como la energía potencia depende del valor de la carga de prueba q' , podemos definir una función escalar V , a la que llamaremos potencial eléctrico, que represente la energía del campo eléctrico en cada punto, independientemente del valor de la carga q' .

Se define el potencial eléctrico en un punto, V , como la energía potencial que posee la unidad de carga positiva, colocada en dicho punto.

$$V = \frac{E_p}{q'} \quad - \quad \Delta V = \frac{\Delta E_p}{q'}, \quad 1V = \frac{1J}{1C}$$

de donde deducimos:

$$W_{AB} = - \Delta E_p = - q' \Delta V = q' (V_A - V_B)$$

Dividiendo las expresiones [1], [2], [3] y [4] por q' , obtendremos las correspondientes expresiones para el potencial.

$$V_B - V_A = k \frac{q}{r_B} - k \frac{q}{r_A}$$

La diferencia de potencial entre dos puntos representa el trabajo realizado por las fuerzas del campo para trasladar la unidad de carga positiva desde el punto de más potencial (V_1) al de menos potencial (V_2), y coincide con el trabajo que ha de realizar un agente externo, en el recorrido inverso,

en contra de las fuerzas del campo.

Si tomamos como origen de los potenciales el infinito, al cual le asignamos un valor 0, el potencial en un punto será:

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

y se puede definir como:

"El trabajo realizado por las fuerzas del campo, para trasladar la unidad de carga positiva, desde el infinito hasta ese punto."

El potencial será positivo cuando la carga que crea el campo sea positiva y negativo en caso contrario.

Si tenemos varias cargas q_1, q_2, \dots , que crean el campo eléctrico, el potencial en un punto será la suma de sus potenciales individuales:

$$V = k \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \dots \right) = k \sum \frac{q_i}{r_i} = \sum V_i$$

El campo eléctrico está dirigido hacia los potenciales decrecientes.

Si unimos los puntos que se encuentran al mismo potencial obtenemos las SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES, que para una carga puntual son esferas concéntricas con dicha carga.

Como vimos en el tema anterior, estas superficies tenían las siguientes propiedades:

1. Se definen como el lugar geométrico de los puntos que tienen el mismo potencial.
2. El trabajo necesario para mover una carga de un punto a otro de una superficie equipotencial es nulo.
3. No se pueden cortar.
4. Se representan más juntas a medida que la intensidad del campo es mayor.
5. Son perpendiculares a las líneas de fuerza.

CAMPO ELECTROSTÁTICO EN LA MATERIA; CONDUCTORES Y DIELECTRICOS.

La materia se clasifica, desde el punto de vista eléctrico, en conductora o aislante, según la cantidad de cargas móviles que presente.

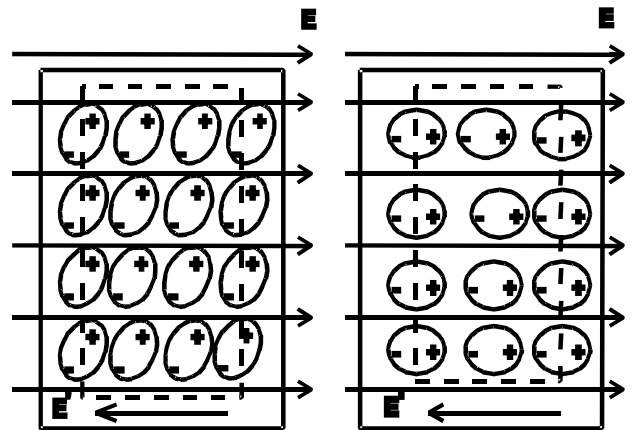
En los materiales conductores existen cargas eléctricas (electrones) que pueden moverse libremente a través del material; en los aislantes, también llamados dieléctricos, no existen electrones libres. Aunque no existen ni aislantes ni conductores perfectos, hay enormes diferencias entre la capacidad aislante de una sustancia frente a otras; así por ejemplo el cuarzo fundido es 10^{25} más aislante que el cobre, por lo tanto para muchas aplicaciones prácticas puede considerarse como un aislante perfecto.

Los conductores por excelencia son los metales. En ellos los electrones de la capa más externa (capa de valencia), que no pertenecen a ningún átomo en particular sino al cristal como un todo, pueden moverse libremente en el interior del cristal y reciben el nombre de electrones libres. El

metal no ofrece resistencia al movimiento de estos electrones, por lo que bajo la acción de cualquier campo exterior se desplazarán.

En los aislantes los electrones, aún los pertenecientes a las capas de valencia, se encuentran fuertemente ligados a sus átomos y no pueden moverse libremente en el interior del cristal.

Además de los conductores y aislantes existen otras sustancias que presentan un comportamiento intermedio entre la de los anteriores. Son los SEMICONDUCTORES. Estos elementos presentan a temperaturas muy bajas un comportamiento semejante al de los aislantes; al elevar la temperatura conducen cada vez más pero sin llegar nunca al grado de los conductores.



Al someter un dieléctrico a la acción de un campo eléctrico exterior, la fuerza eléctrica que actúa sobre las cargas hace que éstas se orienten en cierta dirección, que depende de la intensidad del campo eléctrico exterior y de la polaridad de las moléculas.

En ambos casos, el campo eléctrico exterior induce una carga en la superficie del dieléctrico, la cual crea un campo que se opone al externo, por lo que el campo eléctrico resultante en el interior del dieléctrico es siempre menor que el exterior.

Si E_0 es el campo en el vacío, el campo en el interior del dieléctrico es: $E = E_0 / \epsilon_r$, donde ϵ_r es la constante dieléctrica relativa con respecto al vacío.

Imaginemos ahora un conductor en equilibrio, no existe movimiento neto de cargas en ninguna dirección. El campo eléctrico ha de ser nulo en su interior, ya que de lo contrario sus cargas no estarían en reposo.

Si sometemos el conductor a la acción de un campo eléctrico externo aparecerá sobre cada carga una fuerza que hará que se desplacen hacia su posición de equilibrio, las positivas en el sentido del campo y las negativas en el opuesto. La gran movilidad de las cargas permite que el campo creado por ellas mismas pueda compensar el externo, de modo que el campo en el interior vuelve a anularse y se alcance de nuevo una situación de equilibrio. Por tanto la movilidad de las cargas en los conductores hacen que éstos sean impermeables al campo eléctrico, que resulta ser nulo en su interior. Como consecuencia de esto:

- a) La carga neta del conductor se distribuye en la superficie.
- b) Todos los puntos se encuentran al mismo potencial y por tanto la superficie del conductor será una superficie equipotencial.

$$\vec{E} = - \frac{dV}{d\vec{r}} \quad \text{Si } \vec{E} = 0, \quad V = cte.$$

- c) Como la superficie es equipotencial, el campo que crea el conductor será perpendicular a la superficie del conductor en todos sus puntos.

Si una vez cargado el conductor, aproximamos otro conductor hasta que toque al primero, la carga de uno pasará al otro hasta que ambos se encuentren al mismo potencial, ya que entonces el campo entre ellos se anulará.

LAS CARGAS EN MOVIMIENTO.

El magnetismo nace de la observación de que ciertas sustancias, como la magnetita, encontradas en la región de Magnesia (Asia), tenían la propiedad de atraer al hierro. Estas sustancias se llamaron imanes naturales. Más tarde se observó que otras sustancias, como el acero, adquirirían propiedades magnéticas si se les frotaba con imanes naturales, se denominaron imanes artificiales.

El estudio de los efectos magnéticos llevó a la conclusión de que en los imanes hay dos zonas, donde se manifiestan más acusadamente las propiedades magnéticas. Se las denominó polos y se les asignó arbitrariamente el nombre de norte y sur, comprobando que polos del mismo nombre se repelen y polos de nombre contrario se atraen. Hasta ahora no ha sido posible conseguir un polo aislado.

Este paralelismo entre la interacción magnética y la eléctrica llevó a los científicos a intentar relacionarlas. Fue en 1.819 cuando el físico danés Hans Christian Oersted demostró experimentalmente las acciones mutuas entre corrientes eléctricas e imanes, al observar que una aguja imantada se desvía de su posición habitual al situarse cerca de un conductor por el que circula una corriente eléctrica. Observó que una aguja magnética móvil colocada paralelamente a un conductor, se desvía en dirección perpendicular a éste.

La experiencia de Oersted puso de manifiesto que las corrientes eléctricas (cargas en movimiento), producen sobre la brújula los mismos efectos que si acercamos a ésta un imán. ¿Será debido a que los fenómenos magnéticos están producidos por cargas en movimiento?

Experiencias posteriores de Faraday, Ampère y Henry, culminadas por Maxwell, demostraron la interacción existente entre corrientes e imanes, dando lugar a la rama de la Física denominada ELECTROMAGNETISMO.

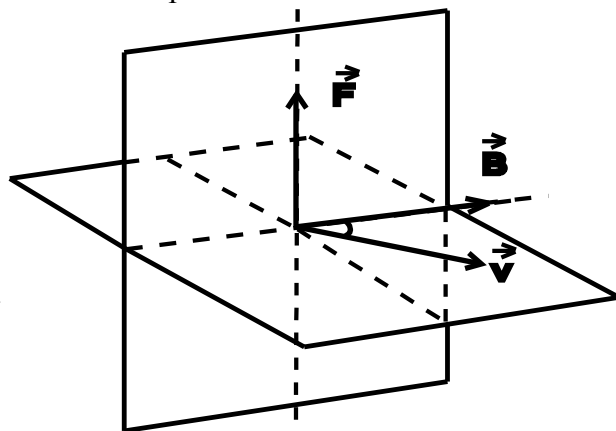
FUERZA SOBRE UNA CARGA PUNTUAL EN MOVIMIENTO (FUERZA DE LORENTZ). VECTOR INDUCCIÓN MAGNÉTICA (\vec{B}).

Admitamos que en cierta región del espacio existe un campo magnético \vec{B} que supondremos uniforme. Cuando una carga, q , que se mueve con una velocidad, \vec{v} , penetra en él, se encuentra sometida a una fuerza, \vec{F} , llamada fuerza de Lorentz, que viene dada por:

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

De la fórmula anterior, sacamos las siguientes conclusiones:

- Si $v = 0$ $\vec{F} = 0$
- Si la carga se cambia por otra de signo opuesto, la fuerza invierte su sentido.
- Si $\alpha = 0^\circ$ $\vec{F} = 0$
- Si $\alpha = 90^\circ$ $|\vec{F}| = F_{\text{máxima}} = q \cdot v \cdot B$



Esta última expresión nos sirve para definir el módulo de \vec{B} en el S.I.

$$B = \frac{F_{\text{máxima}}}{q \cdot v} ; B = N \cdot C^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s$$

La inducción magnética de un cierto campo magnético es 1 Tesla (T), si al penetrar la carga de un culombio a la velocidad de 1 m/s, perpendicularmente al campo, sufre una fuerza de 1 N. Con frecuencia se utiliza una unidad denominada gauss, siendo 1 Tesla = 10^4 gauss.

El sentido de F viene dado por la regla de la mano izquierda:

$$\text{Pulgar} \rightarrow \vec{F}, \text{Índice} \rightarrow \vec{B}, \text{medio} \rightarrow \vec{v}$$

De forma análoga al campo eléctrico, el magnético se representa por líneas de fuerza o líneas de inducción. Tienen las mismas propiedades que las del campo eléctrico, pero se diferencian de ellas en que son cerradas, salen del polo norte y llegan hasta el polo sur.

Si en esa región del espacio, además de un campo magnético, existe uno eléctrico:

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

MOVIMIENTO DE UNA PARTÍCULA CARGADA EN UN CAMPO MAGNÉTICO.

La interacción magnética, caracterizada por la fuerza, resulta ser siempre perpendicular a la velocidad y por tanto modifica únicamente su dirección, permaneciendo inalterable el módulo de la misma. Es por tanto una fuerza centrípeta.

La trayectoria de la carga, cuando penetra en un campo magnético, se verá curvada, dependiendo su curvatura del valor del campo y de la velocidad de la partícula y el sentido de giro, del signo de la carga.

Si la carga se mueve perpendicularmente al campo:

$$F_{\text{magnética}} = F_c ; q \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{r} ; r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

Las aplicaciones físicas de la fuerza de Lorentz son muy numerosas: el espectrógrafo de masas, las experiencias de Thomson para determinar la relación carga/masa del electrón, el acelerador de partículas (ciclotrón)...

Si la carga no se moviese inicialmente en una dirección perpendicular al campo magnético, podríamos descomponer el vector velocidad en dos componentes, una paralela al campo y otra perpendicular al mismo. La componente paralela al campo no se ve afectada por la fuerza de Lorentz, por lo que dicho movimiento será rectilíneo y uniforme, mientras que la componente perpendicular se verá curvada, dando como resultado de la composición de los dos movimientos un movimiento helicoidal, en forma de hélice, que es lo más habitual.

FUERZA SOBRE UN CONDUCTOR RECTILÍNEO.

Si el conductor es rectilíneo y está en un campo magnético \vec{B} , uniforme:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{L} \times \vec{B})$$

CAMPO ORIGINADO POR UNA CARGA EN MOVIMIENTO.

Los trabajos de Ampère y Laplace permitieron definir el campo magnético que crea una carga q , que se mueve con cierta velocidad \vec{v} , en un punto situado a una distancia r de ella, mediante la expresión:

$$\vec{B} = K_m \cdot \frac{q \cdot (\vec{v} \times \vec{u}_r)}{r^2} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{q \cdot (\vec{v} \times \vec{u}_r)}{r^2}$$

\vec{u}_r : vector unitario dirigido desde la carga creadora al punto.

μ : permeabilidad magnética del medio.

$$\text{En el vacío} = \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

Respecto al campo magnético, podemos distinguir tres tipos de sustancias, cuyo comportamiento es muy diferente:

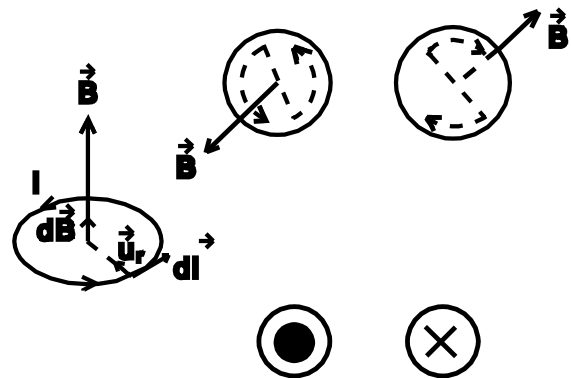
- sustancias diamagnéticas: Su permeabilidad magnética es menor o igual a la del vacío, y por tanto, el campo magnético en su interior es ligeramente inferior al que existe en el vacío (Au,Ag).
- Sustancias paramagnéticas: Su permeabilidad magnética es mayor o igual a la del vacío, y por tanto, el campo magnético en su interior es ligeramente superior al que existe en el vacío (Cr,Mn).
- sustancias ferromagnéticas: Su permeabilidad magnética es mucho mayor que la del vacío, en su interior, la intensidad del campo magnético es muchísimo mayor que en el vacío (Fe).

Al igual que el campo eléctrico, el magnético es newtoniano, pero a diferencia de él, su dirección no es radial, sino perpendicular a la vez, a la dirección de movimiento de la carga y a la dirección radial. El hecho de que sea newtoniano, permitirá seguir representándolo mediante líneas de fuerza, que ahora serán cerradas.

CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR UNA ESPIRA CIRCULAR EN SU CENTRO.

Sea una espira circular de radio r por la que circula una intensidad I en el sentido que se indica en la figura.

$$B = \frac{\mu I}{4\pi r^2} \cdot 2\pi r = \frac{\mu I}{2r}$$



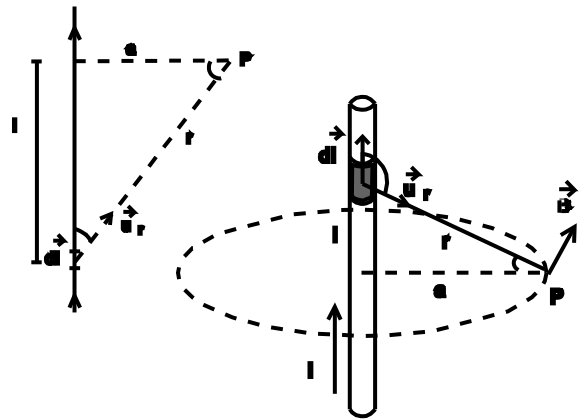
Campo magnético : hacia fuera hacia dentro

CAMPO CREADO POR UN CONDUCTOR RECTILÍNEO E INDEFINIDO.

Vamos a calcular el módulo de \vec{B} .

$$B = \frac{\mu I}{2\pi a}$$

Este resultado se conoce como la ley de Biot y Savart, que se puede enunciar:



“El campo magnético creado por una corriente rectilínea e indefinida en un punto es un vector perpendicular al plano formado por el conductor y el punto, sentido el de giro de un sacacorchos que gira como la corriente, y módulo directamente proporcional a la intensidad de la corriente e inversamente proporcional a la distancia del conductor al punto en que se mide el campo.”

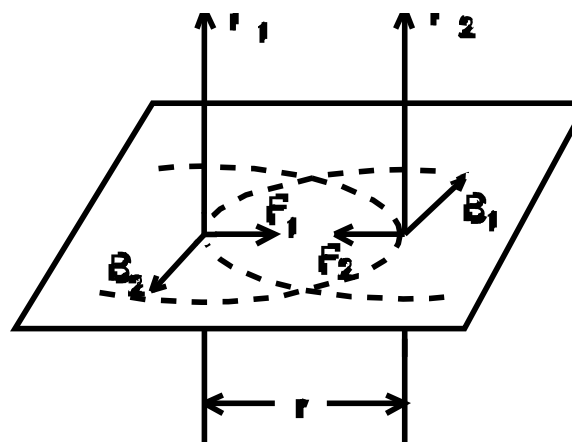
Las líneas del campo magnético forman circunferencias concéntricas con el hilo.

INTERACCIÓN ELECTRODINÁMICA ENTRE DOS CORRIENTES RECTILÍNEAS E INDEFINIDAS. DEFINICIÓN DE AMPERIO.

Si ponemos dos conductores rectilíneos paralelamente y separados por una pequeña distancia, se observan entre ellos unas fuerzas atractivas o repulsivas según que las corrientes tengan el mismo o distinto sentido. Esta fuerza es directamente proporcional a las intensidades y a la longitud de los conductores e inversamente proporcional a la distancia que los separa.

Consideremos dos conductores de longitud L , por los que circulan intensidades I_1 e I_2 y separados una distancia r .

La corriente I_1 crea a su alrededor un campo magnético, que a una distancia r , a la que se encuentra I_2 , valdrá:



$$B_1 = \frac{\mu_o \cdot I_1}{2\pi \cdot r}$$

La corriente I_2 está, por tanto, en el interior del campo B_1 , por lo que aparecerá sobre ella una fuerza de valor:

$$\vec{F}_2 = I_2 \cdot (\vec{L} \times \vec{B}_1) \quad - \quad F_2 = \mu_o \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{L}{2\pi \cdot r}$$

Del mismo modo I_2 crea a su alrededor, a una distancia r , un campo B_2 y al estar I_1 en su interior aparecerá sobre ella una fuerza F_1 .

$$B_2 = \frac{\mu_o \cdot I_2}{2\pi \cdot r}, \quad \vec{F}_1 = I_1 \cdot (\vec{L} \times \vec{B}_2) \quad - \quad F_1 = \mu_o \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{L}{2\pi \cdot r}$$

La dirección y sentido de ambas fuerzas son los que se indican en la figura. Observamos que ambas fuerzas tienen la misma intensidad y dirección, siendo de sentido opuesto, de acuerdo con la 3ª □ ley de Newton.

En la figura se observa que dos corrientes paralelas se atraen entre sí, si las intensidades tienen el mismo sentido y de igual manera se demostraría que si tienen sentidos contrarios se repelerían.

La fuerza por unidad de longitud del conductor, tanto para una corriente como para la otra, viene dada por:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_o \cdot I_1 \cdot I_2}{2\pi \cdot r}, \quad \text{si } I_1 = I_2 = I \quad - \quad \frac{F}{L} = \frac{\mu_o \cdot I^2}{2\pi \cdot r}$$

El resultado de las acciones entre corrientes paralelas tiene gran importancia, porque permite definir, de forma experimental, el amperio (A), utilizando entonces como magnitud fundamental la intensidad en lugar de la carga.

"Se define el amperio como la intensidad de corriente que circulando en el mismo sentido por dos conductores rectilíneos y paralelos, separados una distancia de 1 m. en el vacío, determina entre ellos una fuerza atractiva de $2 \cdot 10^{-7}$ N. por cada metro de longitud"

Admitiendo como unidad fundamental de medida el amperio, el culombio resulta ser la cantidad de carga que atraviesa en un segundo una sección de conductor por la que circula una corriente de un amperio.

FLUJO DEL CAMPO MAGNÉTICO. INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.

Como sabemos, siempre que un campo es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, el flujo del mismo a través de una superficie representa el número de líneas de fuerza que atraviesan dicha superficie.

Se define el flujo magnético:

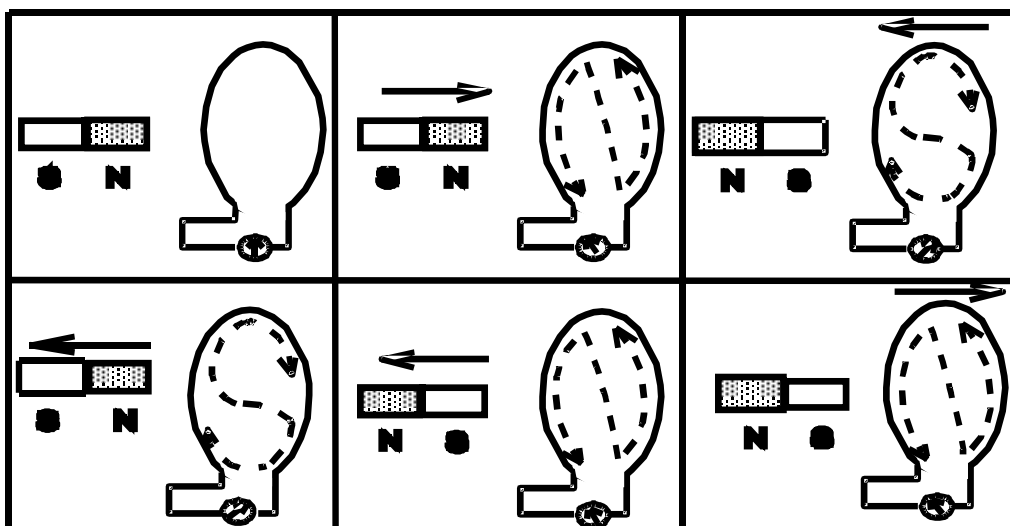
$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int B \cdot dS \cdot \cos\alpha$$

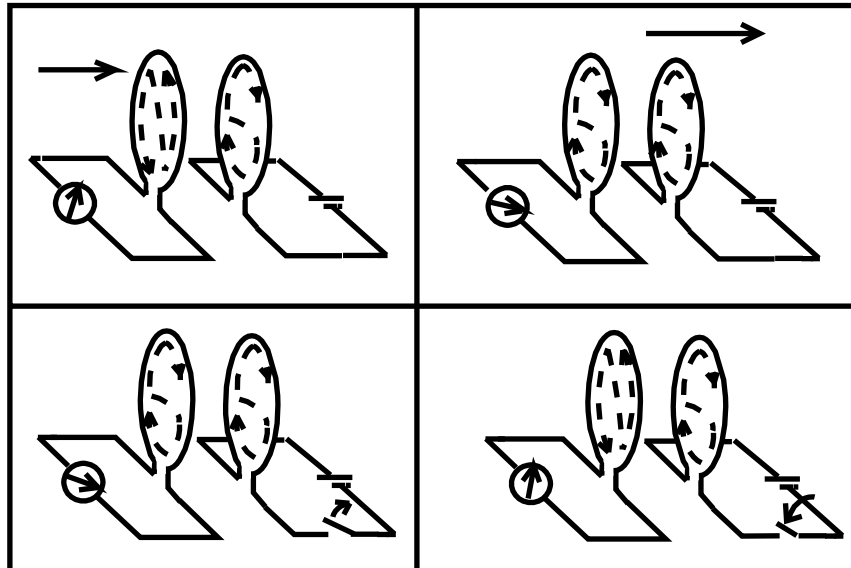
La unidad de flujo magnético en el S.I. es el weber (Wb) y equivale a un T/m². Por ello, en ocasiones se utiliza como unidad del campo magnético el weber.m².

Otra unidad usada es: 1 Maxwell = 1 Gauss/cm²; 1 Wb = 10⁸ maxwell.

Al estudiar el flujo que atraviesa una superficie cerrada, hemos obtenido para el campo gravitatorio y eléctrico el teorema de Gauss. En el caso del campo magnético, al no existir polos magnéticos aislados, todas las líneas de fuerza que salen vuelven a entrar al interior de la superficie, por lo que el flujo neto a través de ésta, debe ser nulo en todo momento:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$





En 1.830, Faraday en Inglaterra y Henry en Estados Unidos iniciaron una serie de investigaciones dirigidas a generar corrientes eléctricas a partir de campos magnéticos, llegando ambos en 1.931 a conclusiones semejantes: los campos magnéticos bajo ciertas condiciones, son capaces de generar corrientes eléctricas y por tanto campos eléctricos.

Puesto que la investigación de Faraday y Henry iba encaminada a la detección de corrientes, es lógico pensar que necesitasen un aparato que pudiese detectar el paso de corriente. Por sencillez podemos pensar en una espira y un galvanómetro intercalado en la misma, tal como se indica en las figuras. De los experimentos que realizaron sacaron las siguientes conclusiones:

- La mera presencia de un campo magnético (imán, por potente que sea) no induce ninguna corriente en el circuito.
- Si movemos la espira se induce corriente, mientras mantenemos el movimiento de la espira. Asimismo el sentido de la corriente cambia cuando invertimos el sentido del movimiento de la espira.
- Si movemos el imán, los resultados son análogos a cuando movíamos la espira.

Si en lugar de un imán recurrimos a otros campos magnéticos, como los creados por alguna corriente, obtenemos los mismos resultados: siempre que haya movimiento de la espira o del circuito se obtiene corriente inducida. Incluso hay un caso en el que se genera corriente inducida sin que haya movimiento. Ello ocurre durante un intervalo muy corto de tiempo, al conectar y desconectar el circuito que genera el campo magnético.

A las corrientes que se generan así se denominan corrientes inducidas y al conjunto de fenómenos que hemos visto, fenómenos de inducción.

FUERZA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA. LEY DE FARADAY.

El gran mérito de Faraday y Henry consistió en observar que el hecho común a todas las experiencias anteriores, en las que aparecen corrientes inducidas, es que existe una variación del flujo magnético con el tiempo, a través del circuito en el que aparecen dichas corrientes.

La ley de Faraday dice:

" La fuerza electromotriz inducida en un circuito es igual al valor negativo de la rapidez con que está cambiando el flujo magnético que atraviesa el circuito "

$$\varepsilon = - \frac{d \Phi}{d t} \quad \varepsilon = - N \frac{d \Phi}{d t} = - \frac{d (N \Phi)}{d t} \text{ para } N \text{ espiras}$$

Recordemos que la f.e.m. se define como el trabajo realizado por unidad de carga, para que circule corriente por el circuito y se mide en el S.I. en voltios.

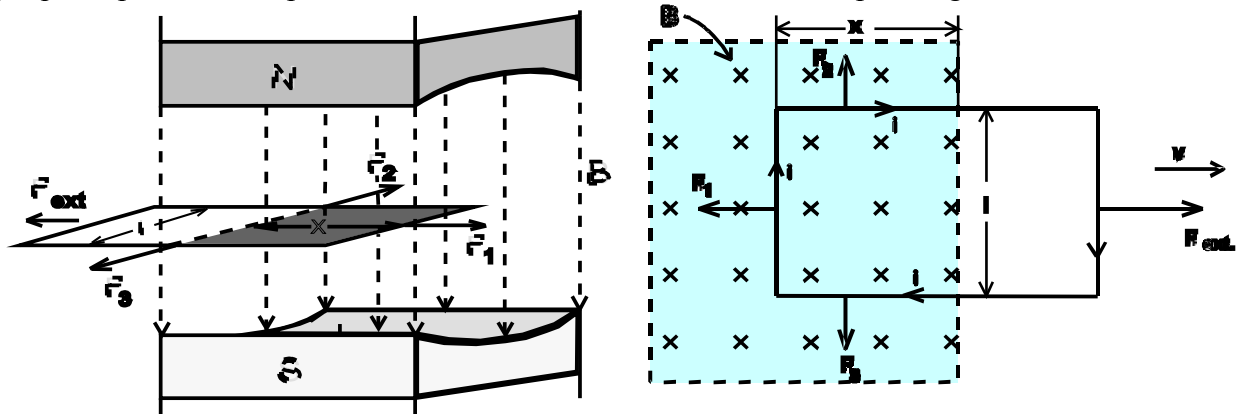
$$\mathcal{E} = dW/dq.$$

El flujo magnético a través de la espira en el instante correspondiente a la figura es:

$$\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = B \int_S \vec{i} dS = B \cdot S = B \cdot l \cdot x$$

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \{ \vec{S} = \vec{i}$$

ya que la parte de la espira situada fuera del imán no es atravesada por ninguna línea de fuerza.



Al extraer la espira una distancia dx, el flujo experimenta una disminución que viene dada por dΦ, siendo dΦ/dt la rapidez con que varía:

$$d \Phi = - B \cdot l \cdot dx \quad \frac{d \Phi}{d t} = - \frac{B \cdot l \cdot dx}{d t} = - B \cdot l \cdot v$$

y por tanto de acuerdo con la ley de Faraday, podemos afirmar que la f.e.m. inducida en el circuito

es:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = B \cdot l \cdot v$$

La f.e.m. produce una corriente en la espira $i = \varepsilon/R$, siendo R la resistencia de la espira. Esta corriente tiene el sentido que se indica en la figura, de modo que se oponga a la variación de flujo que la produjo.

Al mismo resultado podríamos haber llegado por consideraciones energéticas: Cuando se mueve la espira, circula por ella una corriente inducida de intensidad I , por lo que sobre cada uno de los lados de la espira situados en el interior del campo aparecerá una fuerza, debida al campo magnético:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \cdot \vec{B}, \quad F_1 = I \cdot l \cdot B \cdot \text{sen } 90 = I \cdot l \cdot B, \quad F_2 = I \cdot x \cdot B, \quad F_3 = I \cdot x \cdot B$$

Las fuerzas F_2 y F_3 se anulan mutuamente por ser iguales y de sentidos opuestos. Sobre el lado menor actúa F_1 , que será la que necesitamos vencer para que la espira se desplace con velocidad constante. Energéticamente hablando, el trabajo externo realizado se transforma en energía eléctrica de la corriente inducida.

Para mantener una velocidad constante, debemos realizar un trabajo externo cuya potencia es:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{F \cdot dx}{dt} = F \cdot v = I \cdot l \cdot B \cdot v$$

que será precisamente la potencia de la corriente inducida en el circuito

$$P = \varepsilon \cdot I \quad \varepsilon = l \cdot B \cdot v$$

siendo ε la f.e.m. inducida e I la intensidad de la corriente que circula.

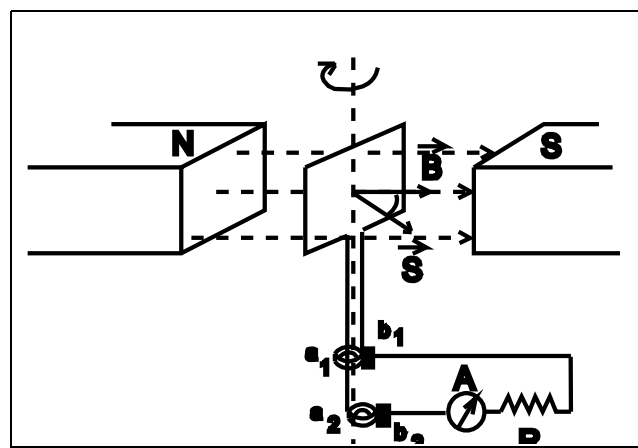
El signo negativo de la ley de Faraday indica cuál debe ser el sentido de la corriente inducida, sin embargo fue Lenz quien en 1834 describió de forma concreta y precisa, cómo determinar dicho sentido, al enunciar la ley que lleva su nombre:

" El sentido de la corriente es tal, que por sus efectos electromagnéticos, tiende a oponerse a la causa que la produce."

En realidad la ley de Lenz es otra forma de enunciar el principio de conservación de la energía. Si la corriente inducida de la fig. 1.2 tuviera otro sentido, la cara de la espira enfrentada al polo N del imán, se comportaría como un polo S, atrayendo al imán. Realizaría trabajo sobre el imán al mismo tiempo que se produce una corriente eléctrica, originando más trabajo. Estaríamos creando energía de la nada. Esto no es posible.

FUNDAMENTO DE LA GENERACIÓN DE CORRIENTE ALTERNA.

El alternador o generador de corriente alterna más sencillo lo constituye una espira rectangular que gira con velocidad



angular ω constante en un campo magnético uniforme \vec{B} . Los extremos de la espira están soldados a dos anillos, a_1 y a_2 , que giran con la misma, y mediante dos escobillas, b_1 y b_2 , se toma la corriente para su utilización en la resistencia R del circuito exterior. Esta corriente cambia de sentido cada vez que el cuadro pasa por una posición normal al campo magnético, como puede comprobarse si aplicamos la ley de Lenz. El período de la corriente alterna coincidirá con el de rotación de la espira.

Al girar la espira, el flujo que la atraviesa variará con el tiempo, pues aunque \vec{B} y \vec{S} son constantes (suponemos la espira indeformable), no lo es el ángulo que forman, α . De acuerdo con la ley de Faraday:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt} = - \frac{d(B \cdot S \cdot \cos \alpha)}{dt} = - B \cdot S \cdot \frac{d(\cos \alpha)}{dt}$$

Si originalmente los vectores \vec{B} y \vec{S} están orientados en el mismo sentido ($\alpha = 0$), el ángulo que formarán dichos vectores al cabo de cierto tiempo será: $\alpha = \omega \cdot t$ y por tanto:

$$\varepsilon = - B \cdot S \cdot \frac{d(\cos \omega \cdot t)}{dt} = B \cdot S \cdot \omega \cdot \text{sen } \omega t = \varepsilon_o \cdot \text{sen } \omega t \quad (\varepsilon_o = B \cdot S \cdot \omega)$$

- El valor de la f.e.m. varía con el tiempo, a su valor en un instante determinado se le denomina f.e.m. instantánea.
- Su valor varía periódicamente, siendo su período $T = 2\pi/\omega$ y su frecuencia $f = 1/T = \omega/2\pi$.
- Su valor máximo es $\varepsilon_o = B \cdot S \cdot \omega$, que resulta ser directamente proporcional a la velocidad angular de giro.
- Su signo cambia dos veces a lo largo de un período; por tanto la corriente inducida cambia de sentido $2 \cdot f$ veces por segundo.

Si en el circuito existe una resistencia R , estará recorrida por una intensidad sinusoidal cuyo valor en cada instante es:

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\varepsilon_o \text{sen } \omega t}{R} = I_o \text{sen } \omega t$$

La intensidad de la corriente alterna no significa, como en la continua, el flujo o paso de electrones siempre en el mismo sentido a través de una sección de un conductor. Por el contrario, la corriente alterna consiste en una vibración de muy pequeña amplitud de los electrones y de período T , es decir, se trata de un movimiento ondulatorio de los electrones en el seno del metal.

Dado que los efectos de la corriente alterna son debidos a la propagación de dicho movimiento ondulatorio, entendemos por paso de la corriente alterna la propagación de dicha onda por el conductor.

APÉNDICE I. TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA. TRANSFORMADORES.

La gran importancia industrial de las corrientes alternas reside en la facilidad y economía con que permiten transportar energía eléctrica.

En los primeros tiempos de la electricidad la energía eléctrica se consumía en las proximidades del generador que la producía y entonces la corriente continua era universalmente empleada. Pero al

resultar indispensable el transportar la energía eléctrica a grandes distancias, las pérdidas energéticas experimentadas a lo largo de la conducción debido al efecto Joule:

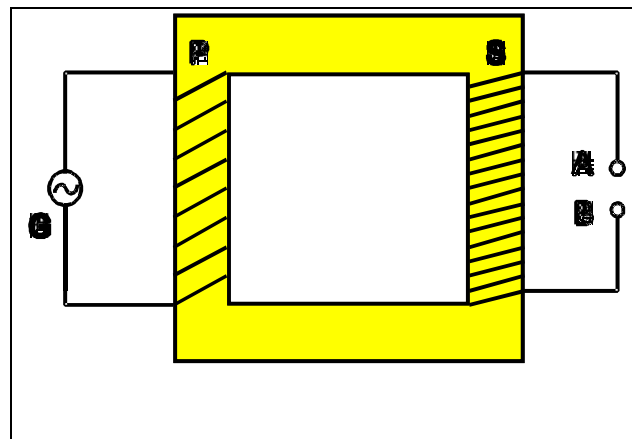
$$Q (J) = I^2 \cdot R \cdot t = I^2 \cdot \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot t$$

obligaron a recurrir a la corriente alterna.

Se podían disminuir las pérdidas energéticas aumentando el grosor de los cables, pero no era viable económicamente.

Utilizando la corriente alterna es posible, mediante el uso de transformadores, transportar la electricidad a elevado potencial y reducirlo luego para el consumo al potencial deseado. Como la potencia eléctrica $P = I \cdot V$, a igualdad de potencia transportada, cuanto mayor sea V menor será I , y en consecuencia las pérdidas de acuerdo con la ley de Joule, menores, permitiendo además utilizar conductores de menor sección que si se tratara de corriente continua.

Un transformador consiste esencialmente en dos arrollamientos de hilo conductor que con frecuencia están devanados sobre un mismo núcleo de hierro y aislados entre sí. Cuando se aplica una f.e.m. al circuito primario, P , la corriente que pasa por él produce la imantación del hierro.



Debido a las especiales características magnéticas del hierro, el mismo flujo que pasa a través de P , lo hace también a través del secundario, S , en donde se inducirá una f.e.m., que será proporcional al número de espiras existentes en dicha bobina:

$$\frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_S} = \frac{n_P}{n_S}$$

Esta corriente es aprovechada uniendo los bornes A y B del secundario a un circuito de utilización.

Aplicando el principio de conservación de la energía:

$$\varepsilon_P \cdot I_P = \varepsilon_S \cdot I_S \quad \frac{I_P}{I_S} = \frac{n_S}{n_P}$$

es decir los valores de las intensidades en el primario y en el secundario están en razón inversa al número de espiras respectivas.

En un transformador que eleve la tensión $n_P < n_S$ y por lo tanto I_S es menor que I_P ; lo contrario ocurre en un transformador que reduzca el voltaje.

1. Determinar el campo eléctrico creado por un dipolo en un punto que equidista de las cargas.
2. Entre dos láminas planas y paralelas cargadas existe un campo eléctrico uniforme. Se abandona un electrón en la lámina cargada negativamente. Si la distancia entre las láminas es de 3 cm. y el campo eléctrico vale 800 N/C, calcular:
 - 2.1. El tiempo que tarda el electrón en llegar a la lámina positiva;
 - 2.2. La velocidad que tiene al llegar a esa lámina.Datos: carga del $e^- = -1.6 \cdot 10^{-19}$ C; masa del $e^- = 9.11 \cdot 10^{-31}$ Kg
3. Dos cargas puntuales $q_1 = 40$ nC y $q_2 = -30$ nC se encuentran situadas a 10 cm la una de la otra:
 - 3.1. calcular el potencial:
 - 3.1.1. En un punto A situado en el punto medio del segmento que las une;
 - 3.1.2. En un punto B situado a 8 cm de q_1 y a 6 cm de q_2 .
 - 3.2. Calcular el campo eléctrico en A y en B.
 - 3.3. Calcular el trabajo necesario para transportar la carga $q = 25$ nC de B a A.
4. El potencial eléctrico en un punto del eje OX tiene por ecuación: $V(x) = X^2 - 3X$. Calcular la intensidad del campo eléctrico en el punto $x = 4$ m.
5. La constante dieléctrica relativa del agua es 80. Si dos cargas situadas en el vacío a 1 m de distancia se repelen con una fuerza F. ¿A qué distancia habrá que colocarlas en el agua para que lo hagan con la misma fuerza?
6. En el punto O, cuyo vector posición es $r_0 = 2\mathbf{i} + 3\mathbf{j}$ m, se encuentra una carga puntual de $50 \mu\text{C}$. Calcular el vector intensidad de campo eléctrico en el punto cuyo vector posición es $r = 8\mathbf{i} - 5\mathbf{j}$ m.
7. En los vértices de un cuadrado de lado 1 m, se colocan cargas eléctricas de valores: $q_1 = 1$, $q_2 = 2$, $q_3 = 3$ y $q_4 = 4 \mu\text{C}$. Encontrar el valor del campo eléctrico y el potencial en el centro del cuadrado.
8. Dos cargas negativas iguales, de $1 \mu\text{C}$, están situadas sobre el eje de abscisas, separadas una distancia de 20 cm. A una distancia de 50 cm sobre la vertical que pasa sobre el punto medio de la línea que las une se abandona una carga de $1 \mu\text{C}$ positiva, de masa 1 g, inicialmente en reposo. Determinar la velocidad que tendrá al pasar por el punto medio de la línea de unión.
9. Calcular la fuerza que actúa sobre un electrón que se mueve con velocidad de 10.000 Km/s en una trayectoria circular en un plano perpendicular a un campo magnético de 5 N/A m.
10. Hallar el campo magnético (inducción magnética) producido por una corriente rectilínea de $I = 10$ A en un punto que dista $r = 5$ cm en el aire.
11. Calcular el campo magnético creado en el centro de una bobina plana de $N = 50$ espiras recorridas por una corriente $I = 10$ A. Radio medio de la espira $R = 10$ cm.
12. Dos alambres paralelos que distan entre si 10 cm llevan corrientes de sentido contrario de 50 A. Calcular:

- 12.1. El campo en un punto equidistante de ambas y coplanario;
 - 12.2. La fuerza de repulsión de los alambres por unidad de longitud.
13. Por un conductor de 0,5 m de longitud situado en el eje OY pasa una corriente de 1 A en el sentido positivo del eje. Si el conductor está dentro de un campo magnético que vale $\mathbf{B}=0,010\mathbf{i}+0,030\mathbf{k}$ T, calcular la fuerza que actúa sobre el conductor.
 14. Un e- de 1 eV de energía gira en una órbita circular plana y horizontal dentro de un campo magnético uniforme $B=0,0001$ T dirigido perpendicularmente de arriba hacia abajo. Se pide:
 - 14.1. El radio de la órbita;
 - 14.2. El periodo de la órbita.
 15. En una región donde hay un campo eléctrico $\mathbf{E}=1000\mathbf{k}$ V/m y un campo magnético $\mathbf{B}=0,5\mathbf{j}$ T entra un protón perpendicularmente a ambos campos y se observa que no se desvía. Determinar la velocidad del protón.
 16. Dos espiras conductoras de radios iguales a 4π cm, dispuestas en ángulo recto una respecto a la otra con centro común O, están recorridas por intensidades 6 y 8 A. Calcular el módulo y la dirección de \mathbf{B} en el punto O.
 17. Un electrón se mueve en círculos de 0,5 m de radio perpendicular a un campo magnético uniforme $B=2,5$ T. Determinar:
 - 17.1. La velocidad angular del electrón;
 - 17.2. El periodo del movimiento;
 - 17.3. La energía que posee en MeV.
 18. La misma corriente circula por dos conductores paralelos separados 0,12 m. Se repelen con una fuerza de $6 \cdot 10^{-8}$ N/m determinar:
 - 18.1. El valor de la corriente;
 - 18.2. La fuerza que ejercen sobre otro conductor equidistante y coplanario por el que circula una intensidad de 0,2 A.
 19. Un electrón con una velocidad de 10^6 m/s, entra en una región en la que hay un campo magnético. Por efecto de éste, el e⁻ describe una trayectoria circular de 0,1 m de radio. Determinar el valor de la intensidad del campo así como también la velocidad angular del electrón.
 20. Una espira cuadrada de 10 cm de lado puede girar alrededor del eje z, en el seno de un campo magnético uniforme de 0,1 T, dirigido en el sentido positivo del eje de abscisas (X). En cierto instante la espira forma un ángulo α con el eje y. Calcular:
 - 20.1. Calcula el valor del flujo que atraviesa la espira para los siguientes valores de α : 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 180° ;
 - 20.2. Si se supone que la espira gira a razón de π radianes por segundo, encontrar una expresión que nos proporcione el valor del flujo en función del tiempo, suponiendo que la espira empieza a girar cuando $\alpha=0^\circ$.

21. Una espira rectangular posee un lado móvil que se desplaza por el interior de un campo magnético uniforme de 1 T, con una velocidad constante de 1 m/s, debido a un agente externo. Inicialmente la espira tiene 1 m de altura por 0,3 m de anchura que va aumentando progresivamente. Las líneas de campo son perpendiculares al plano de la espira. Calcular:
- 21.1. El valor de la fem inducida en la espira;
 - 21.2. La intensidad de corriente que circula por el lado móvil sabiendo que la resistencia de la espira es de 1Ω .
22. Una espira de alambre de $0,25 \text{ m}^2$ de área se encuentra en un campo magnético uniforme de 0,05 T. Calcular el valor máximo que tomará el flujo.
23. Por un hilo circula una corriente de 50 A. Coplanario a él, a una distancia de 1 m, tenemos una espira de 4×1 metros con el lado mayor paralelo al conductor. Encontrar el valor del flujo magnético creado por la corriente a través de la espira. ¿Cómo ha de moverse la espira si queremos que se produzca una corriente inducida?
24. En un campo magnético uniforme \mathbf{B} , que varia sinusoidalmente, $B=0,2\text{sen}(wt)$, hay una bobina plana de 100 espiras y radio $r=4$ cm. El eje de la bobina forma un ángulo de 60° con la dirección del campo; calcular la fem inducida sabiendo que la velocidad angular es de 25π rad/s.
25. Una bobina plana cuadrada de 10 espiras y de lado 12 cm gira con velocidad angular constante en un campo magnético de 3 T. Se pide determinar la velocidad de rotación si la fem máxima es de 2,4 V.
26. Una varilla de masa $m=140$ g y longitud $l=30$ cm descansa en una superficie horizontal y por ella pasa una corriente de intensidad $I=12$ A. Cuando se aplica un campo magnético vertical de $1,3 \cdot 10^{-2}$ T la varilla empieza a deslizarse por la superficie. Determinar:
- 26.1. El coeficiente estático de rozamiento entre la varilla y la superficie;
 - 26.2. El trabajo que realizan las fuerzas del campo magnético para desplazar la varilla 1 m.
27. Se aplica una tensión de 220 V al circuito primario de un transformador que contiene 1100 espiras y circula por él la intensidad de 45 mA. Si el secundario posee 50 espiras, calcular: a) La tensión del secundario; b) La intensidad del secundario.
28. Tres cargas están colocadas sobre tres esquinas de un cuadrado. Cada lado del cuadrado mide 30 cm. Calcula el valor de la intensidad de campo eléctrico en la cuarta esquina.
29. Una pequeña bolita metálica cargada cuelga de un hilo aislante en una zona en la que hay un campo eléctrico horizontal uniforme de $2 \cdot 10^5$ N/C. Calcular la carga de la bolita si su masa es de 10 gramos y forma un ángulo con la vertical de $15'$ en el equilibrio.
30. Dos placas metálicas muy grandes están separadas una distancia de 1 cm, y se mantienen a una diferencia de potencial de 100 V. a) Calcular la intensidad de campo eléctrico en la región situada entre las placas. b) ¿Qué trabajo se requiere para llevar una partícula con carga de $6 \mu\text{C}$ desde la placa de potencial más alto hasta la otra placa?
31. Un protón entra en un campo magnético de densidad de flujo $1,5$ Wb/m² con una velocidad de $2 \cdot 10^7$ m/s formando un ángulo de 30° con las líneas de campo. Calcúlese la fuerza que actúa

sobre el protón.

32. Dos alambres largos y paralelos están separados 10 cm y llevan una corriente de 6 A y 4 A. Calcúlese la fuerza que actúa sobre un metro de alambre, si las corrientes son paralelas.
33. Una bobina circular de 50 espiras tiene un radio de 3 metros. Está orientada de tal forma que las líneas de campo son perpendiculares al área de la bobina. Supón que el campo magnético varía de tal manera que se incrementa de 0.1 0 T a 0.3 5 T en 2 milisegundos. Encontrar la fem inducida en la bobina.