

I. Electrostática

◆ Cargas Eléctricas:

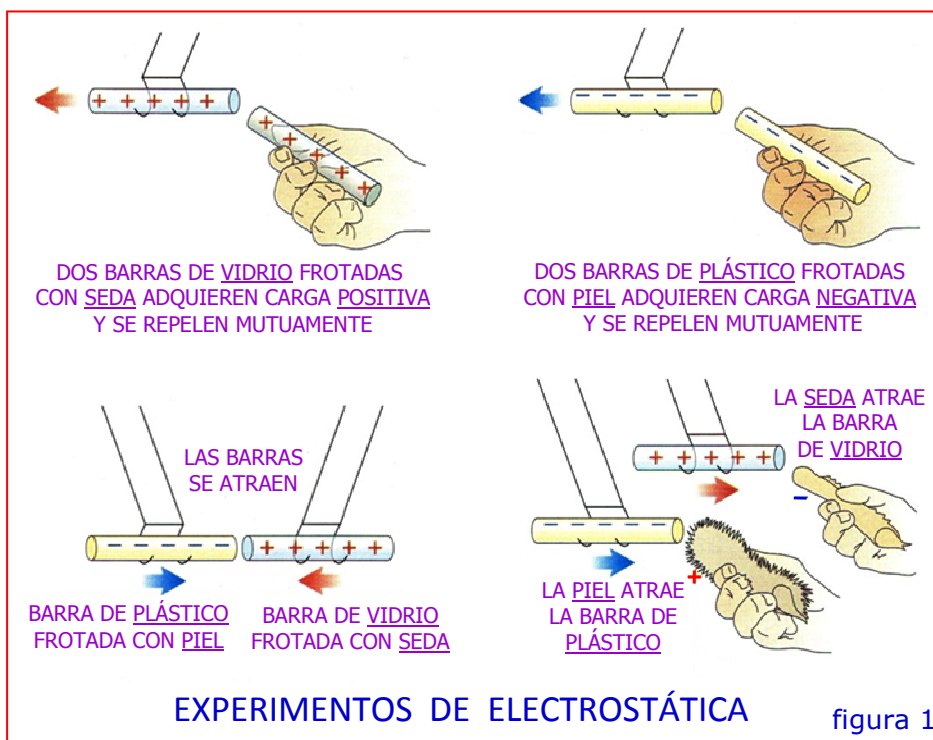
Las primeras noticias del descubrimiento de la electricidad se remontan al siglo VII a. C., cuando Thales de Mileto (640 a 548 a. C.), uno de los grandes sabios de la antigua Grecia, descubrió que al frotar un trozo de ámbar (*resina fosilizada*) con un paño de lana o una piel, el mismo adquiría la propiedad de atraer pequeños cuerpos livianos. Al interpretar hoy esta propiedad, decimos que el ámbar ha adquirido una carga eléctrica o bien que se ha cargado eléctricamente. La palabra "eléctrica" se deriva de la palabra griega "elektron", que significa ámbar.

Es posible comunicar carga eléctrica a cualquier material sólido, frotándolo con otra sustancia. Así, un automóvil adquiere carga eléctrica por efecto de su fricción con el aire, los zapatos se cargan eléctricamente por su roce con una alfombra de fibra sintética y un peine se electriza al deslizarlo a través del cabello. En realidad, todo lo que se necesita para producir una carga eléctrica es un íntimo contacto. *El frotamiento sirve simplemente para establecer un buen contacto entre muchos puntos de las superficies.*

La rama de la física que estudia las interacciones entre cargas eléctricas que están en reposo (o casi en reposo), se llama Electrostática. Las barras de plástico y la piel (*real o sintética*), como así también las barras de vidrio y la seda, resultan particularmente eficaces para estudiar los fenómenos relacionados con la electrostática. Los experimentos que se muestran y describen en la *figura 1*, revelan que hay dos tipos de carga eléctrica:

- a) la que tiene la *barra de plástico* que se frotó contra la *piel*, llamada *carga negativa* [-] (*originalmente denominada electricidad resinosa*).
- b) la que tiene la *barra de vidrio* que se frotó contra la *seda*, llamada *carga positiva* [+] (*originalmente denominada electricidad vítrea*).

Paralelamente, estos experimentos conducen a dos resultados fundamentales:



- 1) cargas de igual signo se repelen.
- 2) cargas de distinto signo se atraen.

Además, cuando la barra de plástico es frotada contra la piel o la barra de vidrio es frotada contra la seda, aparecen cargas opuestas sobre ambas sustancias. Es decir, la seda tiene carga negativa igual que la barra de plástico y la piel tiene carga positiva igual que la barra de vidrio. Este resultado se obtiene siempre que cualquier sustancia se frota con otra. Esto sugiere que las cargas eléctricas no son engendradas ni creadas, sino que el proceso de adquirir una carga eléctrica consiste en ceder algo de un cuerpo a otro, de modo que uno de ellos tenga un exceso y el otro un déficit de ese algo. Hasta fines del siglo XIX no se descubrió que ese algo se compone de porciones muy pequeñas de electricidad negativa, llamadas electrones.

◆ Estructura de la Materia:

Demócrito de Abdera, filósofo de la antigua Grecia (*siglo V a. C.*), afirmaba que todos los cuerpos estaban constituidos por partículas infinitamente pequeñas e

indivisibles: los átomos. Precisamente, la palabra *átomo* deriva del griego "atomos", que significa indivisible. Hoy sabemos que el término no es adecuado, puesto que todos los átomos son agrupaciones más o menos complejas de partículas subatómicas.

La estructura de los átomos se puede describir en términos de tres partículas: el electrón, con carga negativa, el protón, con carga positiva, y el neutrón, que no tiene carga. El protón y el neutrón son combinaciones de otras entidades llamadas quarks, que tienen cargas equivalentes a $\pm 1/3$ y $\pm 2/3$ de la carga del electrón (*el estudio de los quarks no está previsto en nuestro curso*).

Las partículas subatómicas están dispuestas del mismo modo general en todos los átomos. Los protones y neutrones forman siempre un conjunto muy compacto llamado núcleo, con dimensiones del orden de 10^{-15} m. Alrededor del núcleo y a distancias del orden de 10^{-10} m, se encuentran los electrones, cuyo número es igual al número de protones dentro del núcleo. Si un átomo tuviera un diámetro de 100 km, su núcleo tendría un diámetro de 1 m. Los electrones con carga negativa son retenidos dentro del átomo por las fuerzas eléctricas de atracción que ejerce sobre ellos el núcleo con carga positiva (*Los protones y neutrones se mantienen unidos dentro del núcleo debido a una interacción de atracción denominada "fuerza nuclear fuerte", que vence la repulsión eléctrica de los protones. El alcance de esta fuerza, cuyo estudio escapa al propósito de nuestro curso, es corto y no se extiende mucho más allá del núcleo*).

Las masas respectivas de estas partículas son las siguientes:

$$\text{masa del electrón} = m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{masa del protón} = m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

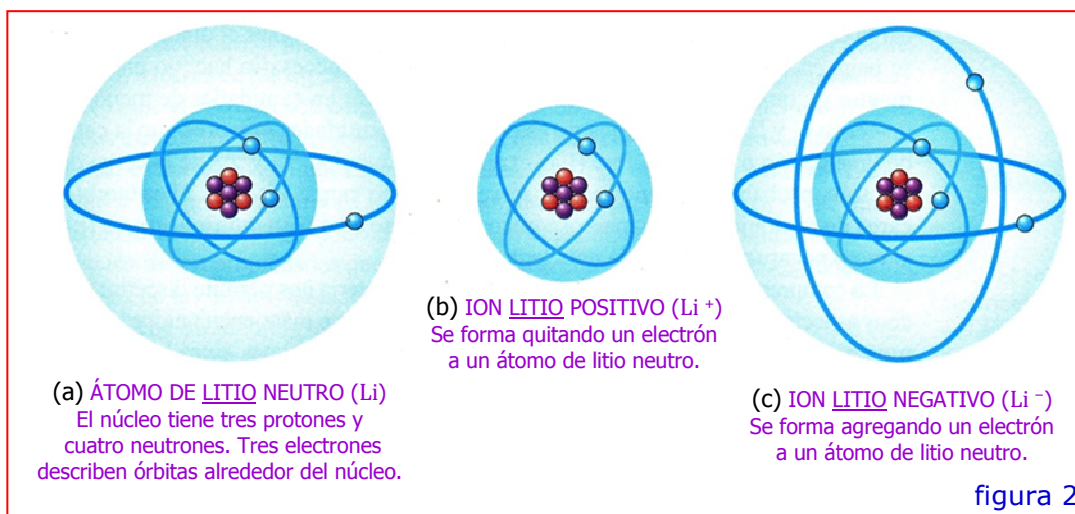
$$\text{masa del neutrón} = m_n \approx m_p \text{ (la del neutrón es sólo 0,14 \% mayor que la del protón)}$$

Las masas del protón y el neutrón son casi iguales y equivalen aproximadamente a 1840 veces la masa del electrón. Por lo tanto, toda la masa de un átomo está prácticamente concentrada en su núcleo.

La carga negativa del electrón (q_e), aunque de signo opuesto, tiene exactamente el mismo valor que la carga positiva del protón (q_p).

$$q_e = q_p = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$C \Rightarrow$ Culombio: unidad SI de carga eléctrica (que veremos más adelante)



En un átomo neutro, el número de electrones es igual al número de protones del núcleo y la carga eléctrica neta es exactamente cero (figura 2a). Si se separa uno o más electrones, la estructura restante con carga positiva es un ion positivo (figura 2b). Un ion negativo es un átomo que ha ganado uno o más electrones (figura 2c). Esta ganancia o pérdida de electrones se conoce como ionización (Las "órbitas" de los electrones son una representación esquemática de la distribución electrónica real, la cual está constituida por una nube difusa de un tamaño muchas veces más grande que el núcleo).

Nº atómico de un elemento = Nº de protones en sus núcleos atómicos
(ejemplo: Nº atómico del Litio = 3)

Nota: La Química moderna ha establecido que todas las sustancias químicas están formadas a partir de 89 sustancias simples (constituidas por átomos químicamente iguales) que se encuentran en la naturaleza y que se denominan "elementos".

◆ Conservación y Cuantización de la Carga:

Si se frota una barra de plástico y un trozo de piel, ambos inicialmente sin carga, la barra adquiere una carga negativa (puesto que toma electrones de la piel) y la piel adquiere una carga positiva de la misma magnitud (puesto que ha perdido tantos electrones como ha ganado la barra). Por consiguiente, no cambia la

carga eléctrica total de los dos cuerpos juntos. En todo proceso de carga, ésta no se crea ni se destruye: simplemente se transfiere de un cuerpo a otro. Es decir, la carga total del sistema se conserva constante.

La magnitud de la carga del electrón (q_e) o del protón (q_p) es una unidad natural de carga. Toda cantidad observable de carga eléctrica es siempre un múltiplo entero de esta unidad básica y por ello se dice que la carga está cuantizada (del latín "quantum"). En consecuencia, la carga de cualquier cuerpo macroscópico es siempre cero o un múltiplo entero (positivo o negativo) de la carga del electrón.

◆ Conductores y Aisladores:

Algunos materiales permiten que la carga eléctrica se desplace con facilidad de una región a otra del material, pero otros no. Esto se puede comprobar a través de los pasos esquematizados en el ejemplo siguiente.

La figura 3a muestra un alambre de cobre con un extremo sostenido por una barra de vidrio y el otro extremo conectado a una esfera metálica inicialmente sin carga. Con una barra de plástico cargada eléctricamente se toca por un instante un extremo del alambre de cobre y luego la barra se retira. Al acercar otro cuerpo con carga a la esfera, como se observa en las figuras 3b y 3c, la



misma es atraída o repelida, lo que indica que ha adquirido carga eléctrica. Esta carga eléctrica se ha transferido por medio del alambre de cobre desde la superficie de la barra de plástico hasta la esfera.

Por esta propiedad, se dice que el alambre de cobre es un **conductor** de la electricidad. El cobre, la plata, el aluminio y **los metales en general, son conductores.**

Si se repite el experimento con un hilo de nylon, una fibra de seda o una cinta de goma, se observa que no se transfiere carga eléctrica alguna a la esfera. Estos materiales se dice que son **aisladores** o **dieléctricos**. El vidrio, la seda, el nylon, la goma, la resina, la porcelana, los plásticos, etc., son aisladores.

Los conductores permiten el paso de cargas a través de ellos, mientras que los aisladores no lo permiten.

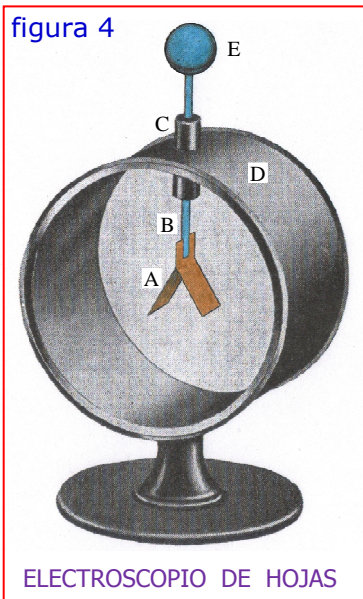
Dentro de un **metal sólido**, como el cobre por ejemplo, uno o más electrones externos de cada átomo pueden desprenderse y moverse libremente por todo el material. Éstos se llaman **electrones libres**. Los núcleos positivos y el resto de los electrones permanecen en una posición fija.

Dentro de un **aislador** no hay electrones libres (o hay en muy pequeña proporción) y la carga eléctrica no se puede desplazar libremente por el material.

*Ciertos materiales llamados **semiconductores**, como el silicio y el germanio, tienen propiedades eléctricas que son intermedias entre las de los conductores y las de los aisladores.*

◆ Electroscopio:

En la **figura 4** se representa esquemáticamente un **electroscopio de hojas**. El mismo está compuesto de dos láminas delgadas *A* (generalmente de oro o aluminio) que están fijas en el extremo de una varilla metálica *B*, la cual pasa a través de un soporte aislante *C* y termina en una bola metálica *E*. La caja *D* está provista de ventanas de vidrio a través de las cuales pueden observarse las hojas y que sirven para proteger a éstas de las corrientes de aire. *Cuando se toca la bola del electroscopio con un cuerpo cargado, las hojas adquieren*



cargas del mismo signo y se repelen, siendo su divergencia una medida de la cantidad de carga que han recibido. En la figura 5 se muestra un electroscopio casero.

Si se conecta un borne de una batería eléctrica a la bola del electroscopio y el otro borne a la caja del mismo, las hojas se separarán igual que si hubiesen sido cargadas por un cuerpo electrizado por frotamiento. No hay diferencia entre los tipos de carga dados a las hojas en los dos procesos y, en general, no hay distinción entre electricidad estática y corriente eléctrica.

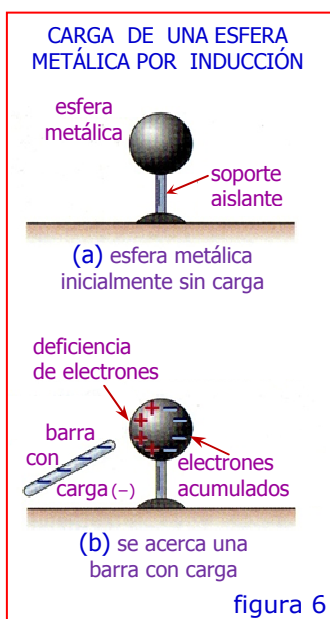
La expresión "corriente" se refiere a un movimiento de cargas, mientras que la

"electrostática" se ocupa de las reacciones entre cargas en reposo.

Si mediante un buen conductor conectamos a tierra un electroscopio cargado, sus hojas se cierran pues la carga se reparte proporcionalmente entre el instrumento y la tierra, reduciéndose prácticamente a cero la que queda en el instrumento (por ser la tierra un cuerpo extremadamente inmenso). Por ello se dice que un conductor cargado puesto a tierra se descarga.



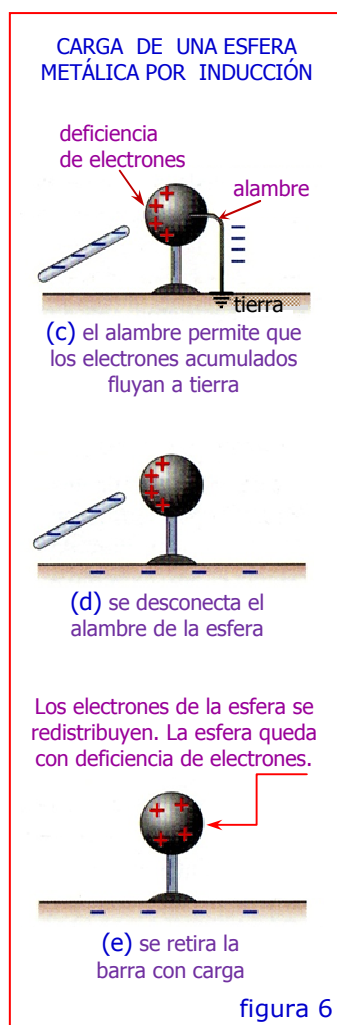
◆ Carga de un Metal por Inducción:



Se puede cargar una esfera metálica tocándola con una barra de plástico con carga eléctrica, como en la figura 3a. En este proceso, algunos de los electrones en exceso de la barra se transfieren a la esfera, lo que deja a la barra con una carga negativa más pequeña.

Existe otro procedimiento mediante el cual la barra de plástico puede originar en otro cuerpo una carga de signo opuesto, sin perder algo de su propia carga. Este método se conoce como carga por inducción.

En la figura 6a se tiene una esfera metálica sin carga apoyada en un soporte aislante. Cuando a la esfera se



le aproxima una barra con carga negativa, pero sin tocarla (*figura 6b*), el exceso de electrones de la barra repele algunos de los electrones libres de la esfera, los cuales se desplazan hacia la derecha, alejándose de la barra. Se tiene así un exceso de carga negativa en la superficie derecha de la esfera y una deficiencia de carga negativa (es decir, una carga positiva) en la superficie izquierda. Estas cargas en exceso se conocen como cargas inducidas. Las mismas permanecerán separadas mientras se mantenga cerca la barra cargada; si se aleja la barra, las cargas se juntarán y se restablecerá el equilibrio neutro inicial.

Si manteniendo la barra cargada cerca de la esfera, conectamos a tierra la superficie derecha de la misma mediante un alambre conductor (*figura 6c*), la carga negativa fluirá a tierra. Si ahora desconectamos el alambre (*figura 6d*) y luego retiramos la barra (*figura 6e*), queda en la esfera una carga positiva distribuida

uniformemente. Observamos que, en este proceso, la barra cargada negativamente no ha perdido nada de su carga.

◆ Triboelectricidad:

SERIE TRIBOELÉCTRICA					
1	amiante	8	papel	15	fibra acrílica
2	vidrio	9	algodón	16	plástico flexible
3	nailon	10	acero	17	polietileno
4	lana	11	caucho duro	18	teflón
5	plomo	12	níquel y cobre	19	goma de silicona
6	seda	13	latón y plata		
7	aluminio	14	goma sintética		

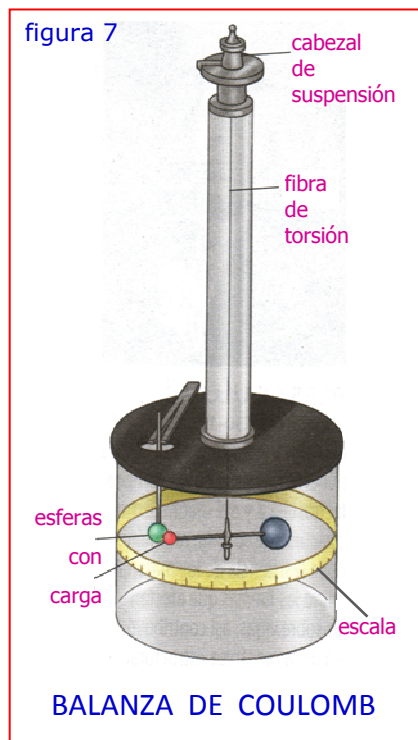
Sabemos que en general los cuerpos aislantes frotados adquieren cargas eléctricas; además, los conductores asidos con piezas aislantes también se cargan por frotamiento.

La tabla que se observa a la izquierda corresponde a una versión reducida de una serie triboeléctrica ("tribos" significa rozamiento en griego). En esta

serie, cuanto mayor es la numeración de un material, mayor es su afinidad para captar electrones. Si dos materiales se ponen en contacto mediante rozamiento, se

transfieren electrones del material de menor numeración al material de mayor numeración. Por ejemplo, electrones del nailon son transferidos al teflón cuando ambos se frotan entre sí.

◆ Ley de Coulomb:



La primera investigación cuantitativa de la ley que rige las fuerzas que se ejercen entre cuerpos cargados, fue realizada por Charles Coulomb en 1784, utilizando una balanza de torsión (*figura 7*) para efectuar las mediciones. Esta balanza es similar a la utilizada por Cavendish 13 años después, para medir las fuerzas gravitatorias.

Del hilo de torsión se cuelga una varilla de vidrio, en uno de cuyos extremos se coloca una esferita de bronce cargada. Otra esferita cargada, con mango aislador de vidrio, se introduce por una abertura superior y se coloca frente a la primera a una distancia inicial d , medida sobre una escala. Siendo las cargas del mismo signo, la primer esferita es rechazada y para llevarla a la posición de partida hay que torcer el hilo un ángulo α , a partir del cual se puede calcular el momento de torsión actuante.

Dentro de los límites de precisión de sus medidas, Coulomb demostró que la fuerza de atracción o repulsión entre dos cuerpos cargados es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia: $F \propto \frac{1}{r^2}$

Coulomb también estudió cómo variaba la fuerza eléctrica con el volumen relativo de las cargas aplicadas a las esferas conductoras de su balanza. Por ejemplo, si tocaba una esfera cargada con una esfera exactamente igual pero descargada, la carga original debía dividirse igualmente entre dichas esferas. Siguiendo esta técnica, Coulomb descubrió que la fuerza entre las dos esferas era proporcional al producto de las cargas de las mismas, ampliando así la relación anterior: $F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$

donde q_1 y q_2 son medidas relativas de las cargas aplicadas a las esferas.

Esta *proporción* puede convertirse en *igualdad* multiplicándola por una *constante k* (determinada experimentalmente), llamada *constante de Coulomb*:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

El valor de la constante *k* de proporcionalidad, depende de las unidades en las cuales se expresen la fuerza, la carga y la distancia.

La Ecuación (1) se denomina *LEY DE COULOMB* y puede enunciarse así:

"La fuerza de atracción o repulsión entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa".

La ley de Coulomb está restringida a *cargas puntuales*, es decir, es válida solamente para *cuerpos cargados* cuyas *dimensiones* sean *pequeñas comparadas con las distancia que los separa*.

Desde el punto de vista práctico, la ley puede utilizarse *para cargas puntuales situadas en el aire*, ya que, a la presión atmosférica, el efecto del aire sólo modifica la fuerza que se ejercería en el vacío en un 1/2/1000.

La ley se cumple cualquiera sea el signo de las cargas *q₁* y *q₂*. Si son del mismo signo, la fuerza es una repulsión; si son de signo opuesto, una atracción. *Sobre cada una de las cargas se ejercen fuerzas del mismo valor y sentidos opuestos*.

La fuerza de atracción gravitatoria es despreciable comparada con la fuerza de atracción electrostática. Entre dos núcleos atómicos de Helio separados una distancia de 10⁻¹¹ cm, la fuerza electrostática es 3 x 10³⁵ veces mayor que la gravitatoria.

En el Sistema Internacional (SI), la *unidad de carga eléctrica* es el *culombio (C)* y equivale a unos 6,25 x 10¹⁸ electrones (1 C / 1,6 x 10⁻¹⁹ C). Por razones prácticas relacionadas con la precisión de las mediciones, la unidad de carga no se define usando una balanza de torsión, sino que se deriva de la unidad de corriente eléctrica, el *amperio*, que es igual a "un culombio por cada segundo" (A = C/s) (En el capítulo correspondiente, regresaremos sobre la unidad de corriente eléctrica). Por lo tanto, el *culombio* se define como *"la cantidad de carga que atraviesa, cada segundo, la sección de un conductor por el cual circula una*

corriente constante de un amperio" ($C = A.s$).

El valor numérico más exacto de k es $8,987551787 \times 10^9$, pero, a los fines prácticos, es suficientemente preciso el siguiente valor aproximado:

$$k = 9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \quad (2)$$

Con el objeto de evitar la aparición del factor 4π en otras ecuaciones derivadas de la ley de Coulomb, que se usan más frecuentemente que la misma ley, se introdujo una nueva constante denominada permitividad del vacío:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2} \quad (3)$$

de donde:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (4)$$

y la ley de Coulomb se puede escribir en la forma:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (5)$$

vectorialmente:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (6)$$

Ejercicio N° 1: El electrón y el protón de un átomo de hidrógeno están separados (en promedio) por una distancia de aproximadamente $5,3 \times 10^{-11}$ m. Encontrar las magnitudes de la fuerza eléctrica y la fuerza gravitacional entre las dos partículas.

Según la ley de Coulomb:

$$F_e = k \frac{|e||-e|}{r^2} = \left(9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\right) \frac{(1,6 \times 10^{-19} C)^2}{(5,3 \times 10^{-11} m)^2} = 8,2 \times 10^{-8} N$$

Según la ley de gravitación universal:

$$F_g = G \frac{m_e m_p}{r^2} = \left(6,67 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{kg^2}\right) \frac{(9,11 \times 10^{-31} kg)(1,67 \times 10^{-27} kg)}{(5,3 \times 10^{-11} m)^2}$$

$$F_g = 3,6 \times 10^{-47} \text{ N}$$

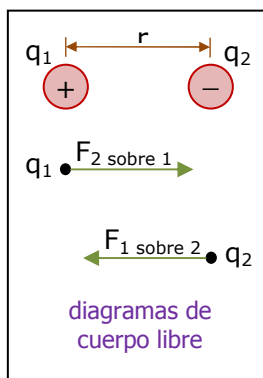
La relación $F_e/F_g = 2,3 \times 10^{39}$. La fuerza de atracción gravitatoria es muy despreciable comparada con la fuerza de atracción electrostática. Es por ello que los efectos de la gravedad no se consideran al tratar las interacciones atómicas o moleculares.

Ejercicio Nº 2: Dos esferas pequeñas separadas por una distancia de 20 cm tienen cargas iguales. ¿Cuántos electrones en exceso hay en cada esfera si la magnitud de la fuerza de repulsión entre ellas es de $4,57 \times 10^{-21} \text{ N}$?

$$F = k \frac{q^2}{r^2} \Rightarrow q = \sqrt{\frac{F r^2}{k}} = \sqrt{\frac{(4,57 \times 10^{-21}) (0,2)^2}{9 \times 10^9}} = 1,425 \times 10^{-16} \text{ C}$$

$$n = \frac{q}{e} = \frac{1,425 \times 10^{-16} \text{ C}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 890 \text{ electrones}$$

Ejercicio Nº 3: Dos cargas puntuales $q_1 = +25 \text{ nC}$ y $q_2 = -75 \text{ nC}$, están separadas por un distancia de 3 cm. Encontrar la magnitud y la dirección de: a) la fuerza eléctrica que q_1 ejerce sobre q_2 ; b) la fuerza eléctrica que q_2 ejerce sobre q_1 .



$$F_{1 \text{ sobre } 2} = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

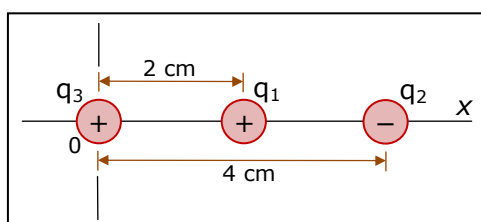
$$F_{1 \text{ sobre } 2} = (9 \times 10^9) \frac{|(+25 \times 10^{-9})(-75 \times 10^{-9})|}{(0,03)^2} = 0,019 \text{ N}$$

Como las cargas tienen signos opuestos, la fuerza es de atracción, es decir, la fuerza que actúa sobre q_2 está dirigida hacia q_1 a lo largo de la recta que une las dos cargas.

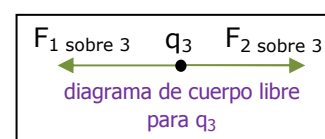
Recordemos que la tercera ley de Newton es aplicable a las fuerzas eléctricas. No obstante que las cargas tienen magnitudes diferentes, la magnitud de la fuerza que q_2 ejerce sobre q_1 es igual y opuesta a la magnitud de la fuerza que q_1 ejerce sobre q_2 .

$$F_{2 \text{ sobre } 1} = 0,019 \text{ N}$$

Ejercicio Nº 4: Dos cargas puntuales están situadas sobre el eje positivo de las x de un sistema de coordenadas (*figura*). La carga $q_1 = 1 \text{ nC}$ está a 2 cm del origen y la carga $q_2 = -3 \text{ nC}$ está a 4 cm del origen. ¿Cuál es la fuerza total que ejercen estas



dos cargas sobre una carga $q_3 = 5 \text{ nC}$ situada en el origen? Las fuerzas gravitatorias son insignificantes.



$$F_{1 \text{ sobre } 3} = k \frac{|q_1 q_3|}{r^2} = (9 \times 10^9) \frac{(1 \times 10^{-9})(5 \times 10^{-9})}{(0,02)^2} = 1,12 \times 10^{-4} \text{ N}$$

Esta fuerza tiene el sentido del eje x negativo porque q_3 es repelido por q_1 .

$$F_{2 \text{ sobre } 3} = k \frac{|q_2 q_3|}{r^2} = (9 \times 10^9) \frac{(3 \times 10^{-9})(5 \times 10^{-9})}{(0,04)^2} = 8,4 \times 10^{-5} \text{ N}$$

Esta fuerza tiene el sentido del eje x positivo porque q_2 atrae a q_3 .

$$F_x = -112 \mu\text{N} + 84 \mu\text{N} = -28 \mu\text{N}$$

La fuerza total sobre q_3 está dirigida hacia la izquierda y su módulo es de $28 \mu\text{N}$.

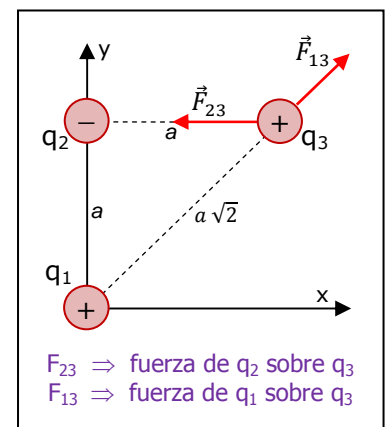
Ejercicio Nº 5: Consideremos 3 cargas puntuales ubicadas en los vértices de un triángulo rectángulo, como se muestra en la figura, donde:

$$q_1 = q_3 = 5 \mu\text{C} \quad ; \quad q_2 = -2 \mu\text{C} \quad ; \quad a = 0,10 \text{ m}$$

Encontrar la fuerza resultante que se ejerce sobre q_3 .



Las direcciones de las fuerzas individuales ejercidas por q_1 y q_2 sobre q_3 , se muestran en la figura.



$$F_{23} = k \frac{|q_2 q_3|}{a^2} = (9 \times 10^9) \frac{(2 \times 10^{-6})(5 \times 10^{-6})}{(0,10)^2} = 9 \text{ N}$$

$$F_{13} = k \frac{|q_1 q_3|}{(a\sqrt{2})^2} = (9 \times 10^9) \frac{(5 \times 10^{-6})(5 \times 10^{-6})}{2(0,10)^2} = 11 \text{ N}$$

Componentes de la fuerza resultante que actúa sobre q_3 :

$$F_{3x} = F_{13} \cos 45^\circ - F_{23} = 7,8 - 9 = -1,2 \text{ N}$$

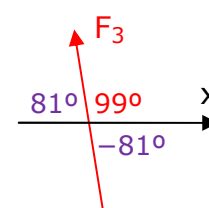
$$F_{3y} = F_{13} \sin 45^\circ = 7,8 \text{ N}$$

$$\text{Vectorialmente:} \quad \vec{F}_3 = (-1,2 \hat{i} + 7,8 \hat{j}) \text{ N}$$

$$\text{módulo de } \vec{F}_3 = \sqrt{1,2^2 + 7,8^2} = 7,9 \text{ N}$$

$$\text{arc tg } (7,8/-1,2) = -81^\circ$$

$$\text{ángulo de } F_3 \text{ con el eje x} = 180^\circ - 81^\circ = 99^\circ$$



◆ Campo Eléctrico:



La *figura 8a* representa dos cuerpos A y B cargados positivamente, entre los cuales se origina una fuerza eléctrica de repulsión F . Tal como la fuerza de gravitación universal, esta fuerza es del tipo de acción a distancia y se manifiesta sin que exista conexión material alguna entre A y B. Nadie sabe porqué es esto posible. Sin embargo, resulta útil imaginar que cada uno de los cuerpos cargados modifica las propiedades del espacio que lo rodea.

Así, supongamos que quitamos el cuerpo B y en su lugar consideramos un punto P (*figura 8b*). Se dice que el cuerpo cargado A produce un campo eléctrico en el punto P. Si colocamos nuevamente el cuerpo cargado B en el punto P, podemos considerar que la fuerza es ejercida sobre B por el campo y no por el cuerpo A. Como la fuerza sería experimentada por el cuerpo B en todos los puntos del espacio que rodea al cuerpo A, dicho espacio es un campo eléctrico.

Igualmente, podemos considerar que el cuerpo B crea un campo y que este campo ejerce una fuerza sobre el cuerpo A.

La comprobación experimental de la existencia de un campo eléctrico en un punto, se realiza colocando un cuerpo cargado en dicho punto (carga de prueba). Si se ejerce una fuerza eléctrica sobre el cuerpo cargado, existe un campo eléctrico en el punto (*figura 8c*).

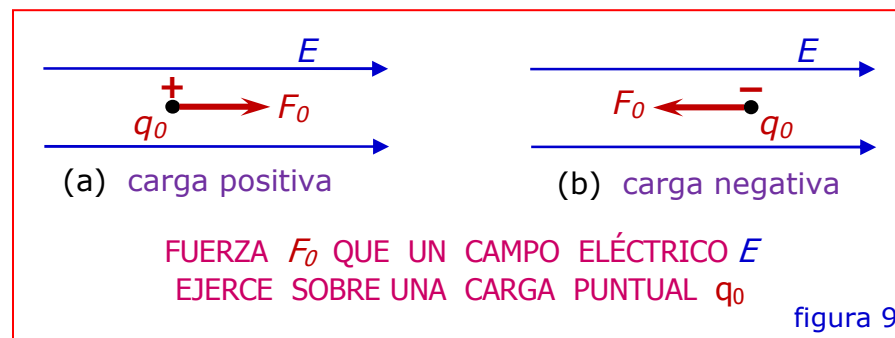
Se dice que existe un campo eléctrico en un punto, si sobre un cuerpo cargado colocado en dicho punto se ejerce una fuerza de origen eléctrico.

Puesto que la fuerza es una magnitud vectorial, el campo eléctrico también lo es. El valor del campo eléctrico E en cualquier punto, se define como el cociente entre la fuerza F_0 ejercida sobre un cuerpo de prueba colocado en

el punto y la cantidad de carga q_0 del cuerpo de prueba:

$$E = \frac{F_0}{q_0} \quad \left[\frac{N}{C} \right] \quad (7)$$

Es decir, el valor de un campo eléctrico es la fuerza por unidad de carga.



La dirección de un campo eléctrico en un punto, es la dirección de la fuerza ejercida sobre una carga de prueba positiva colocada en el punto (figura 9a).

Por consiguiente, la fuerza sobre una carga negativa es opuesta a la dirección del campo (figura 9b).

La ecuación (7) puede escribirse: $F_0 = q_0 E$ (8)

Esto es, la fuerza ejercida sobre una carga q_0 en un punto en donde la intensidad del campo eléctrico es E , es igual al producto de la intensidad del campo por la carga.

Para referirse al vector campo eléctrico en un punto, se utilizan indistintamente las siguientes expresiones: intensidad del campo eléctrico, intensidad del campo o campo eléctrico.

NOTA: Aunque desarrollaremos el cálculo sin utilizar notación vectorial, algunas de las relaciones más importantes las veremos en forma vectorial. Por ejemplo, como el campo eléctrico y la fuerza son vectores, mientras que la carga es un escalar, la ecuación (8) con notación vectorial se escribe:

$$\vec{F} = q \vec{E} \quad (9)$$

Esto indica a la vez que los vectores tienen el mismo sentido si q es positiva, y sentido opuesto si es negativa.

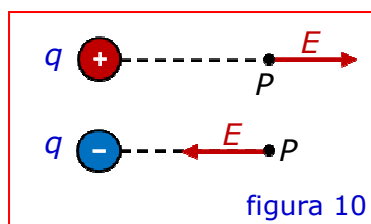
◆ Cálculo de la Intensidad del Campo Eléctrico:

La intensidad del campo eléctrico en un punto puede calcularse también partiendo de la Ley de Coulomb, si se conocen los valores y la posición de las cargas que crean el campo. Para calcular la intensidad del campo eléctrico en un punto P separado una distancia r de una carga puntual q, imaginamos una carga de prueba q₀ colocada en P. La fuerza sobre la carga de prueba es:

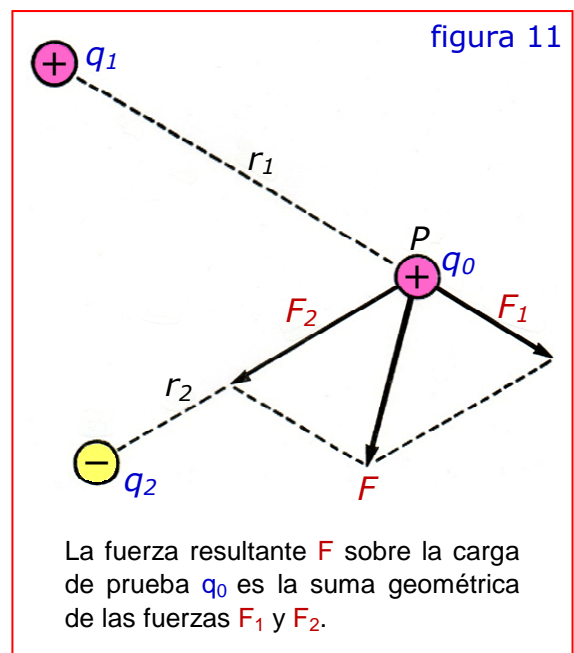
$$F = k \frac{qq_0}{r^2} \quad \text{y la intensidad del campo eléctrico en P:}$$

$$E = \frac{F}{q_0} = k \frac{q}{r^2}$$

El sentido del campo es tal que se aleja de la carga q si ésta es positiva y se acerca si es negativa (figura 10).



Si varias cargas puntuales $q_1, q_2, \text{ etc.}$, están a distancias $r_1, r_2, \text{ etc.}$, de un punto dado P (figura 11), cada una ejerce una fuerza sobre la carga de prueba q_0 colocada en el punto. La fuerza resultante es la suma geométrica de estas fuerzas:



$$F = k \frac{q_1 q_0}{r_1^2} + k \frac{q_2 q_0}{r_2^2} + \dots \quad (\text{suma geométrica})$$

$$F = k q_0 \sum \frac{q}{r^2} \quad (\text{suma geométrica})$$

El campo eléctrico en el punto P es: $E = \frac{F}{q_0}$ Luego:

$$E = k \sum \frac{q}{r^2} \quad (\text{suma geométrica}) \quad (10)$$

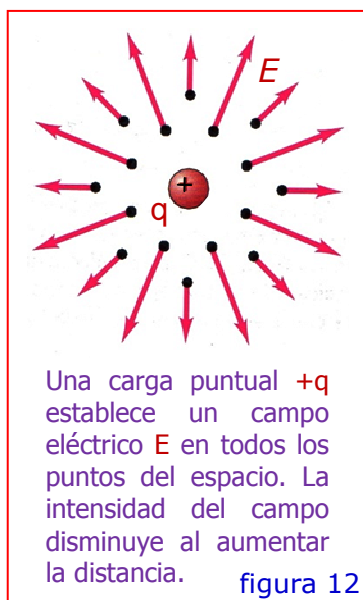
En la práctica, los campos eléctricos son creados generalmente por cargas distribuidas sobre la superficie de conductores de tamaño finito y no por cargas puntuales. La intensidad del campo eléctrico se calcula suponiendo divididas las cargas distribuidas en cargas infinitesimales dq . La suma de la ecuación (10) se convierte en una integral:

$$E = k \int \frac{dq}{r^2} \quad (\text{suma geométrica}) \quad (11)$$

Y en forma vectorial:

$$\vec{E} = k \int \frac{dq}{r^2} \hat{r} \quad (12)$$

donde $\hat{r} = \vec{r}/r$ es el vector unitario y \vec{r} es el vector desplazamiento dirigido desde el elemento de carga dq al punto en el cual se desea calcular el campo.



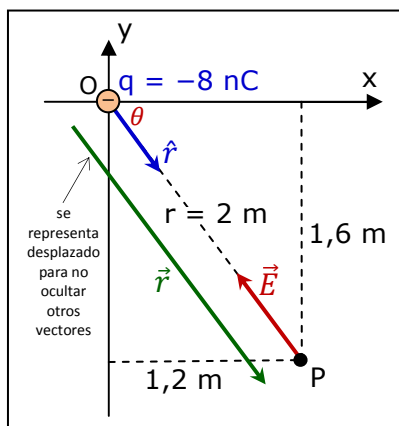
Hasta ahora hemos hecho hincapié en el cálculo del campo eléctrico \vec{E} en un punto determinado. Pero sabemos que \vec{E} puede variar de un punto a otro; es decir, no es una sola cantidad vectorial sino un conjunto infinito de cantidades vectoriales, cada una asociada con un punto del espacio. Es un campo vectorial. La figura 12 muestra un cierto grupo de vectores de campo producidos por una carga puntual positiva.

Ejercicio Nº 6: Calcular la magnitud del campo eléctrico en un punto situado a 2 m de una carga puntual $q = 4 \text{ nC}$.

$$E = k \frac{|q|}{r^2} = (9 \times 10^9) \frac{4 \times 10^{-9}}{2^2} = 9 \frac{N}{C}$$

Como q es positiva, la dirección del campo es de la carga hacia el punto.

Ejercicio N° 7: Una carga puntual $q = -8 \text{ nC}$ está situada en el origen. Encontrar el vector de campo eléctrico en el punto P ($x = 1,2 \text{ m}$; $y = -1,6 \text{ m}$) de la figura.



$$r = \sqrt{1,2^2 + (-1,6)^2} = 2 \text{ m}$$

El vector unitario \hat{r} está orientado desde el origen O hacia el punto P. Equivale al cociente entre el vector desplazamiento \vec{r} (del punto O al punto P) y su magnitud (o módulo) r :

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} = \frac{1,2 \hat{i} + (-1,6) \hat{j}}{2} = 0,6 \hat{i} - 0,8 \hat{j}$$

también:

$$\hat{r} = \cos \theta \hat{i} + \sin \theta \hat{j}$$

$$\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \hat{r} = (9 \times 10^9) \frac{(-8 \times 10^{-9})}{2^2} (0,6 \hat{i} - 0,8 \hat{j}) = (-10,8 \hat{i} + 14,4 \hat{j}) \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$\text{Comprobación: } |\vec{E}| = k \frac{|-q|}{r^2} = (9 \times 10^9) \frac{8 \times 10^{-9}}{2^2} = 18 \frac{\text{N}}{\text{C}} = \sqrt{10,8^2 + 14,4^2}$$

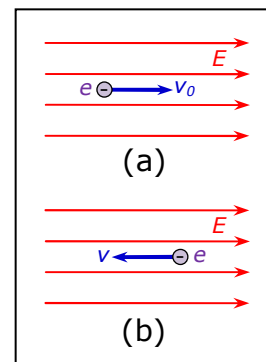
Ejercicio N° 8: Un electrón ingresa en un campo eléctrico uniforme $\vec{E} = (1.000 \frac{\text{N}}{\text{C}}) \hat{i}$ con una velocidad inicial $\vec{v}_0 = (2 \times 10^6 \text{ m/s}) \hat{i}$ en la dirección del campo. a) ¿Qué distancia recorrerá el electrón antes de que momentáneamente quede en reposo? b) Partiendo del reposo, ¿qué velocidad adquirirá el electrón cuando haya avanzado (en retroceso) 2 cm ?

$$v^2 = v_0^2 + 2 a x$$

$$a = F/m = -e E/m_e$$

$$\text{a) } x = \frac{-v_0^2}{2 a} = \frac{-v_0^2}{2 \left(\frac{-e E}{m_e} \right)} = \frac{m_e v_0^2}{2 e E}$$

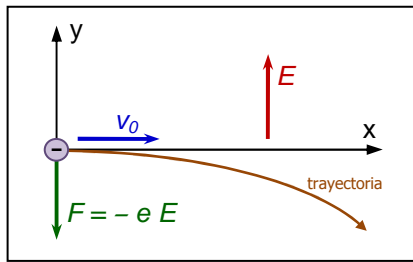
$$x = \frac{(9,11 \times 10^{-31}) (2 \times 10^6)^2}{2(1,6 \times 10^{-19})(1.000)} = 1,14 \times 10^{-2} \text{ m} = 1,14 \text{ cm}$$



$$\text{b) } v = \sqrt{2 a x} = \sqrt{2 \left(\frac{-e E}{m_e} \right) x} = \sqrt{2 \frac{(-1,6 \times 10^{-19}) \times 1.000}{(9,11 \times 10^{-31})} \times (-2 \times 10^{-2})}$$

$$v = 2,65 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ejercicio N° 9: Un electrón que se desplaza con velocidad constante, penetra en un campo eléctrico uniforme. El electrón se dirige horizontalmente hacia la derecha y el campo está dirigido verticalmente hacia arriba. Hallar la ecuación de la trayectoria del electrón.



$$x = v_0 t$$

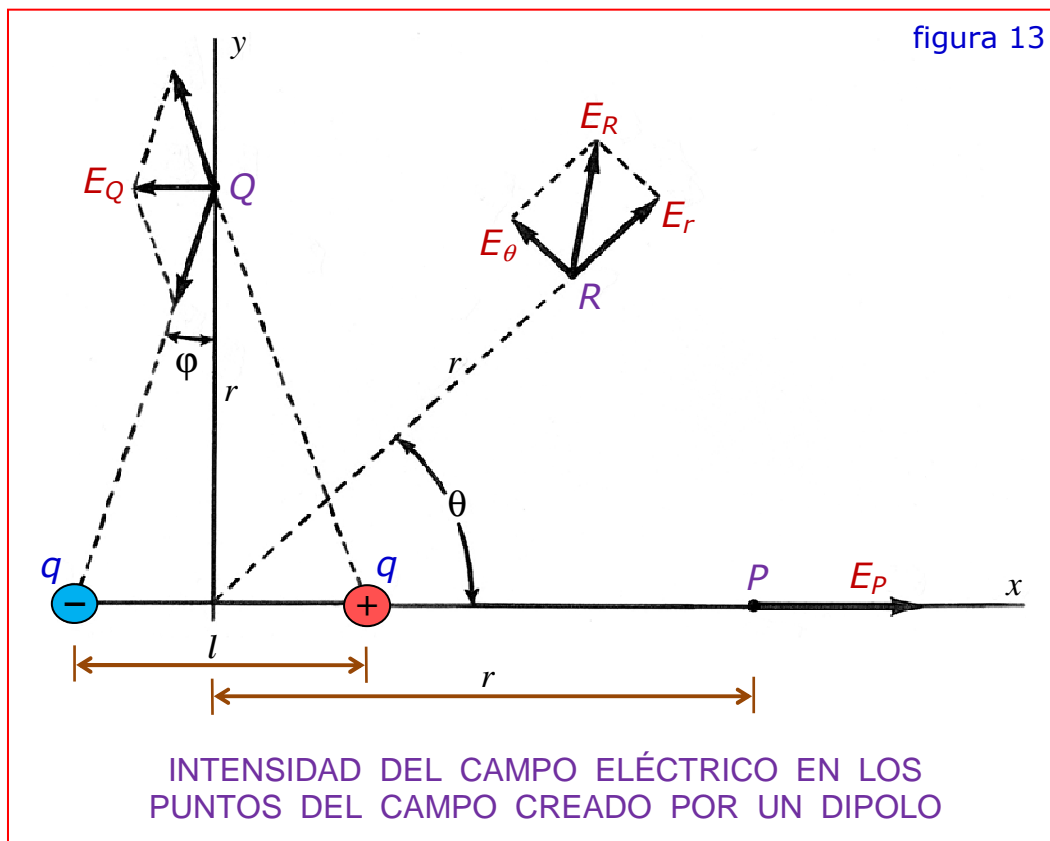
$$y = \frac{1}{2} a t^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{-e E}{m_e} \right) t^2$$

$$y = -\frac{e E}{2 m_e v_0^2} x^2 \Rightarrow \text{ecuación de una parábola}$$

El movimiento es el mismo que el de un cuerpo lanzado horizontalmente en el campo gravitatorio terrestre. La desviación de los electrones por un campo eléctrico, se utiliza para controlar la dirección de una corriente de electrones en muchos dispositivos electrónicos, como el tubo de rayos catódicos por ejemplo.

◆ Campo de un Dipolo:

El conjunto de dos cargas iguales y opuestas se llama dipolo. La figura 13 representa un dipolo formado por dos cargas puntuales $+q$ y $-q$, separadas una distancia l .



Consideremos primeramente el campo creado en un punto P situado en la prolongación del eje del dipolo y a una distancia r del centro del mismo. En