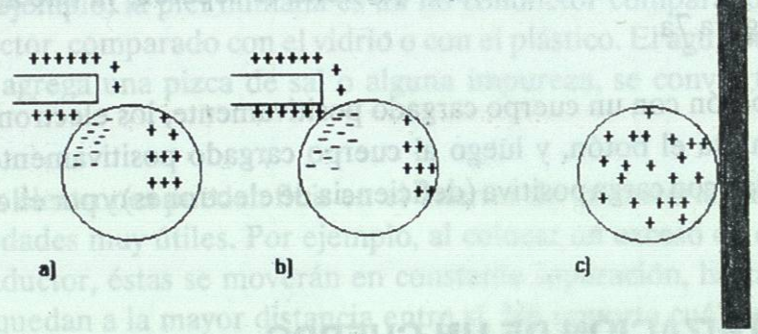


Fig. No. 8.

a) El cuerpo cargado se acerca al material conductor b) Los electrones son atraídos por el cuerpo cargado c) Después de separarse los dos cuerpos, la esfera queda con carga positiva. Los electrones que pierde la esfera son los que gana el otro cuerpo.

Un cuerpo se carga por inducción al acercarle otro ya electrizado. Por ejemplo, si una barra de plástico cargada negativamente se acerca a un trozo de papel en estado neutro o descargado; a medida que la barra se aproxima repele los electrones del papel hasta el lado más alejado del átomo. Así pues, la capa superficial del papel más próxima a la barra cargada, tiene el lado positivo de los átomos, mientras la superficie más alejada tiene el lado negativo. Como la superficie positiva del papel está más cerca a la barra que la superficie negativa, la fuerza de repulsión es menor a la de atracción y la barra cargada atrae el pedazo de papel. Cuando la barra electrizada se aleja, la carga inducida desaparece, ver figura 9.

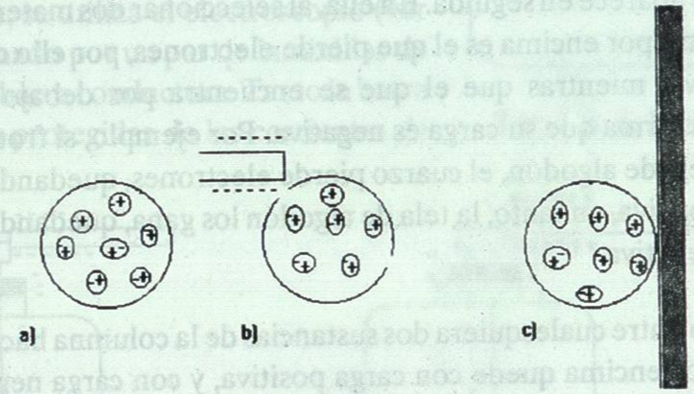


Fig. No. 9.

FIGURA 9. a) Cuerpo neutro b) Carga inducida por la presencia de un cuerpo cargado. Los cuerpos se atraen c) Si se retira el cuerpo cargado el trozo de papel vuelve a ser neutro.

6. LA CUANTIZACIÓN DE LA CARGA ELÉCTRICA

El estudio de las fuerzas electrostáticas se hizo antes de saber que los átomos de los cuerpos contienen electrones y que éstos eran los causantes de la carga eléctrica de los cuerpos. La medición de la carga eléctrica (cantidad de electricidad) se efectuó a partir de las fuerzas y las distancias entre los cuerpos electrizados. Además, como la carga elemental del electrón es muy pequeña para ser tomada como unidad práctica, en vez de ella se ha adoptado para medir

las cargas eléctricas la unidad antigua, el coulomb (C). Esta unidad es una carga tal que si se pudiera colocar a un metro de distancia de otra carga igual, actuaría entre ellas una fuerza de nueve mil millones de newtons (9×10^9 N).

Posteriormente se encontró que $1\ C = 6.24 \times 10^{18}$ veces la carga del electrón, o bien carga del electrón $= 1.60 \times 10^{-19}$ C

Por otra parte, como el coulomb es una unidad de carga eléctrica demasiado grande, es conveniente la utilización de los submúltiplos:

el milicoulomb (mC): $1mC = 10^{-3}$ C
el microcoulomb (μC): $1\ \mu C = 10^{-6}$ C

El coulomb (C) es la unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional (SI) y en el cgs es la unidad electrostática de carga (ues) o estatcoulomb, de donde:

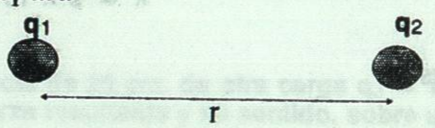
1 estatcoulomb $=$ 1 ues $= 2.08 \times 10^9$ veces la carga del electrón

7. LEY DE COULOMB

Charles Coulomb estudió las leyes que rigen la atracción y repulsión de las cargas eléctricas puntuales en reposo. Se entiende por una carga puntual la que tiene distribuída un cuerpo electrizado, cuyo tamaño es pequeño, comparado con la distancia que la separa del otro cuerpo cargado. Cuantificó la fuerza de atracción o repulsión entre cargas eléctricas puntuales, llegando a establecer :

1. La fuerza (F) de atracción o de repulsión entre dos cargas puntuales, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r) que las separa

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$



es decir , si la distancia entre las cargas eléctricas se aumenta al doble (2r), la fuerza entre las cargas disminuye a 1/4 de la fuerza inicial (1/4F); si la distancia se aumenta al triple (3r), la fuerza disminuye a 1/9 de la fuerza inicial (1/9F), etc.

2. La fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas, lo cual se representa como

$$F \propto q_1\, q_2$$

es decir, si la carga de uno se aumenta al doble digamos $2q_1$ y la otra (q_2) se incrementa al triple ($3q_2$), entonces F se incrementa a seis veces su valor inicial (6F). Si cada una de las cargas se incrementa al doble ($2q_1$ y $2q_2$) entonces la fuerza se incrementa a cuatro veces su valor inicial (4F), etc.

De los resultados anteriores se tiene que

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Para transformar esta relación en una igualdad, se cambia el signo de proporcionalidad (a) por un signo de igualdad incluyendo una constante de proporcionalidad, o sea

$$F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

esta ecuación da tanto la magnitud de la fuerza que ejerce q_1 sobre q_2 como la fuerza que ejerce q_2 sobre q_1 siendo

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}$$

en donde e_o (letra griega épsilon) es la constante de permitividad en el vacío y cuyo valor es igual a $\varepsilon_o = 8.854 \times 10^{-12}\frac{C^2}{Nm^2}$ de tal forma que

$$k = \frac{1}{4(3.1416)(8.854 \times 10^{-12}\frac{C}{Nm^2})}$$

El valor de la constante k en el Sistema Internacional (SI):

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

y en el cgs

$$k = 1\frac{dina\ cm^2}{ues^2}$$

finalmente, la Ley de Coulomb queda enunciada en los siguientes términos:

> *La magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.*

Las fuerzas eléctricas pueden ser de atracción o de repulsión. Cuando las cargas son de signos iguales, la fuerza es de repulsión mutua, en cambio, cuando las cargas son de signos opuestos, la fuerza es de atracción. La fuerza está en la dirección que sigue la recta que une

las cargas y su sentido depende si la fuerza es de atracción o de repulsión. La magnitud de la fuerza sobre una carga es igual a la magnitud de la fuerza sobre la otra carga, pero de sentido contrario, como lo establece la Tercera Ley de Newton.

Como se podrá observar, se ha hecho referencia a la Ley de Coulomb y su aplicación a dos cargas eléctricas puntuales que se encuentran en el vacío. Esta ecuación es aplicable, con una muy buena aproximación a la interacción de las cargas puntuales en el aire. Al estar en algún otro medio, el valor de la constante k cambia. Para los fines de este curso analizaremos la fuerza entre las partículas cargadas, en el aire o en el vacío, en donde la constante.

Cuando hay más de dos cargas eléctricas, para calcular la fuerza resultante sobre una de ellas se aplican los métodos ya utilizados para calcular dicha fuerza. Veamos algunos ejemplos

Ejemplo 1.
Una carga positiva de 6×10^{-6}C se encuentra a 0.030 m de una segunda carga positiva de 3×10^{-6}C.
a) Calcular la fuerza entre las cargas.
b) ¿Cuál será la fuerza, si la segunda carga fuese negativa?

datos:
$q_1 = 6 \times 10^{-6}$C.
$q_2 = 3 \times 10^{-6}$C.
$r = 0.030\ m = 3 \times 10^{-2}$m.

a) $F = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$

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

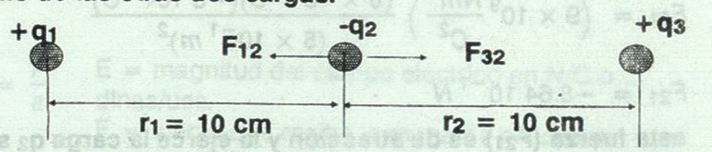
$$F = 18 \times 10^1\ N = 180\ N$$

como el signo es positivo, la fuerza es de repulsión, ya que las cargas son de signos iguales.

b).- Si la segunda carga fuese negativa, la fuerza tendría la misma magnitud, pero sería de atracción, ya que las cargas serían de signos opuestos.

Ejemplo 2.
Una carga $q_1 = 2 \times 10^{-6}$C se encuentra a una distancia de 20 cm. de otra carga $q_3 = 8 \times 10^{-6}$C, como se ve en la figura. Determinar el valor de la fuerza resultante y su sentido, sobre una carga $q_2 = -4 \times 10^{-6}$C al ser colocada en medio de las otras dos cargas.

$q_1 = 2 \times 10^{-6}$C
$q_2 = -4 \times 10^{-6}$C
$q_3 = 8 \times 10^{-6}$C
$r_1 = r_2 = 10$cm $= 0.1$m $= 1 \times 10^{-1}$m.



para calcular la fuerza resultante que actúa sobre la carga q_2, observamos que sobre ella actúan dos fuerzas: F_{12} (la fuerza que ejerce la carga q_1 sobre la carga q_2) y F_{32} (la fuerza que ejerce la carga q_3 sobre la carga q_2). Para F_{12} se tiene que

$$F_{12} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F_{12} = \left(9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\right)\frac{(2 \times 10^{-6}\ C)(-4 \times 10^{-6}\ C)}{(1 \times 10^{-1}\ m)^2}$$

$F_{12} = -72 \times 10^{-1}$ N $= -7.2$ N esta fuerza es de atracción, hacia la izquierda.

Para calcular F_{32} se tiene que

$$F_{32} = k\,\frac{q_1\,q_2}{r^2}$$

$$F_{32} = \left(9\times10^{9}\,\frac{Nm^2}{C^2}\right)\frac{(8\times10^{-6}\,C)(-4\,10^{-6}\,C)}{(1\times10^{-1}\,m)^2}$$

$$F_{32} = -288\times10^{-1}\,N = -28.8\,N$$

esta fuerza es de atracción, hacia la derecha.

Nota: recuerda que el signo negativo de la fuerza solamente nos indica que es de atracción.

Como estas dos fuerzas actúan en la misma línea de acción pero en sentidos contrarios, entonces, la magnitud de la fuerza resultante será la diferencia de las dos fuerzas, y el sentido, el que tenga la fuerza de mayor magnitud,

$$F_R = F_{32} - F_{12}$$

$$F_R = 28.8\,N - 7.2\,N$$

$F_R = 21.6$ N hacia la derecha.

Ejemplo 3.

Una carga $q_1 = -3\,\mu C$ recibe una fuerza de atracción debido a cada una de las cargas: $q_2 = 8\mu C$ y $q_3 = 7\,\mu C$, que se encuentran colocadas como se muestra en la figura. Determinar la fuerza eléctrica resultante que actúa sobre q_1, así como el ángulo que forma respecto al eje horizontal.

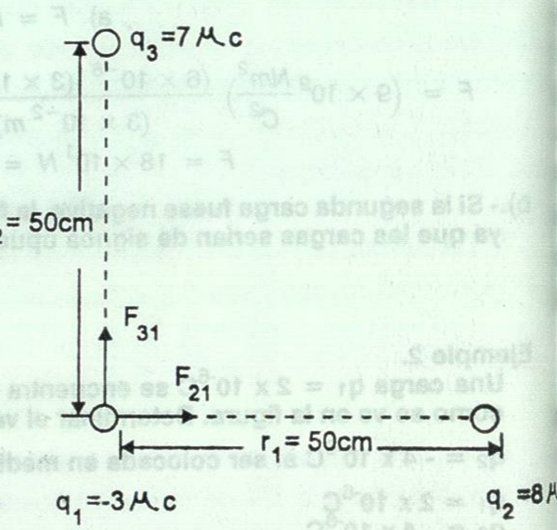
$q_1 = -3\,\mu C = -3\times10^{-6} C$

$q_2 = 8\,\mu C = 8\times10^{-6} C$

$q_3 = 7\mu C = 7\times10^{-6} C$

$r_1 = r_2 = 50\text{ cm} = 0.5\text{ m} = 5\times10^{-1}\text{ m}$

la carga q_1 se encuentra bajo la acción de dos fuerzas F_{21} (la fuerza que ejerce la carga q_2 sobre la carga q_1) y F_{31} (la fuerza que ejerce la carga q_3 sobre la carga q_1), como se muestra en la figura. Calculando cada una de ellas.



$$F_{21} = k\,\frac{q_2\,q_1}{r^2}$$

$$F_{21} = \left(9\times10^{9}\,\frac{Nm^2}{C^2}\right)\frac{(8\times10^{-6}\,C)(-3\,10^{-6}\,C)}{(5\times10^{-1}\,m)^2}$$

$$F_{21} = -8.64\,10^{-1}\,N$$

esta fuerza (F_{21}) es de atracción y la ejerce la carga q_2 sobre la carga q_1 y se encuentra horizontal hacia la derecha.

$$F_{31} = k\,\frac{q_3\,q_1}{r^2}$$

$$F_{31} = \left(9\times10^{9}\,\frac{Nm^2}{C^2}\right)\frac{(7\times10^{-6}\,C)(-3\,10^{-6}\,C)}{(5\times10^{-1}\,m)^2}$$

$$F_{31} = -7.56\,10^{-1}\,N$$

esta fuerza (F_{31}) es de atracción y la ejerce la carga q_3 sobre la carga q_1 y se encuentra vertical hacia arriba. El signo menos sólo indica que la fuerza es de atracción, por ello se puede omitir en el cálculo.

Graficando estas dos fuerzas eléctricas sobre q_1

Para calcular la fuerza resultante (F_R) se tiene que:

Magnitud $(F_R)^2 = (F_{21})^2 + (F_{31})^2$

$(F_R)^2 = (8.64\times10^{-1}N)^2 + (7.56\times10^{-1}N)^2$

$(F_R)^2 = 74.64\times10^{-2}N^2 + 57.15\times10^{-2}N$

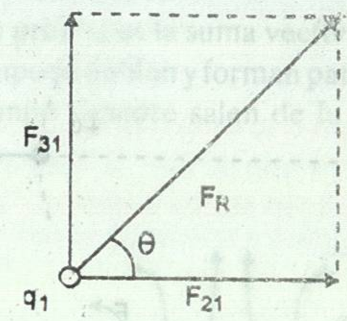
$(F_R)^2 = 131.79\times10^{-2}N^2$

entonces

$F_R = 11.47\times10^{-1}N$

$F_R = 1.147N$

Dirección:



$$\tan\theta = \frac{F_{31}}{F_{21}} = \frac{7.56\times10^{-1}\,N}{8.64\times10^{-1}\,N}$$

$$\tan\theta = 0.875$$

$$\theta = \tan^{-1}(0.875) = 41.2°$$

8. EL CAMPO ELÉCTRICO

Las fuerzas eléctricas, como las gravitacionales, actúan entre cuerpos que no se encuentran en contacto entre sí y entre aquéllos que lo están. Una manera de describir estas fuerzas implica el uso del concepto de campo de fuerza. Como ya se ha visto, a una masa le rodea un campo gravitacional, de tal forma que otra masa que se introduzca en esta región experimentará una fuerza sobre ella. La "alteración del espacio" provocada por una masa es su campo gravitacional. De manera análoga, una carga eléctrica produce un campo eléctrico alrededor de ella, el cual interactúa con cualquier otra carga que esté presente. Un campo eléctrico existe en una región del espacio en la que una carga eléctrica experimenta una fuerza eléctrica. Basta con el hecho de colocar una carga eléctrica en un punto y si sobre ella actúa una fuerza eléctrica, en ese punto existe un campo eléctrico. Un campo eléctrico tiene tanto magnitud como dirección y sentido.

La magnitud del campo eléctrico (E) en cualquier punto, en términos de la fuerza (F) experimentada por una carga positiva pequeña $+q$ cuando se coloca en dicho punto, equivale a la fuerza por unidad de carga, es decir

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

E = magnitud del campo eléctrico en N/C o dinas/ues.
F = fuerza que recibe la carga de prueba en newtons (N) o dinas.
q = valor de la carga de prueba en coulomb (C) o ues.

Esta carga positiva pequeña $+q$, llamada carga de prueba, produce efectos despreciables sobre las cargas cercanas (ver figura 10). En esta expresión se aprecia que si la carga de prueba es positiva, el campo eléctrico tiene la misma dirección que la fuerza eléctrica que actúa sobre la carga.

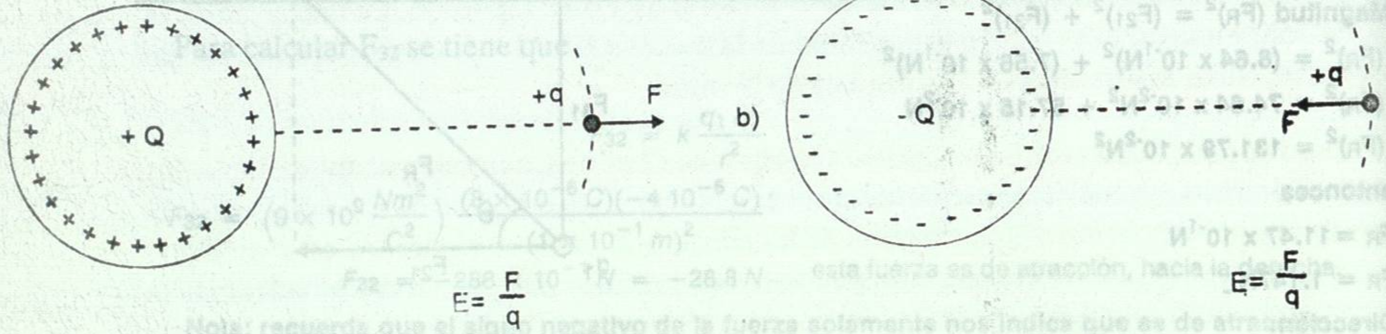


Fig. No. 10.

La magnitud del campo eléctrico es la fuerza por unidad de carga (F/q) y su dirección en un punto es la misma que corresponde a la dirección del movimiento de una carga positiva cuando se coloca en dicho punto.

La dirección del campo eléctrico en un punto es la misma que corresponde a la dirección del movimiento de la carga positiva de prueba, si se soltáse en dicho punto. Por ejemplo, supóngase que una carga positiva de prueba se pone en el punto A de la figura 11 (a). Esta carga es atraída radialmente hacia adentro, como lo indica la flecha A. La fuerza sobre la carga positiva de prueba está dirigida radialmente hacia el interior, sin importar en que punto se encuentre de la vecindad de la carga negativa central. En consecuencia, el campo eléctrico está dirigido como lo indican las flechas: el campo eléctrico cerca de una carga negativa tiene una dirección radial y hacia la carga.

Para obtener la dirección del campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva, se sigue el mismo procedimiento (ver figura 11b). La carga positiva de prueba es repelida radialmente hacia afuera por la carga positiva central. Por tanto, la dirección del campo eléctrico en la vecindad de una carga positiva es en dirección radial y hacia afuera de la carga.

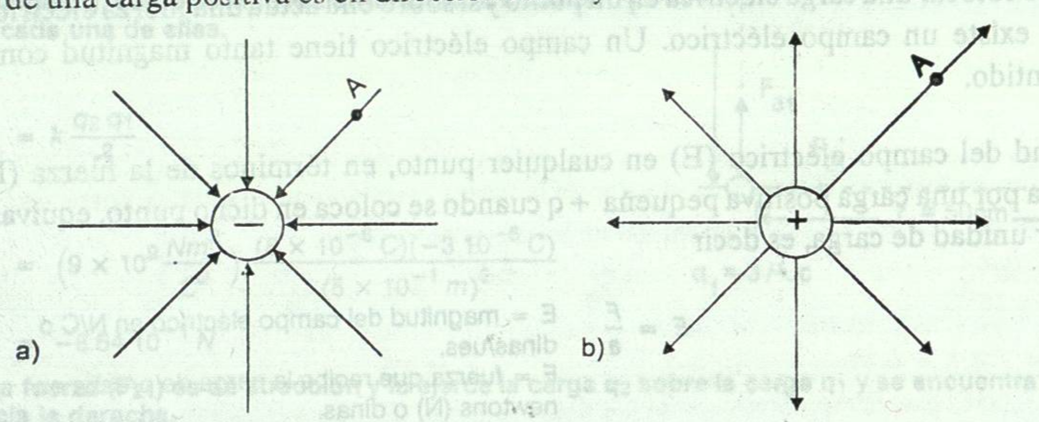
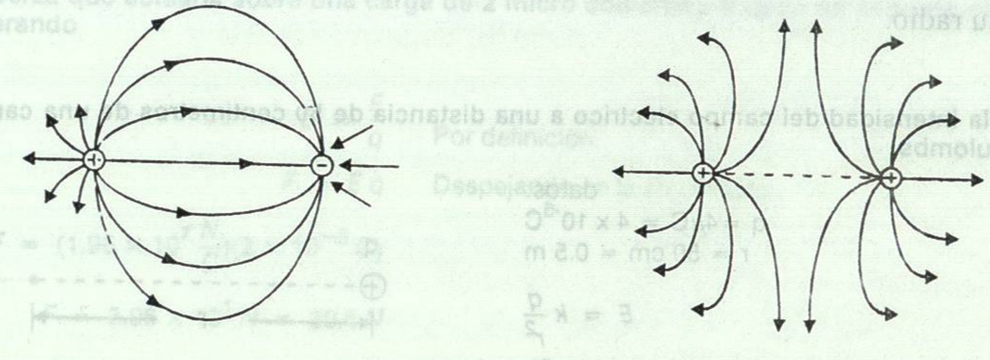


Fig. No. 11.

Líneas de campo eléctrico. a) Para una carga puntual negativa. b) Para una carga puntual positiva.

A las líneas dirigidas que se han trazado para señalar la dirección del campo eléctrico son llamadas líneas de campo eléctrico o líneas de fuerza. Las líneas de fuerza estarán más juntas entre sí cuando el campo eléctrico sea intenso y más separadas al disminuir su intensidad.

Cuando hay dos o más cargas, la fuerza sobre una carga de prueba es la suma vectorial de las fuerzas que produce cada carga individual. Las líneas de campo se doblan y forman patrones complejos, como se ilustra en la figura 12. Las líneas de campo siempre salen de la carga positiva y entran en una carga negativa.



a) Líneas de campo entre cargas opuestas.

b) Líneas de campo entre cargas de igual signo.

Fig. No. 12.

8.1 CAMPO ELÉCTRICO DE UNA CARGA PUNTUAL

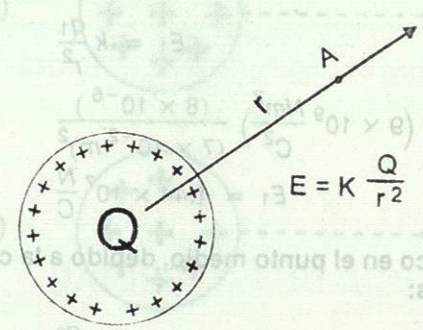
Experimentalmente se puede demostrar que la magnitud del campo eléctrico que rodea a un cuerpo eléctrico es directamente proporcional a la cantidad de carga en el cuerpo. Además se puede ver que a medida que una carga de prueba q_o se aleja de una carga Q, experimentará cada vez fuerzas menores. Lo anterior se deriva a partir de la Ley de Coulomb

$$F = k\frac{Q\,q_o}{r^2}$$

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

$$E = \frac{\frac{k\,Q\,q_o}{r^2}}{q_o}$$

$$E = k\frac{Q}{r^2}$$

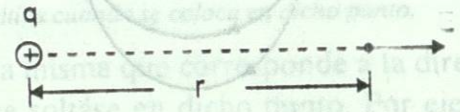


El sentido del campo es hacia fuera de Q, sí Q es positiva y hacia Q, sí Q es negativa. Con esta expresión se puede calcular la magnitud del campo eléctrico en un punto determinado, sí se conoce la carga eléctrica puntual que lo produce. Cuando más de una carga contribuye al campo, la resultante se obtiene como la suma vectorial de los campos producidos por cada una de las cargas eléctricas.

Si se desea calcular el campo eléctrico producido por una esfera uniformemente cargada, en un punto muy alejado de ésta, se considerará que toda su carga se encuentra colocada en su centro. Entendiendo por un punto muy alejado, aquél cuya distancia a la esfera es mucho mayor que su radio.

Ejemplo 4.
Calcular la intensidad del campo eléctrico a una distancia de 50 centímetros de una carga de 4 micro coulombs.

datos:
$q = 4\mu C = 4 \times 10^{-6} C$
$r = 50\ cm = 0.5\ m$



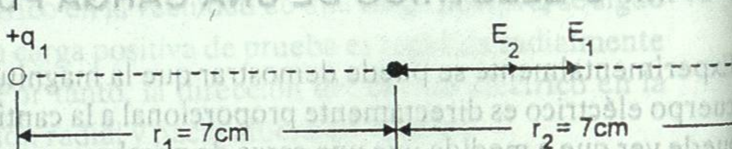
$$E = k\frac{q}{r^2}$$

$$E = \left(9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\right)\frac{(4 \times 10^{-6})}{(0.5\ m)^2}$$

$$E = 144 \times 10^3 \frac{N}{C} = 1.44 \times 10^5 \frac{N}{C}$$

Ejemplo 5.
Determinar la intensidad del campo eléctrico en el punto medio entre dos cargas puntuales q_1 = 8 micro coulombs y q_2=-3 micro Coulombs separadas por una distancia de 14 centímetros. Calcular también la fuerza que actuaría sobre una carga de 2mC si se colocara en ese punto.

Datos:
$q_1 = 8\,\mu C = 8 \times 10^{-6} C + q_1$
$q_2 = -3\,\mu C = 3 \times 10^{-6} C$
$r_1 = r_2 = 7cm$
$r_1 = 0.07m = 7 \times 10^{-2}\ m.$



El campo eléctrico en el punto medio, debido a la carga q_1 está dirigido hacia la derecha y su magnitud es:

$$E_1 = k\frac{q_1}{r^2}$$

$$E_1 = \left(9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\right)\frac{(8 \times 10^{-6})}{(7 \times 10^{-2} m)^2}$$

$$E_1 = 1.44 \times 10^7 \frac{N}{C}$$

El campo eléctrico en el punto medio, debido a la carga q_2 también está dirigido hacia la derecha y su magnitud es:

$$E_2 = k\frac{q_2}{r^2}$$

$$E_2 = \left(9 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\right)\frac{(-3 \times 10^{-6})}{(7 \times 10^{-2} m)^2}$$

$$E_2 = -0.54 \times 10^7 \frac{N}{C} = 5.4 \times 10^6 \frac{N}{C}$$ El signo menos indica que el campo eléctrico se debe a una carga negativa.

En la gráfica se observa que E_1 y E_2 están en la misma dirección y en el mismo sentido, de tal forma que el campo eléctrico resultante (E_R) tiene una magnitud

$$E_R = E_1 + E_2$$

$$E_R = 1.44 \times 10^7\ N/C + 0.54 \times 10^7\ N/C\ ;$$

$$E_R = 1.98 \times 10^7 N/C$$ hacia la derecha de la gráfica.

Cálculo de la fuerza que actuaría sobre una carga de 2 micro coulombs situada en el punto que se está considerando
$q = 2 \times 10^{-6}$ C

$$E = \frac{F}{q}$$ Por definición.

$$F = Eq$$ Despejando en la Ec. anterior.

$$F = (1.98 \times 10^7 \frac{N}{C})(2 \times 10^{-6}\ C)$$

$$F = 3.96 \times 10^1 N = 39.6\ N$$

9. ENERGÍA POTENCIAL ELÉCTRICA

Cuando se estudió la energía mecánica, se vió que un objeto puede tener energía potencial gravitacional debido a su ubicación en un campo gravitacional. De manera similar, un objeto cargado puede tener energía potencial en virtud de su posición en un campo eléctrico. Así como se requiere trabajo para levantar un objeto contra el campo gravitacional de la Tierra, también se requiere realizar un trabajo para empujar una partícula cargada contra el campo eléctrico de un cuerpo cargado. Este trabajo incrementa la energía potencial eléctrica de esa partícula. Considérese una pequeña carga positiva ubicada a cierta distancia de una esfera con carga positiva, como se ve en la figura 13. Si se desea acercar la pequeña carga a la esfera, se consumirá energía con el fin de vencer la repulsión eléctrica, es decir, se realizará trabajo al empujar la carga contra el campo eléctrico de la esfera. Este trabajo realizado al mover la pequeña carga hasta su nueva ubicación en el campo, lo gana esa carga. Esa energía que ahora posee la carga en virtud de su posición en el campo eléctrico, se denomina energía potencial eléctrica. Si se libera la carga, se acelerará en una dirección que la aleja de la esfera, y su energía potencial eléctrica se transforma en energía cinética.

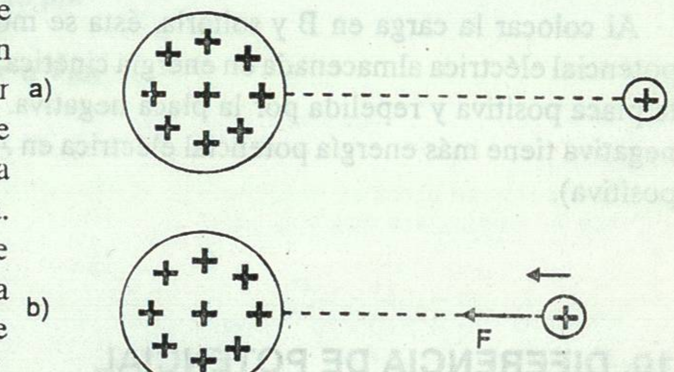


Fig. No. 13.
La carga pequeña tiene más energía potencial en (b) que en (a), debido al trabajo que se realizó para llevarla hasta la ubicación más cercana.

Consideremos el campo eléctrico uniforme entre las dos placas paralelas de cargas opuestas, como se muestra en la figura 14.