

ELECTROSTATICA

- 1-1. Introducción
- 1-2. Carga eléctrica
- 1-3. Ley de COULOMB
- 1-4. Ley de COULOMB y Sistemas de Unidades
- 1-5. Expresión vectorial de la Ley de COULOMB

A-1 Electrificación por frotamiento

A-2 Principios de la Electrostatica

A-3 Conductores y aisladores

1-1. Introducción

Consideremos un experimento simple. Supongamos que después de peinar nuestro cabello un día muy seco acercamos el peine a pedacitos ligeros de papel: observaremos que el peine los atrae. Fenómeno similar ocurre si frotamos una varilla de vidrio con un paño de seda o una varilla de *ámbar*¹ con un pedazo de piel. Podemos concluir que, como resultado del frotamiento (ver apartado A-1, pág. 9), estos materiales adquieren una nueva propiedad que llamaremos *electricidad*² y que esta propiedad eléctrica da lugar a interacciones más fuertes que la gravitacional. Hay, además, otras diferencias fundamentales entre las interacciones eléctrica y gravitacional.

En primer lugar, hay solamente una clase de interacción gravitacional, que da como resultado una atracción universal entre dos masas cualesquiera; por el contrario, hay dos clases de interacciones eléctricas. Supongamos que acercamos una varilla de vidrio electrificada a una pequeña esfera de corcho suspendida de un hilo, tal como se muestra en la figura 1-1a. Vemos que la varilla atrae la esfera. Si repetimos el experimento con una varilla de ámbar electrificada observaremos el mismo efecto de atracción (figura 1-1b). Sin embargo, si ambas varillas se acercan a la esfera simultáneamente, en lugar de una mayor atracción observaremos una fuerza de atracción menor o aún ninguna atracción de la esfera (figura 1-1c). Estos experimentos simples indican que, aunque ambas varillas electrificadas, la de vidrio y la de ámbar, atraen la bola de corcho, lo hacen debido a procesos físicos opuestos. Cuando ambas varillas actúan simultáneamente sus acciones se contrarrestan produciendo un efecto menor o nulo.

Concluimos, entonces, que hay dos clases de estado de electrificación: uno que se manifiesta sobre el vidrio y otra sobre el ámbar. Al primero se le llama *positivo* y al otro *negativo*.

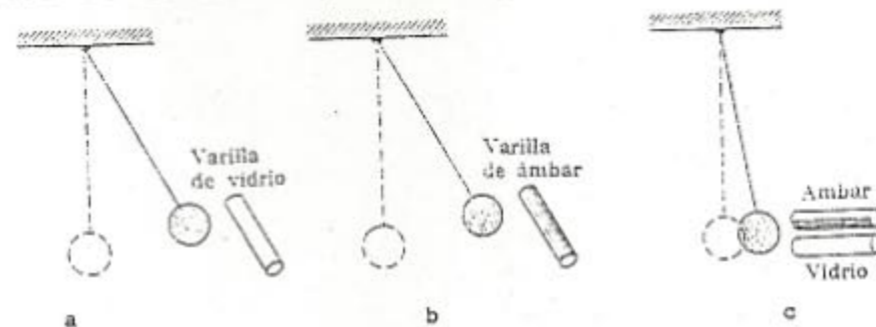


Figura 1-1

¹ Ámbar resina fósil, de aspecto transparente y de color amarillo.

² Palabra que deriva del griego *elektron*, que significa ámbar.

Supongamos ahora que tocamos dos esferas de corcho con una varilla de vidrio electrizada. Podemos suponer que ambas se *electrizan positivamente*. Si las acercamos observamos que se *repelen* (figura 1-2a). El mismo resultado se obtiene cuando tocamos las esferas con la varilla de ámbar electrizada, de modo que ambas se *electricen negativamente* (figura 1-2b). Sin embargo, si tocamos una de ella con la varilla de vidrio y la otra con la de ámbar, de modo que una adquiera electricidad positiva y la otra negativa, observaremos que se *atraen* (figura 1-2c).

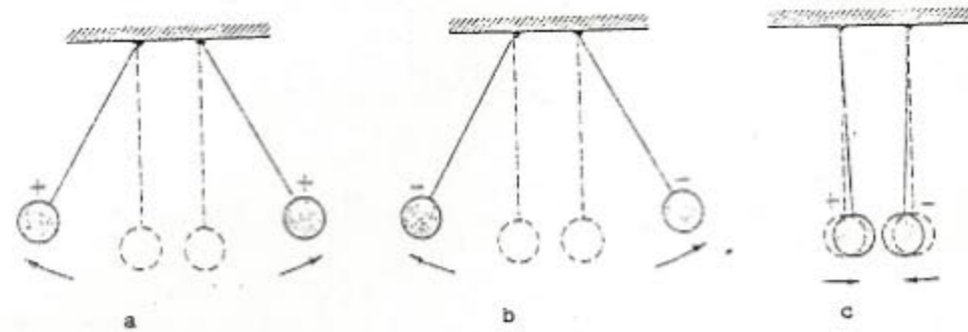


Figura 1-2

Por consiguiente mientras la interacción gravitacional es siempre atractiva, la interacción eléctrica puede ser atractiva o repulsiva.

Dos cuerpos con la misma clase de electrización (positiva o negativa) se repelen, pero si tienen diferentes clases de electrización (una positiva y otra negativa) se atraen.

1-2. Carga eléctrica

Del mismo modo que caracterizamos la intensidad de la interacción gravitacional asignando a cada cuerpo una masa gravitacional, caracterizaremos el estado de electrización de un cuerpo definiendo una masa eléctrica, más comunmente llamada *carga eléctrica*, representada por el símbolo q .

Así, cualquier porción de materia o cualquier partícula, está caracterizada por dos propiedades independientes fundamentales: masa y carga.

Así como hay dos clases de electrización, hay también dos clases de carga eléctrica: positiva y negativa. Un cuerpo que presenta electrización positiva tiene una carga eléctrica positiva, y uno con electrización negativa tiene una carga eléctrica negativa. La carga eléctrica neta de un cuerpo es la suma algebraica de sus cargas positivas y negativas. Un cuerpo que tiene cantidades iguales de electricidad positiva y negativa (esto es carga neta cero) se dice que es eléctricamente *neutro*. Por otra parte, un cuerpo que tiene carga diferente de cero, se llama a menudo *ion*. Como la materia en conjunto no presenta fuerzas eléctricas apreciables, debemos suponer que está compuesta de cantidades iguales de cargas positivas y negativas.

Para definir operacionalmente la carga de un cuerpo electrizado adoptamos el siguiente procedimiento. Tomamos un cuerpo cargado arbitrario Q y a una distancia d de él, colocamos la carga q . Entonces medimos la fuerza F ejercida sobre q . Seguidamente colocamos otra carga q' a la misma distancia d de Q y medimos F' . Definimos los valores de las cargas q y q' como proporcionales a las fuerzas F y F' .

Esto es:

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

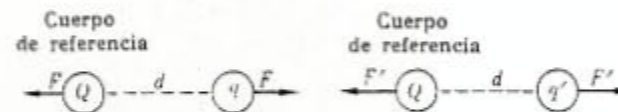


Figura 1-3

Si arbitrariamente asignamos un valor unitario a la carga q' , tenemos un medio de obtener el valor de q . Este método de comparación de cargas es muy similar al usado para comparar masas. Nuestra definición de cargas implica que siendo iguales todos los factores geométricos, la fuerza de la interacción eléctrica es proporcional a las cargas de las partículas.

Se ha encontrado que, en todo proceso observado en la naturaleza, la carga neta de un sistema aislado permanece constante. En otras palabras: *en cualquier proceso que ocurra en un sistema aislado, la carga total o neta no cambia.*

No se ha hallado excepción a esta regla, conocida como el *principio de la conservación de la carga*.

La unidad natural de la carga eléctrica es la carga transportada por un electrón o un protón. En la siguiente tabla se dan los correspondientes valores de carga y masa:

		Valor experimental más preciso	Valor aproximado para la resolución de problemas
Electrón	carga [coul]	$1,601864 \cdot 10^{-19}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$
	masa [kgs]	$9,1066 \cdot 10^{-31}$	$9,1 \cdot 10^{-31}$
Protón	carga [coul]	$1,601864 \cdot 10^{-19}$	$1,6 \cdot 10^{-19}$
	masa [kgs]	$1,67248 \cdot 10^{-27}$	$1,67 \cdot 10^{-27}$

Tabla 1-1

1-3. Ley de COULOMB

Las acciones y fuerzas ponderomotrices que manifiestan las cargas eléctricas entre ellas fueron estudiadas y medidas por *Charles Augustin COULOMB* (1736-1806) mediante una balanza de torsión de su propia invención cuyos resultados fueron comunicados a la Academia de Ciencias de Francia en 1785.

El científico inglés *John MICHELL* también inventó en forma independiente una balanza de torsión para demostrar que la fuerza entre dos polos magnéticos varían de modo inverso al cuadrado de la distancia entre ellos.

CAVENDISH también empleó una balanza de torsión 13 años después que *COULOMB* para comprobar que la fuerza de atracción entre dos masas variadas de modo inverso al cuadrado de la distancia entre ellas.

COULOMB demostró lo siguiente:

- La fuerza ejercida por una carga eléctrica puntual sobre otra está dirigida a lo largo de la línea que las une.
- Si las cargas tienen el mismo signo la fuerza es repulsiva, si tienen distinto signo es atractiva.
- La fuerza es directamente proporcional al valor de cada una de las cargas (proporcional al producto de las mismas).
- La fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa las cargas.

Es decir

$$F \propto \frac{q q'}{r^2}$$

Esta proporción puede convertirse en igualdad utilizando una constante de proporcionalidad K ,

$$F = K \frac{q q'}{r^2} \quad (1-1)$$

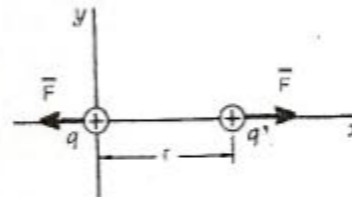


Figura 1-4

en donde q y q' representan las cargas que en general serán de distinto valor y r la distancia de separación entre ambas. Cada carga está sometida a fuerzas iguales y opuestas, en virtud de la tercera ley de la mecánica o principio de acción y reacción.

Debemos mencionar las siguientes consideraciones.

- Las cargas se suponen puntuales, es decir ocupan un lugar muy pequeño en comparación con la distancia que los separa.

- La concentración de las cargas en ese lugar debe ser uniforme; debe haber igual densidad de cargas en el volumen que ocupan.

Si no se cumplieran las dos consideraciones anteriores la Ley de COULOMB puede aplicarse tomando porciones infinitesimales de cargas en las que se cumplen las consideraciones y luego realizar una integración teniendo en cuenta el *principio de aditividad de fuerzas*.

Como podemos observar existe una profunda analogía entre las fuerzas coulombianas que experimentan las cargas eléctricas y las fuerza newtonianas que experimentan las masa mecánicas. El hecho de que las fuerzas coulombinas sean de atracción ó repulsión se debe a que existen dos tipos de partículas cargadas, y en cambio las fuerzas newtonianas son solamente de atracción debido a que existe (aparentemente) un solo tipo de masa.

$$F = K \frac{(+q)(+q')}{r^2} = + F \quad \text{repulsión}$$

$$F = K \frac{(-q)(-q')}{r^2} = + F \quad \text{repulsión}$$

$$F = K \frac{(+q)(-q')}{r^2} = - F \quad \text{atracción}$$

$$F = K \frac{(-q)(+q')}{r^2} = - F \quad \text{atracción}$$

La constante de proporcionalidad K depende del sistema de unidades adoptado y del medio material que rodea a las cargas (por ejemplo: vacío, aire, aceite, agua, etc.).

• 1-4. Ley de COULOMB y Sistemas de Unidades

El sistema MKSA se forma mediante el sistema MKS de la mecánica y la unidad de corriente eléctrica amper (A).

El sistema internacional de unidades S.I. se forma mediante el MKSA y agregando el kelvin (°K) para la unidad de temperatura y la candela (Cd) para la intensidad de luz.

En este sistema (SI) la unidad de carga eléctrica no deriva de la Ley de COULOMB sino que se obtiene de la unidad de corriente eléctrica amper (A).

La unidad de carga se denomina *coulombio (c)* y se define como la *cantidad de carga que atraviesa, en un segundo, una sección de un conductor en el cual circula una corriente constante de un amper.*

Debido a que la unidad de carga del sistema MKSA se los define independientemente de la Ley de Coulomb, la constante K debe determinarse experimentalmente y resultando su valor distinto de uno y con dimensión, siendo este

$$K = 9 \times 10^9 \frac{\text{N m}^2}{\text{coul}^2}$$

Podríamos definir el coulombio como la carga que repele a otra igual con una fuerza de K Newton cuando ambas cargas están a un metro de distancia en el vacío.

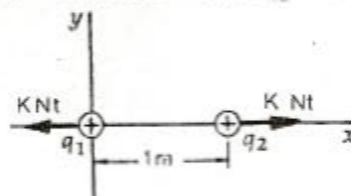


Figura 1-5

En general, no se toma como unidad de carga al coulomb, sino a submúltiplos debido a que los valores prácticos con se trabaja son muy pequeños. Los submúltiplos del coulomb más empleados son

$$\begin{aligned} 1 \text{ mili-coulomb} &= 1 \text{ mC} = 1 \times 10^{-3} \text{ coul} \\ 1 \text{ micro-coulomb} &= 1 \text{ } \mu\text{C} = 1 \times 10^{-6} \text{ coul} \\ 1 \text{ nano-coulomb} &= 1 \text{ nC} = 1 \times 10^{-9} \text{ coul} \\ 1 \text{ pico-coulomb} &= 1 \text{ pC} = 1 \times 10^{-12} \text{ coul} \end{aligned}$$

Con el objeto de evitar la aparición del factor 4π , en otras ecuaciones derivadas de la Ley de Coulomb, y que se usan más frecuentemente se define una nueva constante ϵ_0 , llamada *constante de permitividad* y cuyo valor es

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi K} = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{coul}^2}{\text{N m}^2}$$

o bien

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

podemos escribir entonces la ecuación (1-1) de la Ley de Coulomb de la siguiente forma

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q q'}{r^2} \quad (1-2)$$

1-5. Expresión vectorial de la Ley de COULOMB.

La expresión anterior, ecuación 1-2, da la magnitud ó módulo de las fuerzas coulombianas que actúan sobre las cargas q_1 y q_2 . Consideremos el siguiente esquema

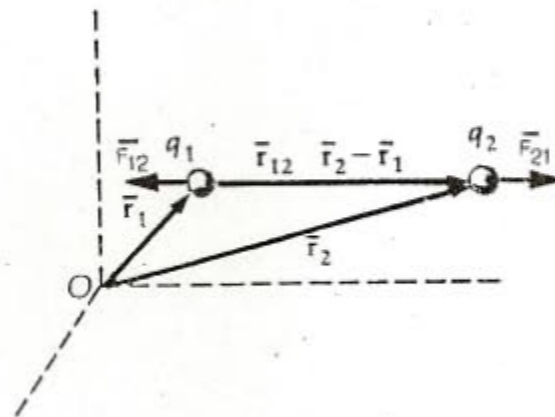


Figura 1-6

en el cual llamaremos

F_{12} : valor de la fuerza que actúa sobre q_1 ejercida por q_2 .

F_{21} : valor de la fuerza que actúa sobre q_2 ejercida por q_1 .

La expresión 1-2 no da ninguna dirección ni sentido de la fuerza. Por los tanto es necesario definir un vector unitario para poder así definir la dirección y sentido de la fuerza. El vector unitario del que hablamos es

$$\frac{\vec{r}_{21}}{r_{21}} = \hat{r}_{21}$$

\hat{r}_{21} : vector unidad que señala desde q_1 a q_2 .

Ahora estamos en condiciones de escribir las fuerzas como expresiones vectoriales

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{21} \quad (1-3)$$

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{12} = - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \hat{r}_{21} \quad (1-4)$$

Las ecuaciones anteriores incluyen el resultado de que cargas del mismo signo se repelen y cargas de distinto signo se atraen.

Si q_1 y q_2 son positivas ambas o negativas ambas, el producto $q_1 \cdot q_2$ es positivo por lo tanto F_{21} que actúa sobre la carga q_2 está en el sentido de r_{21} alejándose de la carga q_1 . F_{12} que actúa sobre la carga q_1 tiene sentido opuesto a r_{21} alejándose de la carga q_2 . Es decir si ambas cargas tienen el mismo signo la fuerza es repulsiva.

Análogamente si una carga es positiva y la otra negativa el producto de $q_1 \cdot q_2$ es negativo y las fuerzas resultan atractivas.

Debe señalarse que ninguna fórmula puede ser correcta a menos que ambos miembros sean cantidades escalares o ambos miembros magnitudes vectoriales. Una magnitud escalar no puede ser igual a una magnitud vectorial.

A-1. Electrificación por frotamiento

La *materia* está formada por *moléculas*. Una molécula es la unidad más pequeña de una sustancia. Cuando se agrupan moléculas de la misma clase, el conjunto adquiere las mismas propiedades físico-químicas de la sustancia de las que provienen.

La molécula a su vez está formada por *átomos*. Hay moléculas monoatómicas (He), biatómicas (O₂), triatómicas (O₃) y poliatómicas.

Los átomos, a su vez, están formados por un núcleo con *protones* y *neutrones* que representa la mayor parte de su masa, dentro de un radio de unos 10^{-14} m, rodeado, a una distancia relativamente grande (unos 10^{-10} m) por *electrones* en órbita.

Los protones tienen carga positiva, los electrones la tienen negativa y los neutrones carecen de carga.

Cada átomo ordinariamente es una partícula neutra. La neutralidad del átomo es consecuencia de un balance exacto entre las cargas positivas del núcleo y las cargas negativas de los electrones. Protones y electrones poseen cargas eléctricas de igual valor y signo opuesto. En un átomo ordinario existen tantos protones en el núcleo como electrones orbitales.

Cuando se arranca un electrón del átomo, éste pierde una carga negativa y se convierte en un *ion positivo*. Un electrón puede asociarse a un átomo neutro transformándolo en un *ion negativo*.

Los electrones se mantienen próximos a los núcleos por atracción electrostática. En algunas sustancias es posible interferir esa atracción y arrancar por frotamiento algunos electrones superficiales, quedando, como consecuencia, el cuerpo positivamente cargado. Esto ocurre, por ejemplo, con el vidrio. Otras sustancias, como por ejemplo los plásticos, tienden a captar electrones del paño que los frotó. Quedando con exceso de electrones y cargados, por lo tanto, negativamente.

Aquí tenemos un modelo simple para explicar los hechos experimentales de la electrificación por frotamiento.

A-2. Principios de la Electrostática

La electrostática es la parte de la Física que estudia las propiedades y las acciones mutuas de las cargas eléctricas en reposo con respecto a un sistema inercial de referencia. Se basa en dos principios establecidos empíricamente.

a) Principio de interacción.

Los experimentos permiten enunciar que: cargas eléctricas del mismo signo se rechazan y las de signos opuestos se atraen.

b) Principio de conservación de la carga eléctrica.

Es imposible producir o destruir una carga positiva sin que a su vez se produzca o destruya una carga negativa de igual valor. Esto implica que en un sistema aislado la carga eléctrica total permanece constante.

A-3. Aisladores y conductores

Partimos en base a los experimentos realizados en el punto 1.1.

I) Si frotamos una regla plástica en un extremo y empleando el péndulo se puede probar que:

- a) Se carga de electricidad.
- b) Las cargas eléctricas están localizadas en el extremo frotado.

II) a) Si realizamos el mismo experimento con una barra metálica comprobaremos que no se electriza por frotamiento.

b) Si repetimos el experimento asegurando a la barra metálica un mango de vidrio, comprobaremos al frotar la barra metálica que, ahora sí, se carga de electricidad y que toda la barra está electrizada.

El primer comportamiento caracteriza a los aislante o dieléctricos como el vidrio, la seda, la resina, el plástico, el caucho, el azufre, la porcelana, la madera seca.

El segundo comportamiento caracteriza a los materiales en los que las cargas eléctricas fluyen distribuyéndose por todo el cuerpo independiente del lugar donde fueron situadas inicialmente; son los conductores como los metales y el grafito.

En estos materiales cada átomo tiene uno o más electrones que no permanecen ligados al núcleo, constituyendo electrones "libres" que se desplazan al azar a través de la estructura del material.

El experimento mostrado en la figura 1-7 a) y b) prueba que el cuerpo humano es conductor de la electricidad. En efecto, en este experimento la barra metálica se sostenía con la mano. Las cargas eléctricas que aparecen al frotarla pasan a tierra a través del cuerpo y la barra se descarga en virtud de sus reducidas dimensiones con respecto a la Tierra.

Podemos concluir que al conectar un cuerpo conductor electrificado a tierra mediante un elemento conductor, el cuerpo se descarga.

En un buen dieléctrico los electrones están firmemente ligados a los núcleos y, como consecuencia, no tienen electrones libres.

Conductor electrificado positivamente. Al conectarlo a Tierra se descarga pues electrones los provenientes de la misma suben hasta neutralizarlo.

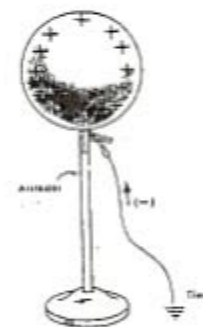


Figura 1-7 a)

Conductor electrizado negativa-
mente. Al conectarlo a Tierra
se descarga pues los electrones
en exceso pasan a la misma.



Figura 1-7 b)