



Conceptos previos

Electricidad y magnetismo

La unidad "Electricidad y magnetismo" es en este nivel una continuación y profundización de los contenidos ya estudiados por ti en la unidad "La electricidad" de Primer Año Medio. Puede ser aconsejable que antes de estudiar lo que sigue repases los conceptos de **Carga y corriente eléctrica**, **Magnetismo y fuerza magnética** y **La energía eléctrica** del Módulo 1 de Primero medio.

Aquí nos ocuparemos de los siguientes temas: *Fuerza entre cargas*, *Circuitos de corriente variable* y *Ondas electromagnéticas*. En Primero medio estudiamos las fuerzas eléctricas de un modo más bien cualitativo; aquí las veremos en forma cuantitativa. De la corriente eléctrica solamente estudiamos la continua, aquí veremos los efectos de las corrientes que varían en el tiempo, particularmente el caso de la corriente alterna y en circuitos más complejos. Las ondas electromagnéticas, a las cuales también nos referimos en las unidades "Ondas y sonido" y "Naturaleza de la luz", de Primero Medio, serán abordadas aquí desde el punto de vista de su generación y recepción, centrando la atención en las ondas radiales.

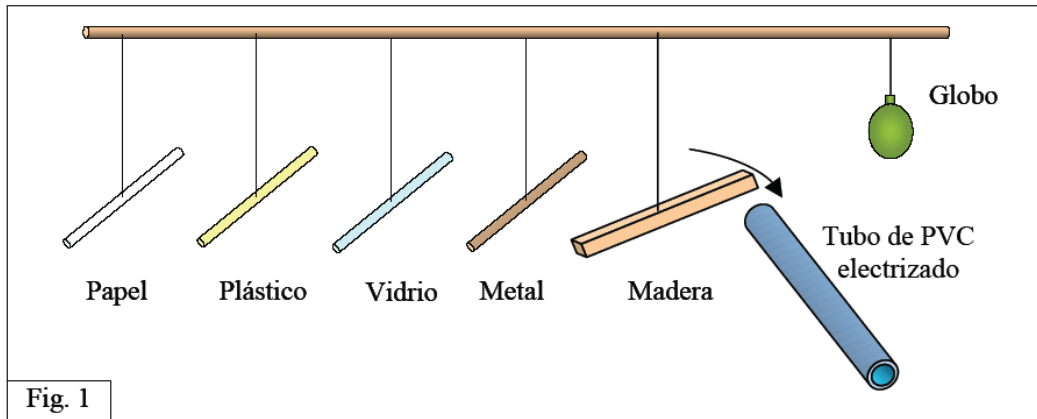
I. Fuerzas entre cargas

1) Interacción entre cargas

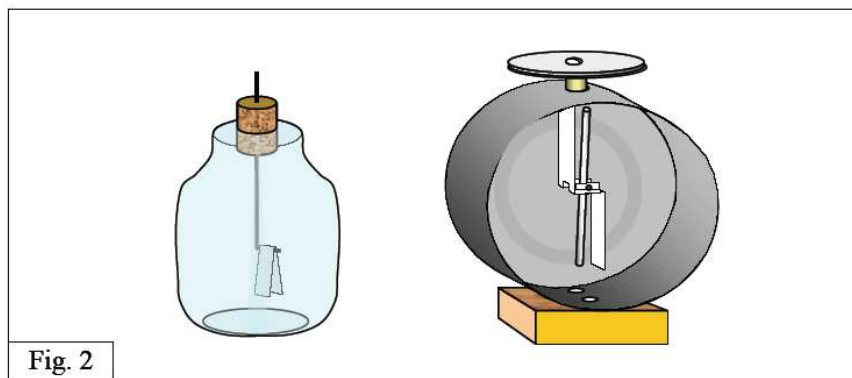
Caracterización del fenómeno eléctrico

La materia es esencialmente eléctrica, pues está constituida por átomos y éstos poseen cargas negativas y positivas. Normalmente los objetos que nos rodean se encuentran eléctricamente neutros, debido a que dichas cargas se encuentran en igual cantidad. Sin embargo, cuando frotamos dos objetos este equilibrio se rompe y los fenómenos eléctricos se manifiestan como atracciones, repulsiones y flujo de corriente en forma de chispas.

Posiblemente conoces muchos casos en que la electricidad estática está presente. Si cuelgas diferentes objetos, tales como papel, plástico o vidrio, según se ilustra en la figura 1, al acercarlos una peineta o un tubo de PVC que ha sido previamente frotado con lana o con tu pelo, podrás poner en evidencia las fuerzas eléctricas. Si solo acercas el objeto electrizado a las varillas colgantes, verás atracciones. Si con el cuerpo electrizado electrizas algunos de los cuerpos colgantes, al acercarlo nuevamente, verás repulsiones.



Una manera de estudiar efectos como los anteriores de un modo más riguroso es por medio de un instrumento simple denominado "electroscopio". Lo esencial en todo electroscopio son dos materiales aislados eléctricamente del entorno y buenos conductores conectados entre sí a través de una unión que actúe como bisagra. Al menos uno de ellos debe ser móvil y muy liviano. Al electrizarse el conjunto la repulsión entre ellos los separará, contrariamente a lo que intenta la fuerza de gravedad, poniendo en evidencia la presencia de carga eléctrica en todo el sistema. Estos instrumentos pueden tener aspectos como los que se ilustran en la figura 2.



Estos electroscopios, u otros semejantes, los puedes construir tú mismo y estudiar con ellos los métodos de electrización por contacto y por inducción.

Los materiales en que estas cargas se pueden movilizar con facilidad los denominamos *conductores eléctricos*. Por el contrario, malos conductores o *aisladores eléctricos*, son materiales en los que las cargas eléctricas encuentran gran dificultad de desplazamiento. Cuando electrizamos objetos por frotación, contacto, inducción u otro método, lo que hacemos es separar cargas eléctricas.

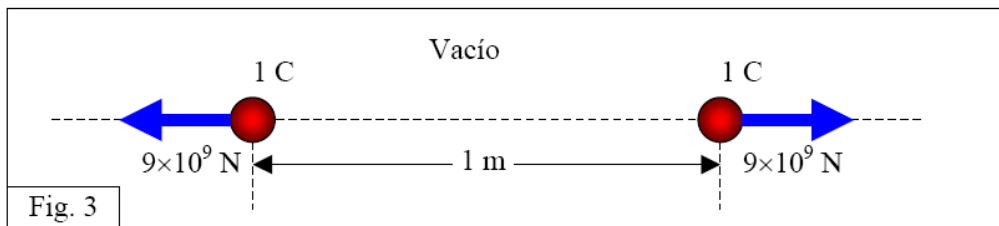
La ley de Coulomb

Si designamos por q_1 y q_2 a dos cargas puntuales (muy pequeñas en relación a la distancia r entre ellas), la expresión para su fuerza de interacción es:

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad [1]$$

Esta expresión es conocida como "Ley de Coulomb" en honor a su descubridor. Si las cargas se expresan en coulomb (C) y las distancias en metros (m), la fuerza está expresada en newton. k es una constante cuyo valor depende del medio en que se encuentren las cargas. En el vacío es aproximadamente $9 \times 10^9 \frac{\text{newton} \times \text{metro}^2}{\text{coulomb}^2}$, en el agua, 80 veces mayor, $7,2 \times 10^{10} \frac{\text{newton} \times \text{metro}^2}{\text{coulomb}^2}$, etc.

La figura 3 ilustra la definición de la unidad de carga eléctrica, el coulomb (C).



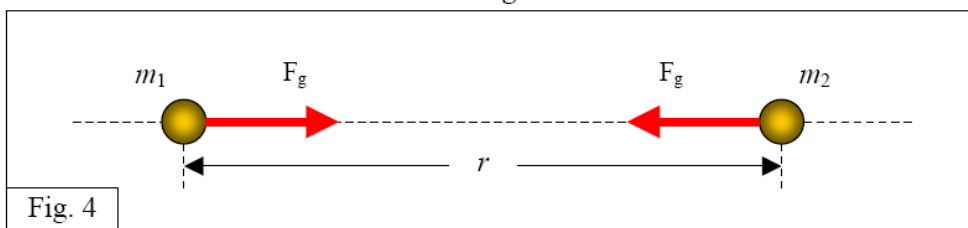
Sobre la ley de Coulomb hay que tener presente los siguientes hechos cuando la utilices en la resolución de un problema:

- Se aplica a cargas puntuales; es decir, a cargas cuyos tamaños son despreciables frente a la distancia que las separa. Si se trata de objetos electrizados como los que se ilustran en las figuras 1 y 2, no podemos aplicar la fórmula [1] directamente.
- Hay que tener presente que la fuerza eléctrica (como toda fuerza) es una magnitud vectorial, razón por la cual hay que sumarlas como tales.
- Las fuerzas eléctricas actúan a distancia, son de igual magnitud y dirección, pero tienen sentidos opuestos. Son evidentemente pares del tipo acción-reacción.
- Según [1] la fuerza eléctrica es directamente proporcional al producto de las cargas; es decir, $F_e \propto q_1 q_2$ e inversamente proporcional a la distancia r que las separa; es decir, $F_e \propto \frac{1}{r^2}$ y también depende del medio en que estén inmersas, pues la constante k depende del medio.
- Si $F_e > 0$ se trata de una fuerza de repulsión, q_1 y q_2 son de igual signo. Si $F_e < 0$ se trata de una fuerza de atracción, q_1 y q_2 son de signos opuestos.

Otro hecho de gran significación que hay que considerar en relación a la ley de Coulomb son sus semejanzas y diferencias con la ley de gravitación universal de Newton; es decir:

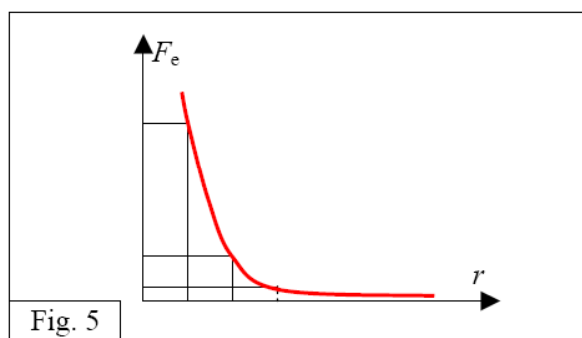
$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad [2]$$

En esta expresión m_1 y m_2 son dos masas puntuales, por ejemplo, las de la Tierra y la Luna o la de la Tierra y una manzana. F_g es la fuerza gravitacional con que se atraen cuando se hallan a una distancia r . G es la constante de gravitación universal ($\approx 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{kg}^2}$).



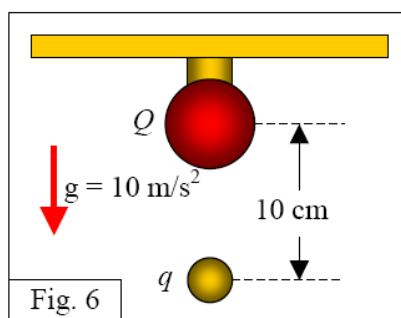
Ambas expresiones [1] y [2] son formalmente idénticas. Las dos dan cuenta de una fuerza de la naturaleza, en los dos casos dicha fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r y ambas son directamente proporcionales al producto de algo, pero ese algo para [1] son las cargas eléctricas y para [2] las masas. Además de esta última diferencia hay que destacar que, mientras las fuerzas eléctricas pueden ser de atracción o repulsión, según el signo de las cargas, la fuerza gravitacional es siempre atractiva, pues hasta donde sabemos, hay un solo tipo de masa. Por último, en relación a las constantes de proporcionalidad, mientras k depende del medio en que se hallen las cargas, G es una constante de las que en física denominamos "universales", pues no dependen de ningún otro factor.

Que la fuerza eléctrica F_e existente entre dos cargas puntuales sea inversamente proporcional a la distancia r que las separa, es un hecho importante que hay que tener en cuenta de un modo especial. Si la distancia entre dos cargas se duplica, entonces la fuerza eléctrica entre ellas se reduce no a la mitad, sino a la cuarta parte. Esta dependencia de la fuerza en función de la distancia se expresa en el gráfico de la figura 5.



Con el propósito de ilustrar algunas de las cosas que hemos dicho sobre la fuerza eléctrica, analicemos un problema.

Supón que hay en el techo una carga Q positiva de 2×10^{-5} C. Se desea sostener en el aire una carga q , cuya masa es de 90 g, a una distancia de 10 cm, según se ilustra en la figura 6. Considerando la aceleración de gravedad igual a 10 m/s^2 y la constante de la ley de Coulomb en el aire igual a la del vacío:



a) ¿Cuál debe ser la carga eléctrica de q ?

Para sostener q (en equilibrio) la fuerza eléctrica que le ejerce Q (de atracción) debe ser de igual valor al peso de q , pero con sentido opuesto. De inmediato se ve que q debe ser negativa.

Si m es la masa de q y r la distancia que la separa de Q , de centro a centro, para poder considerarlas puntuales, entonces se puede escribir:

$$k \frac{Qq}{r^2} = mg, \text{ de donde se concluye que } q = \frac{mgr^2}{kQ}.$$

Según la información dada en el problema, tenemos que:

$$m = 90 \text{ g} = 0,09 \text{ kg}$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$r = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$$

$$Q = 2 \times 10^{-5} \text{ C}$$

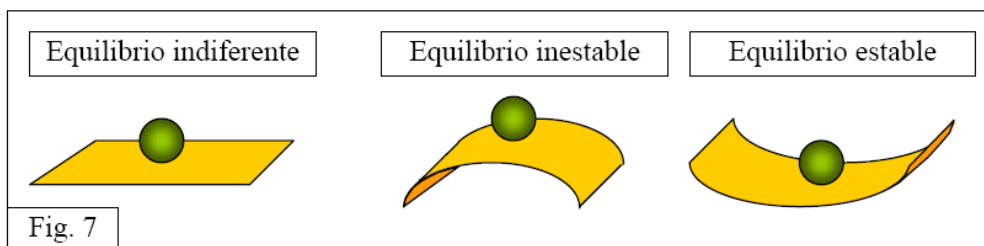
$$k = 9 \times 10^9 \frac{\text{N} \times \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Reemplazando y calculando se resuelve que: $q = 4,5 \times 10^{-8} \text{ C}$.

Como habíamos visto que q tenía que ser negativa, entonces su valor debe ser $q = -4,5 \times 10^{-8} \text{ C}$.

b) ¿A qué tipo de equilibrio está sometida q ?

Podemos considerar tres posibles tipos de equilibrio: *estable*, *inestable* e *indiferente*, explicados en la figura 7.



Ahora bien, si q se mueve ligeramente hacia Q , la fuerza eléctrica que ejerce sobre ella será mayor que el peso de q , y acelerará hacia arriba. Si q se mueve un poco hacia abajo, la fuerza eléctrica se reducirá y ganará el peso de q , la cual acelerará hacia abajo. Es claro entonces que el tipo de equilibrio al que se encuentra sometido q es de tipo inestable.

Campo eléctrico

Un concepto de gran importancia en el marco del tema que estamos tratando es el de *campo eléctrico*. La esencia de la noción de campo consiste en atribuirle propiedades al espacio. En otras palabras, diremos que en el espacio que rodea a una o más cargas existe un campo eléctrico, y para cada punto de dicho espacio definiremos una intensidad del campo eléctrico, la cual señala lo que le ocurriría a una pequeña carga colocada en él. Esta intensidad del campo eléctrico en un punto la designamos con la letra \vec{E} y corresponderá al cociente entre la fuerza eléctrica que actúa sobre una carga de prueba q_0 (positiva, por convenio) y el valor de dicha carga, es decir:

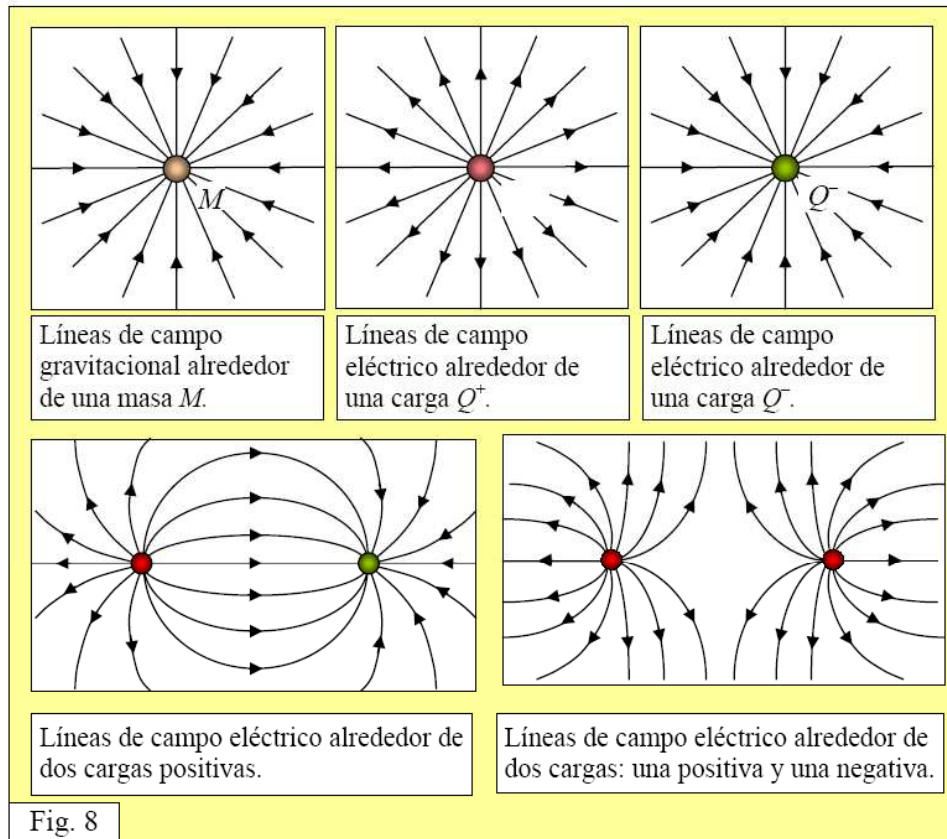
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} . \quad [3]$$

Esta magnitud es vectorial (igual que la fuerza), y posee la dirección y sentido de la fuerza eléctrica que actúa sobre una carga positiva. Su unidad en el Sistema Internacional es el $\frac{\text{newton}}{\text{coulomb}}$. Que la carga de prueba q_0 sea pequeña

significa que no altera significativamente a las cargas que generan el campo eléctrico ni tampoco al campo en dicho espacio. Haciendo una analogía, la expresión [3] opera como un termómetro que pretende medir la temperatura en un punto de cierto ambiente: esperamos que el termómetro que usemos para ello no afecte demasiado la temperatura de dicho lugar.

En el caso mecánico hay un concepto análogo que nos es muy familiar: el de *intensidad del campo gravitacional* (g). Corresponde a $\vec{g} = \frac{\vec{F}_g}{m}$, en que m es la masa de un cuerpo pequeño y F_g su peso o la fuerza de gravedad que actúa sobre él.

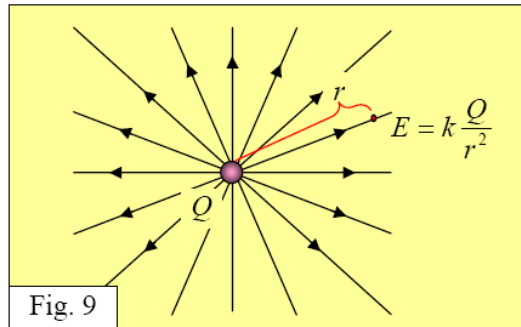
Ambos campos (el eléctrico y el gravitacional) guardan una serie de similitudes. Pueden ser representados por líneas con flechas que, en el caso del campo eléctrico, señalan el sentido de la fuerza que actúa sobre cargas eléctricas positivas. La figura 8 ilustra las líneas de campo para diferentes situaciones.



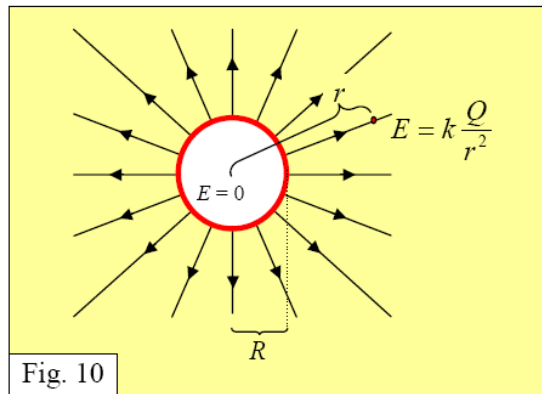
Por otra parte, como se indica en la figura 9, si imaginamos que se coloca una carga de prueba q_0 , a una distancia r de una carga Q , la fuerza sobre ella, según [1] es: $F_e = k \frac{Qq_0}{r^2}$. Al dividir por q_0 en ambos miembros, encontramos que la intensidad del campo eléctrico resulta ser:

$$E = k \frac{Q}{r^2}. \quad [4]$$

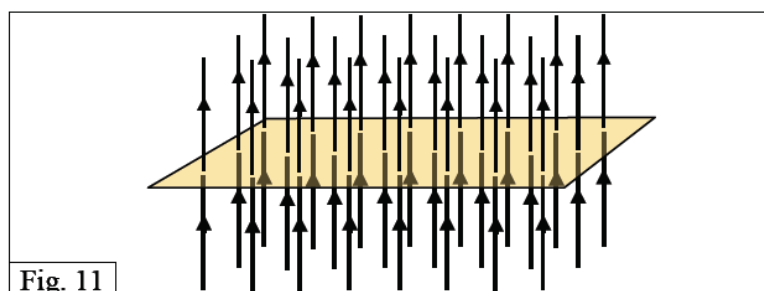
Debes advertir que E no depende de la fuerza que actúa sobre q_0 ni del valor de q_0 .



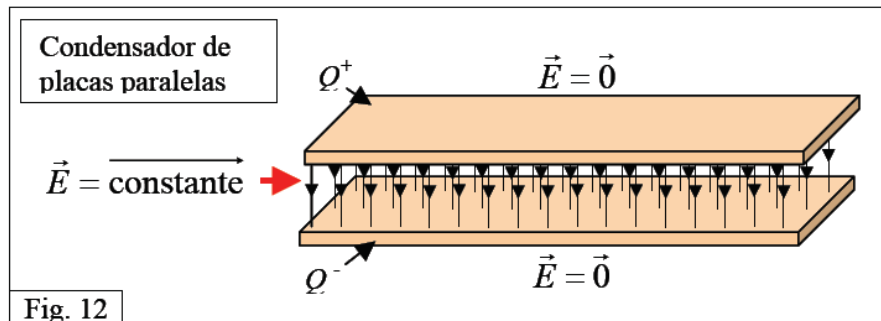
Es interesante notar que si la carga Q está distribuida uniformemente en una superficie esférica de radio R , entonces, para distancias a contar del centro tales que $r > R$, $E = k \frac{Q}{r^2}$, es decir, el campo es igual al que existiría si la carga estuviese en el centro. Compara con la expresión [4]. Pero si $r < R$, entonces $E = 0$, vale decir, dentro de la esfera el campo eléctrico es nulo. Esta situación se ilustra en la figura 10.



Así como la intensidad del campo gravitacional en las proximidades de la superficie terrestre resulta ser prácticamente constante, también el eléctrico, en situaciones similares, puede considerarse homogéneo. Esto ocurre en las proximidades de una lámina uniformemente cargada. La intensidad de campo eléctrico a cada lado de la superficie, como se ilustra en la figura 11, es prácticamente la misma en dirección, sentido y módulo. La deformación del campo en los bordes la podemos obviar.



Si dos superficies planas muy extensas están uniformemente electrizadas y con cargas de signo opuesto Q^+ y Q^- , fuera de ellas el campo eléctrico es prácticamente nulo y en el interior homogéneo, igual como lo es el campo gravitacional en una habitación. Este dispositivo eléctrico se denomina *condensador de placas paralelas* y es de una gran utilidad práctica. La figura 12 ilustra el campo eléctrico en un condensador eléctrico. Sus aplicaciones las estudiaremos un poco más adelante.



Potencial eléctrico o voltaje

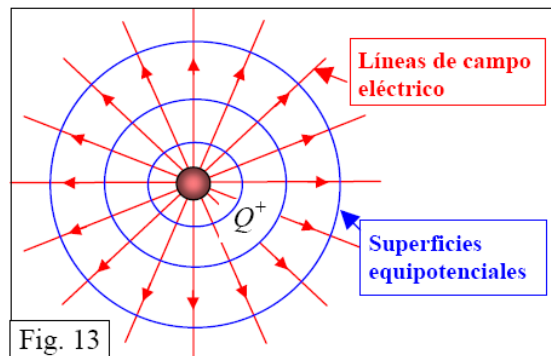
Otro concepto de gran importancia y utilidad es el de *potencial eléctrico*. El potencial eléctrico V de un punto del espacio es, en relación a otro (definido como de potencial cero $V = 0$), igual a la razón entre la energía E que se requiere para transportar una carga de prueba q_0 (sin que cambie su energía cinética) y el valor de dicha carga, es decir:

$$V = \frac{E}{q_0}. \quad [5]$$

Se trata de una magnitud escalar cuya unidad en el Sistema Internacional es el volt = $\frac{\text{joule}}{\text{coulomb}}$. Es importante que no confundas los símbolos con que representamos aquí la energía (E) y la intensidad de campo eléctrico (E).

La diferencia de potencial entre dos puntos del espacio en que exista un campo eléctrico no depende de E ni de q_0 y, en general, tampoco depende de la trayectoria por donde se traslade esta carga.

Resulta de gran utilidad considerar los puntos que poseen igual potencial. Estos puntos corresponden a las que denominaremos *superficies equipotenciales*. Debes notar que las líneas de campo eléctrico son en todo punto perpendiculares a las superficies equipotenciales. En los esquemas de las figuras 13, 14 y 15 se ilustran casos de interés; en rojo las líneas de fuerza y en azul las zonas equipotenciales. En la figura 13 el caso de una carga puntual, en la figura 14 el de dos cargas puntuales y en la 15 el caso de un condensador de placas paralelas.



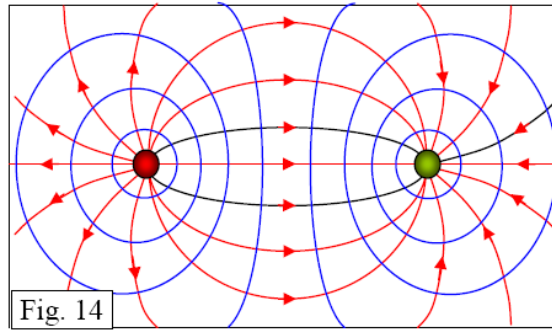


Fig. 14

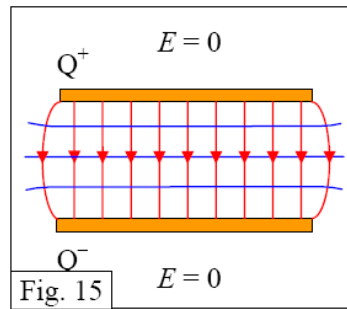


Fig. 15

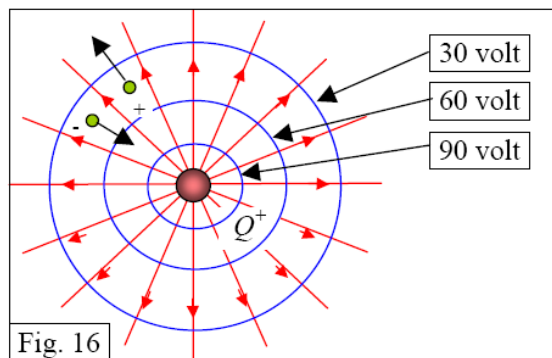
El potencial V a una distancia r de una carga Q , considerando el potencial cero en el infinito, es:

$$V = k \frac{Q}{r}, \quad [6]$$

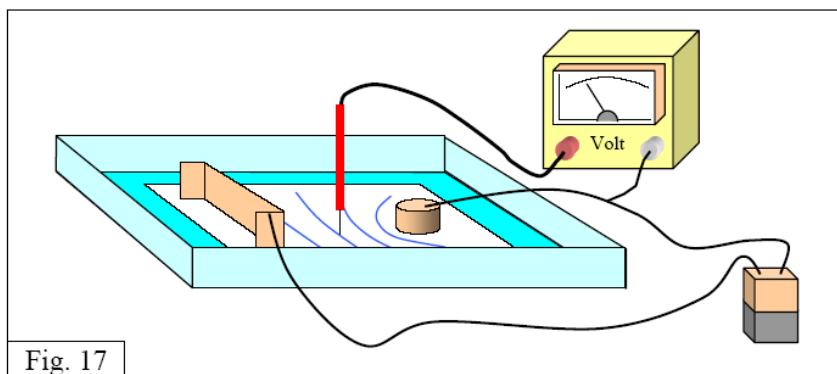
o sea, es inversamente proporcional a r y no a r^2 .

Hay que tener en consideración los siguientes hechos:

- Si examinas la figura 16 verás que las cargas positivas libres de moverse en un campo eléctrico se desplazarán hacia las zonas de menor potencial, mientras las negativas escalan hacia los potenciales mayores.
- Si colocamos en reposo una carga en un punto del campo eléctrico y la soltamos, ella acelerará en cierta dirección, al igual que un lápiz que cae libremente en un campo gravitacional. Es decir, el sistema proporcionará cierta energía.
- Para mover una carga en sentido opuesto a la fuerza que le produce el campo es necesario proporcionar energía al sistema.



Una manera de visualizar las zonas equipotenciales es la que se propone en un montaje experimental simple como el que se ilustra en la figura 17. Con la punta de prueba de un voltímetro podrás explorar una hoja de papel humedecido con una solución de agua y sal de mesa, cuando has aplicado a los electrodos el voltaje proporcionado por una batería. Cuando muevas la punta de prueba sin que cambie lo que indica el voltímetro estarás moviéndolo por una zona equipotencial. Puedes probar también cambiando la distancia, las posiciones y las formas de los electrodos. Además podrás deducir, para cada caso, las formas de las líneas del campo eléctrico.



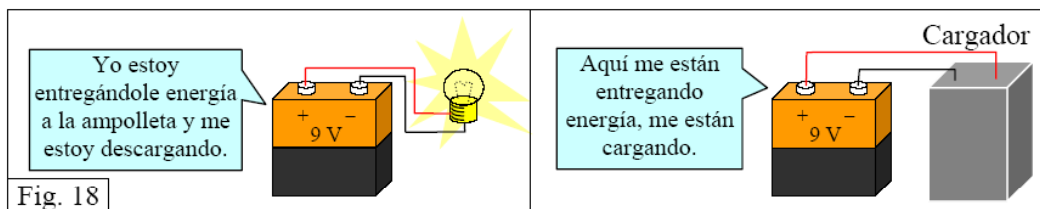
Hay muchos dispositivos que proporcionan diferencias de potencial eléctrico; es decir, mueven las cargas que están libres de hacerlo, proporcionando energía. Esto es lo que hace una pila eléctrica o batería cuando enciende la luz de una linterna. En cambio, cuando recargamos una pila o batería, hacemos la operación opuesta: se entrega energía al sistema.

¿Qué significa entonces que entre los contactos de una batería eléctrica exista una diferencia de potencial de, por ejemplo, 9 volt?

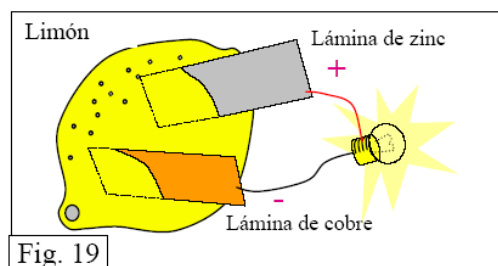
La pregunta tiene dos respuestas posibles:

- La batería proporciona 9 joule de energía por cada coulomb de carga eléctrica que haga circular por el circuito al que se conecte.
- Para cargar la batería es necesario suministrarle 9 joule por cada coulomb de carga que se haga circular por ella.

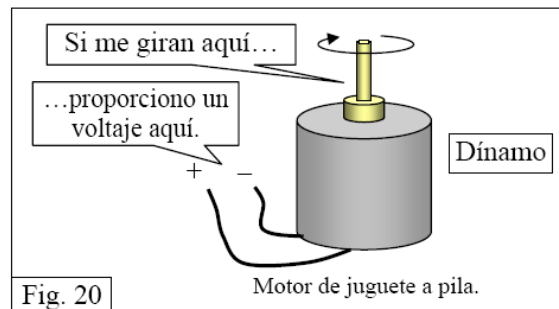
Estas ideas se ilustran en la figura 18.



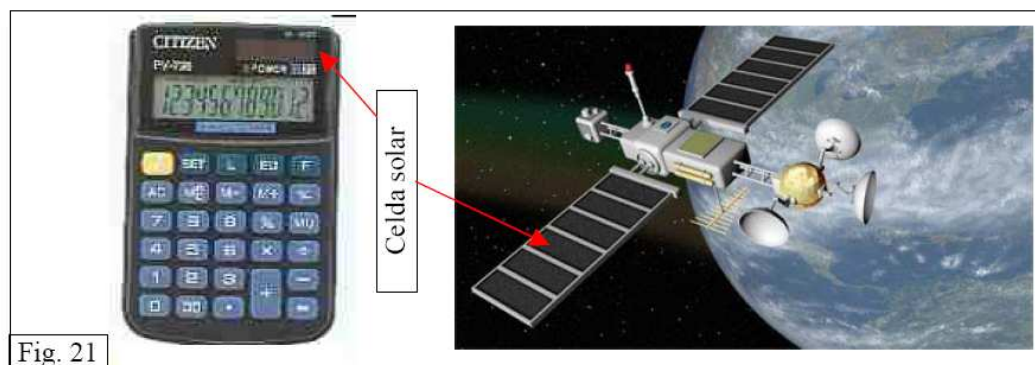
Alejandro Volta (1745 – 1827) es conocido por haber inventado la pila eléctrica o pila voltaica. Hay muchas versiones modernas de ella en el mercado y las empleamos con frecuencia para proporcionarles energía eléctrica a linternas, relojes, calculadoras, etc. Ellas transforman energía química en eléctrica. Esto es también lo que ocurre entre una lámina de cobre y una de zinc (bien limpias) enterradas en un limón, como se muestra en la figura 19. En efecto, si haces el experimento podrás apreciar la aparición de una diferencia de potencial al conectar las láminas a un voltímetro. Incluso podrás encender una ampollita pequeña. La diferencia de potencial que proporciona en estas circunstancias un limón es de 1,5 volt.



Otro artefacto importante que produce el mismo efecto, es decir, proporcionar un potencial eléctrico o voltaje, es la dínamo. Este es un dispositivo que convierte la energía mecánica en eléctrica. Su aspecto es el de un motor; mas aun, ciertos motores, como los que usan juguetes a pila, se comportan como dínamos, es decir, al girar su eje producen un voltaje entre sus contactos, según se ilustra en la figura 20. Si puedes, verificalo.



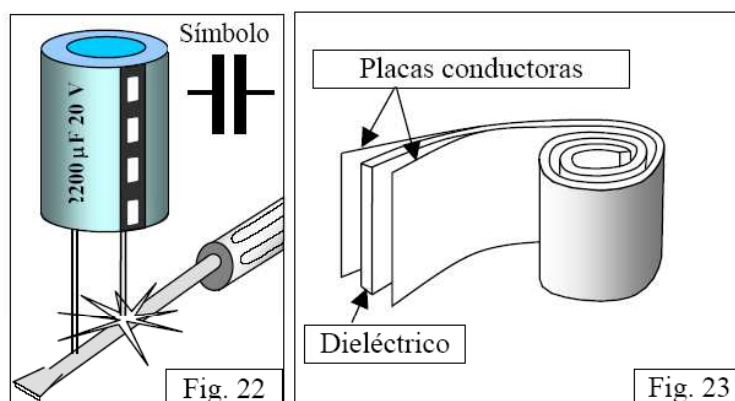
También las celdas solares, que convierten la energía de la luz en eléctrica, proporcionan un voltaje que permite el funcionamiento de calculadoras y de satélites artificiales, como se ilustra en la figura 21.



Sin duda, la fuente de potencial que más usamos es la que hay en los enchufes de la red domiciliaria. En nuestro país el voltaje es de 220 volt. A este caso le dedicaremos más adelante una especial atención.

2) Condensadores eléctricos

Los condensadores eléctricos, como se dijo antes, consisten en dos láminas conductoras paralelas separadas por un aislante o dieléctrico (aire, papel mica, etc.). Su importancia radica en que tienen la capacidad de almacenar energía eléctrica. Ellos están presentes en variados circuitos eléctricos y electrónicos. Hay muchos tipos diferentes, pero los podemos clasificar en fijos y variables. Los primeros suelen presentar aspectos como el que se presenta en la figura 22, que corresponde a un condensador electrolítico. Su forma cilíndrica se debe a que las láminas, en este caso separadas por un papel, están enrolladas del modo que se sugiere en la figura 23. El símbolo genérico con que se representa, que también se indica en la figura 22, es fácil de recordar si se sabe cómo están hechos.



Este dispositivo es peligroso si no se maneja correctamente. Si en un condensador electrolítico, como el que se ilustra en la figura 22, se sobrepasa el voltaje que especifica el fabricante o si se conecta con la polaridad invertida (el fabricante señala la polaridad de sus contactos), puede explotar y dañar a quien lo está manipulando. Al condensador se le puede aplicar un voltaje máximo de 20 volt. Si se carga con una batería de unos 12 volt, se puede descargar uniendo sus contactos con un conductor, como el destornillador que se muestra en la figura 22. Con esto, se aprecia una espectacular chispa que pone en evidencia la capacidad del dispositivo de almacenar energía.

La capacidad C de un condensador se define como:

$$C = \frac{Q}{\Delta V}, \quad [7]$$

en que Q es la carga de una de sus placas y ΔV el voltaje entre ellas. Esta capacidad no depende de Q ni de ΔV . Depende del área de las armaduras que se enfrentan, del dieléctrico que las separa y de la distancia entre ellas.

Debes tener presente que, cuando el condensador está cargado, su carga neta es 0.

La unidad del Sistema Internacional con que se mide la capacidad se denomina *farad*(*k*); según la expresión [7]: $\frac{\text{coulomb}}{\text{volts}} = \text{farad}$, o F. Por tratarse de una unidad muy grande, normalmente se emplea el *micro farad* (μF). Debes tener presente que $1 \mu\text{F} = 10^{-6}$ F. El condensador de la figura 21 posee una capacidad de $2200 \mu\text{F}$.

La energía U almacenada por un condensador de capacidad C es:

$$U = \frac{1}{2} CV^2, \quad [8]$$

en que V es el voltaje aplicado a sus placas.

La expresión [8] es fácil de recordar si se asocia con la energía cinética.

Analicemos un ejemplo:

Un condensador de 2200 F se conecta, por algunos segundos, a 20 volt y luego se desconecta.

a) ¿Qué energía tiene almacenada?

Para responder a esto basta reemplazar los valores en la expresión (7). Esto nos indica que dicha energía es de $0,44 \text{ joule}$. Con esta energía podemos elevar un cuerpo de 1 kg a una altura de casi 5 cm . No parece ser mucha energía, pero en un circuito eléctrico puede producir interesantes efectos.

b) ¿Qué carga adquirió cada una de sus placas?

Si consideramos la expresión (6) encontramos que dicha carga es $Q = 0,044 \text{ coulomb}$. También parece una carga pequeña, pero la chispa que veremos al conectar los contactos del condensador a un destornillador (como en la figura 22), será bastante grande.

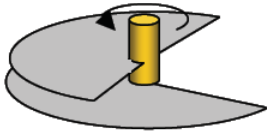
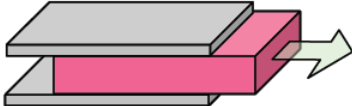
Como se indica en las figuras 12 y 15, el campo eléctrico en el espacio existente entre las placas de un condensador es prácticamente homogéneo. Si imaginamos una carga q_0 que acelera desde una de las placas del condensador a la otra, la energía que adquiere debido a la fuerza que le aplica el campo será $U = Fd$, en que d es la separación entre las placas. Como $F = Eq_0$ y el voltaje entre las placas $V = \frac{U}{q_0}$, obtenemos una importante relación:

$$V = Ed \quad [9]$$

Entonces, si por ejemplo tenemos un condensador de placas paralelas separadas por una distancia de 1 mm, ¿cuál será la intensidad del campo eléctrico en su interior si las placas están sometidas a un voltaje de 20 volt?

De la expresión [9] tenemos que $E = \frac{V}{d}$, por lo tanto, $E = 20.000 \text{ N/C}$

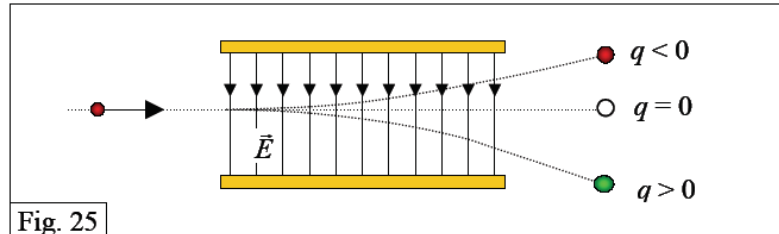
Los condensadores variables se caracterizan porque su capacidad C puede modificarse en forma mecánica girando una perilla. También los hay de muchos tipos, pero los más comunes logran este efecto modificando las áreas enfrentadas de sus armaduras, como se ilustra en la figura 23, o moviendo el dieléctrico que existe entre sus placas, como se ilustra en la figura 24.

<p>Fig. 23</p>  <p>Al girar una placa respecto de la otra, cambia la capacidad C del condensador.</p>	<p>Fig. 24</p>  <p>Al desplazar el dieléctrico cambia la capacidad C del condensador.</p>
---	--

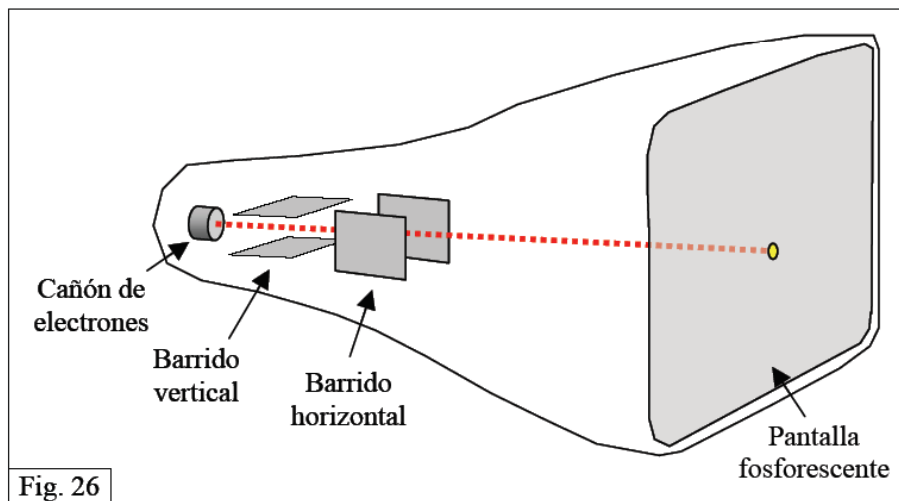
Más adelante veremos algunas aplicaciones de los distintos tipos de condensadores.

3) Movimiento de cargas en un campo eléctrico

Un condensador que emplea por dieléctrico el vacío es usado con frecuencia para desviar cargas eléctricas o para analizar las cargas y masas de partículas lanzadas perpendicularmente al campo eléctrico existente entre las placas. Un haz constituido por diferentes partículas atómicas o subatómicas se separará del modo que se indica en la figura 25. La fuerza eléctrica desviará solo a las partículas que poseen carga eléctrica.



Este efecto encuentra una gran utilidad en el tubo de imagen de los osciloscopios y televisores. Un cañón, en el fondo del tubo al vacío, lanza un chorro de electrones que es desviado por dos sistemas deflectores: el barrido vertical y el horizontal, según se ilustra en la figura 26.



Cargando y descargando las placas de los barridos vertical y horizontal del modo adecuado, se puede desviar el chorro de electrones a cualquier punto de la pantalla, donde los electrones al incidir forman un punto de luz.

Modificando la intensidad del haz de electrones se pueden conseguir puntos más y menos luminosos, y formar así una imagen.

Si el efecto es lo suficientemente rápido como para que nuestros ojos no alcancen a percibir el punto en movimiento, en la pantalla el ojo verá una imagen.

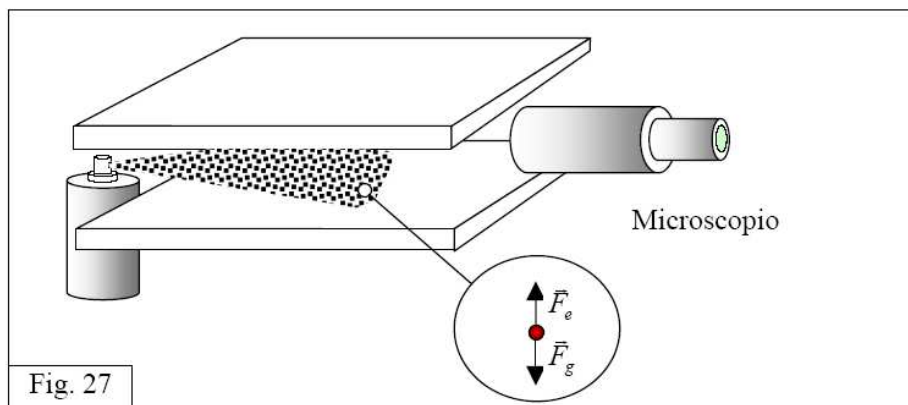
Los televisores convencionales logran un efecto similar, pero desviando el haz de electrones por medio de campos magnéticos, tema que se verá a continuación.

El célebre experimento realizado por Robert Millikan, conocido también como el experimento de la gotita de aceite, es una aplicación científica interesante del sistema de placas paralelas (o condensador), del que damos a continuación una breve descripción apoyados por la figura 27.

Pensemos en una gotita de aceite que llega a la zona en que existe un campo eléctrico de módulo E . Como posiblemente se ha electrizado por fricción, adquirirá cierta carga q , y actuará sobre ella una fuerza eléctrica $F = Eq$. Si m es la masa de la gotita, su peso será $F_g = mg$ y, si la fuerza eléctrica y gravitacional se equilibran, sobre la gotita la fuerza total será 0.

Cuando esto ocurra la gota será detenida por la viscosidad del aire. Esto sucederá cuando $Eq = mg$. Si en el experimento podemos variar la intensidad del campo eléctrico y conocemos la masa de la gotita de aceite, es posible determinar su carga, según $q = \frac{mg}{E}$. Básicamente esto es lo que hicieron

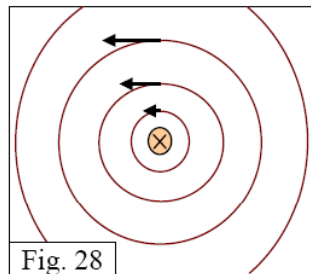
Millikan y su equipo: midieron las cargas eléctricas de miles de gotitas de aceite. Lo espectacular fue el resultado: los valores obtenidos eran todos múltiplos de $1,6 \times 10^{-19}$ C, y no había ninguna carga con valor inferior a este. Es decir, este experimento puso en evidencia que la carga eléctrica estaba cuantizada y corroboró el valor de la carga eléctrica elemental, la del electrón y la del protón.



4) Movimiento de cargas en un campo magnético

Como se recordará de lo estudiado en Primer Año Medio, Hans Christian Oersted (1777-1851) descubrió que una corriente en un conductor afecta a una aguja magnética. También sabemos que sobre un conductor inmerso en un campo magnético actúa una fuerza cuando circula por él una corriente eléctrica, y conocemos la utilidad de estos efectos en el funcionamiento de parlantes, dínamos, motores, etc.

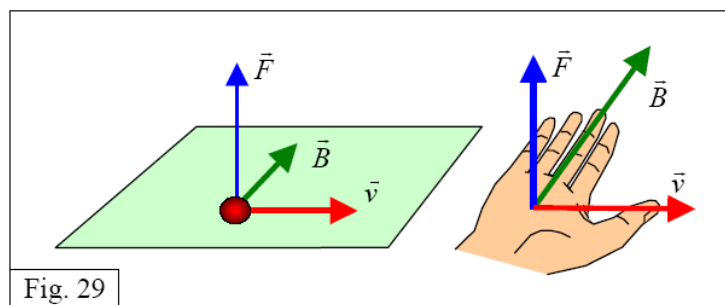
Ahora bien, si consideramos que una corriente eléctrica, por ejemplo en un alambre de cobre, corresponde a electrones en movimiento, es simple concluir que el campo magnético se origina cuando las cargas eléctricas se mueven y que deben actuar fuerzas sobre cargas eléctricas que se mueven en un espacio en que hay un campo magnético. También podemos imaginar líneas de campo magnético. Ellas apuntan al norte y deben ser tales que, si una carga positiva sale del plano que estamos observando, posean la forma que se indica en la figura 28.



El módulo de la fuerza magnética \vec{F} que actúa sobre una carga q debido a que se mueve con una rapidez v_{\perp} perpendicularmente a las líneas de un campo magnético \vec{B} , viene dada por la expresión de Lorentz:

$$F = qv_{\perp}B. \quad [10]$$

Esta fuerza es perpendicular tanto a \vec{B} como a \vec{v} , del modo que se indica en la figura 29. Para recordar esta dirección es útil la regla de la mano derecha que se ilustra en la misma figura.



Al igual que el campo eléctrico, el magnético también permite desviar cargas eléctricas, pero solo si se mueven respecto de él. Esto es lo que usualmente ocurre en los tubos de imagen de los televisores. Si las fuerzas no son perpendiculares, entonces la fuerza de Lorentz está dada por la expresión $F = q|\vec{v}||\vec{B}|\text{sen}(\alpha)$, en que α es el ángulo que forman \vec{v} y \vec{B} .

La figura 30 ilustra la trayectoria que sigue un electrón cuando se establece un campo magnético saliente, en el instante en que pasa por el punto P. Por convención, la simbología utilizada para representar vectores entrantes a un plano es \otimes , y para los salientes a un plano es \odot .

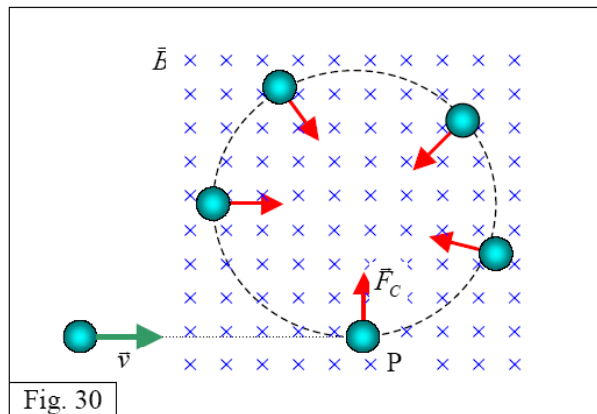


Fig. 30

Si m es la masa de la partícula y r el radio de la órbita, entonces la fuerza centrípeta es $F = m\frac{v^2}{r}$, pero también es $F = qvB$, de donde se puede encontrar el cociente $\frac{q}{m}$.