CAPÍTULO 10

# Electrostática

**Fig. 1.** Tales de Mileto (639 ó 624 - 547/6 a.C.) fue el iniciador de la indagación racional sobre el universo. Fue uno de los más grandes astrónomos y matemáticos de su época, a tal punto que era una lectura obligatoria para cualquier matemático en la Edad Media. Se destacó por su sabiduría práctica, su notable capacidad política y por la gran cantidad de conocimientos que poseía. Sus estudios abarcaron profusamente el área de la Geometría, Álgebra Lineal, cuerpos en el espacio y algunas ramas de la Física, tales como la Estática, Dinámica y Óptica.
Tuvo como discípulo y protegido a Pitágoras. Una de las frases célebres que se le atribuye es "Conócete a ti mismo".

## Introducción

En esta unidad estudiaremos los fenómenos eléctricos y magnéticos (electromagnetismo) desde sus comienzos en la antigüedad, hasta finales del siglo XIX.

Comenzaremos con el concepto de carga eléctrica y sus propiedades. En todas las situaciones que analizaremos en este capítulo, las cargas eléctricas permanecerán en reposo. Por este motivo a la rama de la Física que estudia estos fenómenos, se le denomina electrostática.

Electrostática es la rama de la Física que estudia los fenómenos eléctricos producidos por distribuciones de cargas en reposo.

Posteriormente desarrollaremos el concepto de campo eléctrico.

Los primeros descubrimientos relacionados con los fenómenos eléctricos tuvieron lugar en Grecia alrededor del año 600 a.C.

Tales de Mileto, (fig. 1) uno de los más destacados sabios griegos, observó que al frotar con una piel de animal un trozo de ámbar (fig.2), era capaz de atraer objetos livianos como plumas o pequeñas astillas de madera.

Recién alrededor del año 1600 se realizaron experimentos sistemáticos sobre este tipo de interacciones, destacándose los trabajos de William Gilbert (fig. 3) quien fue el primero en utilizar el término "**electricidad**", que proviene de "**elektron**" que significa ámbar en griego.

Entre otras cosas, Gilbert observó que la propiedad de atraer pequeños objetos luego de frotarse no era exclusiva del ámbar y que otras sustancias podían electrizarse de la misma forma. Posteriormente a las investigaciones de Gilbert, el francés Charles Dufay en 1733 describe que existen dos tipos de "electricidad", a las que posteriormente Benjamín Franklin denominaría "**electricidad positiva**" y "**electricidad negativa**".

**Fig. 2.** Trozo de ámbar, que es resina de pino fosilizada.

Lo que estos científicos llamaban "electricidad positiva y negativa", es lo que hoy denominamos "carga positiva y carga negativa".

Estos científicos además de estudiar las interacciones entre objetos electrizados (cargados) supusieron la existencia de un "fluido eléctrico" que pasaba de un objeto a otro cuando se electrizaban (cargaban).

Actualmente se ha demostrado que efectivamente hay algo que se transfiere cuando un cuerpo se carga, pero no es un fluido continuo, sino pequeñísimas partículas cargadas eléctricamente.

## Carga eléctrica

¿Dónde se encuentran las cargas eléctricas?

Se encuentran en toda la materia, formando parte de sus átomos.

El átomo es la menor porción de materia que conserva las propiedades del elemento químico.

A lo largo de la historia se han propuesto gran cantidad de modelos atómicos y si bien los actuales son complejos. (Fig. 4) Para nuestro estudio usaremos un modelo simplificado en el que distinguiremos dos zonas: una central llamada núcleo y otra que lo rodea denominada orbital atómico. (fig. 5)

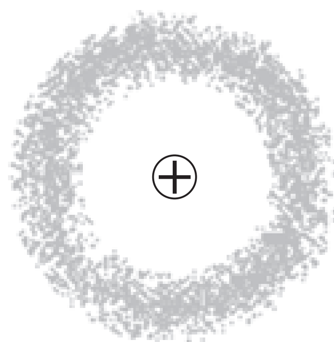

**Fig. 5.** Representación del átomo mediante orbitales. En ellos existe un 90-99% de probabilidad de encontrar al electrón.

Se sabe también que los átomos están formados por partículas subatómicas. En este curso nos interesa destacar tres de ellas:

**Protón** : Tiene carga positiva y se encuentra en el núcleo.

**Neutrón**: No tiene carga eléctrica y se encuentra en el núcleo.

**Electrón:** Tiene carga negativa y se encuentra en el orbital atómico.

Orbital atómico: es la región del espacio del átomo en la cual existe mayor probabilidad de encontrar a los electrones.

Para profundizar sobre las partículas subatómicas lee la figura 6.

**Fig. 3.** William Gilbert, médico inglés, nació en Colchester, Essex el 24 de mayo de 1544 y falleció en Londres el 10 de diciembre de 1603.
Realizó innumerables experimentos de electrostática y magnetismo. Definió el término de fuerza eléctrica como el fenómeno de atracción que se producía al frotar ciertas sustancias. A través de sus experiencias clasificó los materiales en conductores y aislantes e ideó el primer electroscopio. Descubrió la imantación por influencia, y observó que la imantación del hierro se pierde cuando se calienta al rojo. Estudió la inclinación de una aguja magnética concluyendo que la Tierra se comporta como un gran imán.

**Principio de incertidumbre.**

Para poder estudiar las propiedades de un átomo y de sus partículas constituyentes, es necesario iluminarlo; es decir hacer incidir luz sobre él. Esto trae un cambio en su contenido energético y en su posición. En otras palabras: el estudio del átomo lleva un error necesario que nos impide hablar con certeza de la posición o contenido energético del mismo. Esto imposibilita presentar un átomo como se ha hecho hasta el momento, puesto que se puede describir un espacio donde es muy probable encontrar un electrón, pero no se pude excluir la posibilidad de que se encuentre en otro lugar.

Según el principio de incertidumbre no se puede conocer con exactitud la posición del electrón ni su contenido energético. Esto obliga a usar un nuevo término "probabilidad", para la descripción del átomo.

**Fig. 4.**

**Los Quarks**

Hace 30 años se creía que los protones y los neutrones eran partículas elementales, pero experimentos en los que colisionaban protones con protones o con electrones a alta velocidad indicaron que en realidad estaban formados por partículas más pequeñas. Estas partículas fueron llamadas quarks por el físico de Caltech, Murray Gell-Mann, que ganó el premio Nobel en 1969 por su trabajo sobre dichas partículas.

Existe un cierto número de variedades diferentes de quarks. Se cree que hay como mínimo seis flavors (sabores), que llamamos up (arriba), down (abajo), strange (extraño), charmed (encanto), bottom (fondo) y top (cima). Cada sabor puede tener uno de los tres posibles "colores", rojo, verde y azul. (Debe aclararse que estos términos son únicamente etiquetas, los quarks son mucho más pequeños que la longitud de onda de la luz visible y por lo tanto, no poseen ningún color).

Un protón o un neutrón están constituidos por tres quarks, uno de cada color. Un protón contiene dos quarks up y un quark down; un neutrón contiene dos down y un up.

Fig. 6.

**Consideraciones importantes sobre los átomos:**

- El número de protones es característico de cada elemento químico

El número de protones correspondiente a cada elemento, se denomina número atómico y lo puedes obtener en una tabla periódica.

- El número de electrones es el mismo que el de protones.
- La carga de un electrón y un protón tiene el mismo valor absoluto pero diferente signo $\Rightarrow q_{protón} = - q_{electrón}$
- La carga total de un átomo es nula.

Si un átomo tiene igual número de protones que electrones y como las cargas de estas partículas son opuestas, su carga neta es cero.

En este capítulo veremos diferentes mecanismos por los cuales es posible modificar el número de electrones de un átomo. En el caso de los protones no ocurre lo mismo, no podemos modificar su número mediante procedimientos sencillos.

- Un átomo que perdió electrones, tiene carga neta positiva y recibe el nombre de catión.
- Un átomo que ganó electrones, tiene carga neta negativa y recibe el nombre de anión.

Catión: átomo cargado positivamente.
Anión: átomo cargado negativamente.

Podemos concluir que:

Un cuerpo está cargado si el número de electrones es distinto al de protones.

- Si tiene más electrones que protones se encuentra cargado negativamente.
- Si tiene menos electrones que protones se encuentra cargado positivamente.

## Propiedades de la carga eléctrica

### Cuantización

Una magnitud está cuantizada cuando sus valores no son continuos y solo puede tomar valores determinados. Al ser la carga del electrón la mínima cantidad de carga que podemos encontrar en la naturaleza, un cuerpo puede tener un electrón de más o de menos, dos, cinco o varios millones, pero nunca tendrá por ejemplo 2,5 electrones de carga .

La carga eléctrica de un electrón es la mínima cantidad de carga existente en forma estable en la naturaleza y la carga de un objeto siempre es múltiplo de la carga del electrón.

**Conservación**

En general decimos que una magnitud se conserva si en determinadas condiciones su valor permanece constante. Magnitudes como la masa y la energía, que has estudiado en cursos anteriores, cumplen esta propiedad.

Si analizamos el experimento de Tales de frotar un trozo de ámbar con la piel de animal, sabemos que el ámbar aumenta el número de electrones y se carga negativamente. Estos electrones no se crearon en dicho proceso, sino que se trasladaron desde la piel, que al perder electrones quedó cargada positivamente. En todo el proceso la carga eléctrica total permaneció constante.

Principio de conservación de la carga eléctrica:

La carga total no se crea ni se destruye.

**Unidades**

El valor de la carga eléctrica de un cuerpo se simboliza con la letra "q". Su unidad en el Sistema Internacional, se denomina Coulomb (Fig. 7), su símbolo es "C" y equivale a la carga de 6,25 x $10^{18}$ electrones.

En 1909 Robert Andrews Millikan (Estadounidense 1868-1953) ideó un aparato bastante sencillo para la determinación de la carga del electrón. Su valor expresado en Coulomb es el siguiente:

$$q_{electrón} = -1{,}6 \times 10^{-19} C$$
$$1C = 6{,}25 \times 10^{18} \times |q_{electrón}|$$

En 1923 Millikan obtuvo el premio Nobel de Física por su trabajo en determinar el valor de la carga del electrón.

El Coulomb es una unidad de carga bastante grande por lo que es común el uso de prefijos para escribir submúltiplos de un Coulomb. Por ejemplo un micro Coulomb se indica 1$\mu$C y equivale a 1 x $10^{-6}$C.

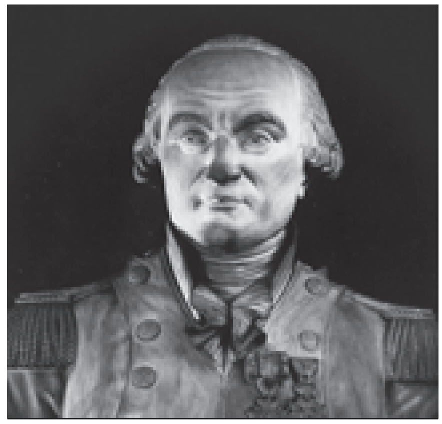

**Fig.7. Charles Augustin de Coulomb**

Nació en Francia el 14 de junio de 1736 y falleció el 23 de agosto de 1806. Físico e ingeniero militar. Se recuerda por haber descrito de manera matemática la ley de interacción entre cargas eléctricas. En su honor la unidad de carga eléctrica en el sistema internacional lleva el nombre de Coulomb.

Compartió el primer premio de la Academia de Ciencias de París por su artículo sobre las brújulas magnéticas y recibió también el primer premio por su trabajo clásico acerca de la fricción, un estudio que no fue superado durante 150 años.

Durante los siguientes 25 años, presentó 25 artículos a la Academia sobre electricidad, magnetismo, torsión y aplicaciones de la balanza de torsión, así como varios cientos de informes sobre ingeniería y proyectos civiles.

La mayor aportación de Coulomb a la ciencia fue en el campo de la electrostática y el magnetismo. En 1777 inventó la balanza de torsión con la cual, midió con exactitud la fuerza entre las cargas eléctricas. Con este invento, Coulomb pudo establecer el principio, conocido ahora como **Ley de Coulomb** que veremos más adelante.

| prefijo | nombre | valor |
|---|---|---|
| p | pico | $10^{-12}$ |
| n | nano | $10^{-9}$ |
| $\mu$ | micro | $10^{-6}$ |
| m | mili | $10^{-3}$ |

## Ejemplo 1

Al frotar una regla con un trozo de tela, se transfieren a la regla $2{,}0 \times 10^4$ electrones.

a) ¿Cuál es la carga de la regla expresada en Coulomb?

La carga de cada electrón es $-1{,}6 \times 10^{-19}$C , multiplicando este valor por $2{,}0 \times 10^4$, obtenemos la carga total de la regla:

$$q_{regla} = 2{,}0 \times 10^4 \times (-1{,}6 \times 10^{-19}\,C) \Rightarrow \boxed{q_{regla} = -3{,}2 \times 10^{-15}\,C}$$

b) ¿La tela quedó cargada?

Sí, los electrones que recibió la regla fueron cedidos por la tela y como sabemos que la carga se conserva, la tela quedará cargada positivamente y el valor de la carga es

$$\boxed{q_{tela} = 3{,}2 \times 10^{-15}\,C}$$

**Fig. 8.** Etapa 1.

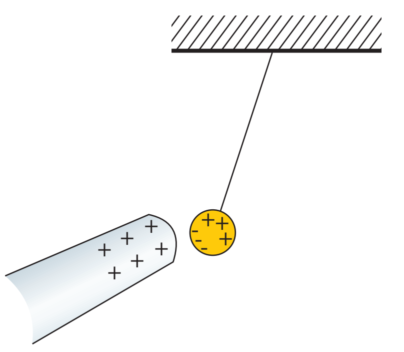

**Fig. 9.** Etapa 2. Al reordenarse las cargas, la varilla y la bolita se atraen.

## Ejemplo 2

Analiza las interacciones y transferencias de carga eléctrica en cada una de las etapas del siguiente experimento:

**Etapa 1:** Un alumno toma una varilla de vidrio inicialmente descargada y la frota con un trozo de tela (fig. 8).

Al frotar los cuerpos se produce el pasaje de electrones del vidrio a la tela. La varilla perdió electrones y quedó cargada positivamente y la tela que los recibió quedó cargada negativamente.

¿Por qué se produce el traspaso de electrones y cómo sabemos qué cuerpo los cede y cuál los acepta?
El frotar dos cuerpos hace que los átomos que los forman se aproximan lo suficiente como para que algunos electrones puedan pasar de uno a otro. Hacia qué cuerpo se producirá la transferencia depende de factores que tiene que ver con la estructura atómica del material.
Si frotamos un material cuyos electrones están más fuertemente ligados a sus núcleos que el otro, este último cede electrones porque su atracción es más débil.

**Etapa 2:** Luego el alumno acerca la varilla a una pequeña bolita de corcho, inicialmente neutra y suspendida por un hilo, observando que la bolita es atraída hacia la varilla.

La atracción se produce porque al acercar la varilla cargada positivamente, dentro de la bolita se reordenan las cargas de forma que los electrones se desplazan a la zona más cercana a la varilla (fig. 9).

**Etapa 3:** Momentos después de ponerse en contacto la varilla con la bolita, esta es repelida por la varilla.
Cuado se ponen en contacto la varilla cargada positivamente, con la zona de la bolita que tiene exceso de cargas negativas, se produce el pasaje de electrones desde la bolita a la varilla (fig. 10).
La bolita queda cargada positivamente por la pérdida de electrones y se repele con la varilla que también está cargada positivamente.

**En síntesis:**

Un cuerpo está cargado si el número de electrones es distinto al de protones.

- En la etapa 1 se produce lo que se llama "carga por fricción"
- En la etapa 2 se produce lo que se llama "inducción electrostática" y "polarización" de cargas dentro de la bolita.
- En la etapa 3 se produce lo que se llama "carga por contacto"

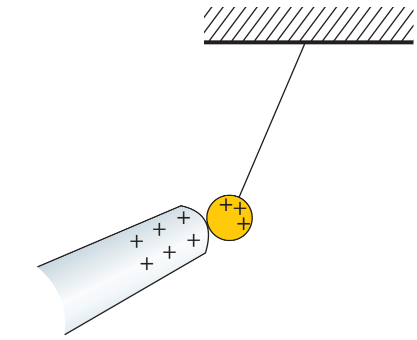

**Fig. 10.** Etapa 3. Al tocarse la varilla y la bolita se cargan con igual signo.

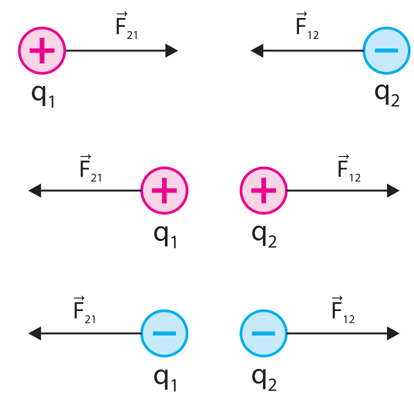


**Fig. 11.** Atracción y repulsión entre cargas.

## Ley de Coulomb

En el ejemplo 2 pudimos observar que cuando acercamos dos objetos cargados estos interactúan ejerciéndose fuerzas de origen eléctrico.

**Si las cargas eléctricas son de igual signo, las fuerzas eléctricas son de repulsión. Por el contrario si las cargas eléctricas son de signo opuesto, las fuerzas eléctricas son de atracción.** (fig. 11).

A partir de estudios experimentales, Coulomb determinó que el módulo de las fuerzas eléctricas entre dos cargas puntuales (Fig. 12) depende de principalmente de dos factores: los valores de las cargas y la distancia entre ellas.

a) La fuerza eléctrica en función del producto de las cargas eléctricas

Dos cargas de valor "q" interactúan con una fuerza eléctrica de módulo "F". Otras dos cargas de valores "2q" y "3q" ubicadas una a igual distancia, se ejercerán fuerzas de módulo "6F" (fig 13a).

Observa que una carga aumentó 2 veces su valor y la otra 3 veces, lo que determinó que la fuerza aumentara 6 veces, que surge del producto 2x3.

**La fuerza eléctrica es directamente proporcional al producto de las cargas eléctricas.**

$$\mathbf{F \propto q_1 \times q_2}$$

Denominamos "carga puntual" a un cuerpo cargado cuyo tamaño es mucho menor que el de los objetos de su entorno.

En general cuándo hablemos de "cargas eléctricas" nos estaremos refiriendo a "partículas puntuales cargadas"

**Fig. 12.**

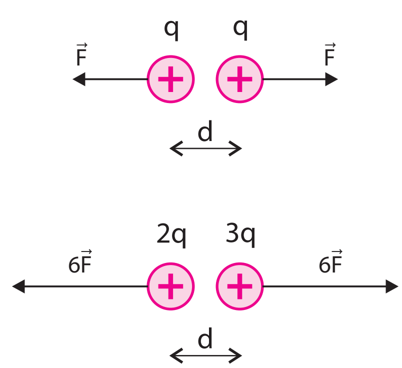


**Fig. 13a.** La fuerza eléctrica es directamente proporcional al producto de la cargas "$q_1$" y "$q_2$".

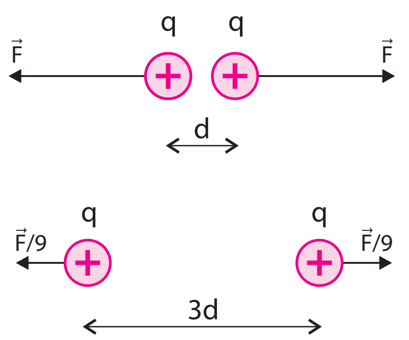


**Fig. 13b.** La fuerza eléctrica es inversamente proporcional a la distancia "d" ente las cargas elevada al cuadrado

b) La fuerza eléctrica en función de la distancia entre las cargas.

Dos cargas separadas una distancia "d" interactúan con una fuerza eléctrica de módulo "F". Si las mismas cargas se separan hasta una distancia "3d", la fuerza de interacción disminuirá 9 veces (fig 13b).

Observa que si la distancia aumenta 3 veces la fuerza disminuye 9 veces, que surge de elevar al cuadrado el número 3.

**La fuerza eléctrica es inversamente proporcional a la distancia entre las cargas elevada al cuadrado.** $F \propto \frac{1}{d^2}$

Teniendo en cuenta ambas relaciones simultáneamente, deducimos que la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es directamente proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

$$\left.\begin{array}{l} \mathbf{F \propto q_1 \times q_2} \\ \\ \mathbf{F} \propto \frac{1}{d^2} \end{array}\right\} \quad \boxed{F \propto \frac{q_1 \times q_2}{d^2}}$$

Llegamos a expresar la relación que encontró Coulomb, entre la fuerza eléctrica, las carga eléctricas y la distancia que las separa.

**Enunciado de la Ley de Coulomb**

Dos cargas puntuales "**$q_1$" y "$q_2$"** separadas una distancia **"d"** se atraen o se repelen con una fuerza eléctrica cuyo módulo se calcula:

$$\left|\vec{F}\right| = \frac{K \times |q_1| \times |q_2|}{d^2}$$

Consideraciones importantes:

- Las fuerzas que actúan sobre $q_1$ y $q_2$ forman un par de fuerzas de acción y reacción (Tercera Ley de Newton). Por lo tanto tienen siempre igual módulo, igual dirección y sentidos opuestos (fig 14).

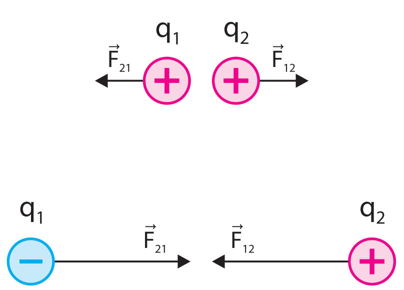


**Fig. 14.** Las fuerzas eléctricas sobre las cargas tienen igual modulo, y dirección pero sentidos opuestos, sin importar los valores y signos de las cargas de acuerdo con la 3ª Ley de Newton.

- Las unidades en el Sistema Internacional de las magnitudes involucradas en esta ecuación son las siguientes:

$[F]$ = N (Newton)

$[q]$ = C (Coulomb)

$[d]$ = m (Metro)

$[K] = \frac{Nm^2}{C^2}$

- "K" es una constante, se le denomina constante de Coulomb. Si las cargas se encuentran en el vacío y se utilizan unidades del S.I., su valor es

$$\boxed{K = 9{,}0 \times 10^{9}\,\frac{Nm^2}{C^2}}$$

- Para calcular el módulo de la fuerza no se toman en cuenta los signos de las cargas y se utilizan solamente sus valores absolutos.

Recuerda que el módulo de una fuerza es siempre positivo.

## Ejemplo 3

La carga eléctrica de la partícula de la izquierda (fig. 15) es $q_1 = 2{,}0\mu C$ ($2{,}0 \times 10^{-6}C$) y al encontrarse a 30cm de $q_2$ experimenta una fuerza eléctrica cuyo módulo es 0,60 N.

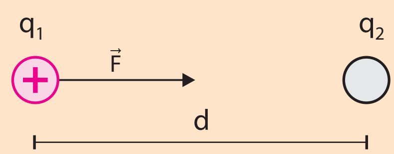


**Fig. 15.** Ejemplo 5

a) ¿Cuál es el signo de $q_2$?

El signo de $q_2$ debe ser negativo, porque en la figura 15 vemos que atrae a $q_1$ cuyo signo es positivo. Las cargas de distinto signo se ejercen fuerzas de atracción.

b) ¿Cuál es el valor de $q_2$?
Calculamos $q_2$ despejando de la ecuación de la Ley de Coulomb:

$$\left|\vec{F}\right| = \frac{K \times |q_1| \times |q_2|}{d^2} \Rightarrow |q_2| = \frac{\left|\vec{F}\right| \times d^2}{K \times |q_1|} = \frac{0{,}60N \times 0{,}30^2\,m^2}{9{,}0 \times 10^9\,\frac{Nm^2}{C^2} \times 2{,}0 \times 10^{-6}C}$$

$$\Rightarrow |q_2| = 3{,}0 \times 10^{-6}C$$

Como sabemos que $q_2$ es negativa, el resultado es $\boxed{q_2 = -3{,}0 \times 10^{-6}\,C}$

c) ¿Cuál será el módulo de la fuerza eléctrica si la distancia se reduce a la mitad?

Como la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, es de esperar que al disminuir la distancia a la mitad la fuerza aumente 4 veces ($2^2$) y su nuevo valor sea: $F = 4 \times 0{,}60N \Rightarrow F = 2{,}4N$

Verifiquemos nuestro razonamiento utilizando la ecuación de la Ley de Coulomb:

$$\left|\vec{F}\right| = \frac{K \times |q_1| \times |q_2|}{d^2} = \frac{9{,}0 \times 10^9\,\frac{Nm^2}{C^2} \times 2{,}0 \times 10^{-6}C \times 3{,}0 \times 10^{-6}C}{0{,}15^2\,m^2} = 2{,}4\,N$$

$$\boxed{F = 2{,}4\,N}$$

## Ejemplo 4

Dada la distribución de cargas puntuales de la figura 16, determina la fuerza neta sobre $q_2$. Los valores de las cargas son los siguientes:
$q_1 = 4{,}0\mu C$ ; $q_2 = 1{,}0\mu C$ ; $q_3 = -3{,}0\mu C$.

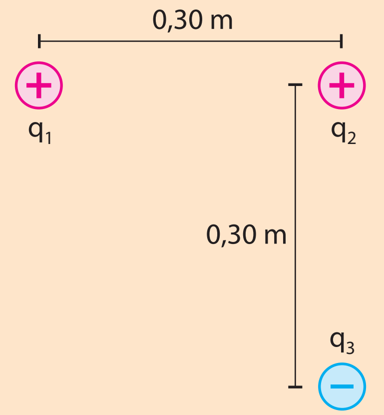


**Fig. 16.** Ejemplo 4

Sobre $q_2$ actúan dos fuerzas eléctricas, una en su interacción con $q_1$ que llamaremos $\vec{F}_{12}$ y la que le ejerce $q_3$ indicada como $\vec{F}_{32}$.
Para determinar la fuerza neta, debemos calcular cada una por separado, representarlas y luego hallar la resultante sumando vectorialmente ambas fuerzas.(Fig. 17)
Calculamos las fuerzas aplicando la ecuación de la Ley de Coulomb:

$$\left|\vec{F}_{12}\right| = \frac{K \times |q_1| \times |q_2|}{d_{12}^{\ 2}} = \frac{9{,}0 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \times 4{,}0 \times 10^{-6}C \times 1{,}0 \times 10^{-6}C}{0{,}30^2 m^2}$$

$$\boxed{\left|\vec{F}_{12}\right| = 0{,}40\,N}$$

$$\left|\vec{F}_{32}\right| = \frac{K \times |q_3| \times |q_2|}{d_{32}^{\ 2}} = \frac{9{,}0 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \times 3{,}0 \times 10^{-6}C \times 1{,}0 \times 10^{-6}C}{0{,}30^2 m^2}$$

$$\boxed{\left|\vec{F}_{32}\right| = 0{,}30\,N}$$

Recomendamos repasar los diferentes métodos para sumar fuerzas tratados en el curso de tercer año.

**Fig. 17.**

En la figura 18 hemos representado a escala ambas fuerzas, teniendo en cuenta que las cargas $q_1$ y $q_2$ se repelen por ser de igual signo mientras que $q_2$ y $q_3$ se atraen por tener signos opuestos.

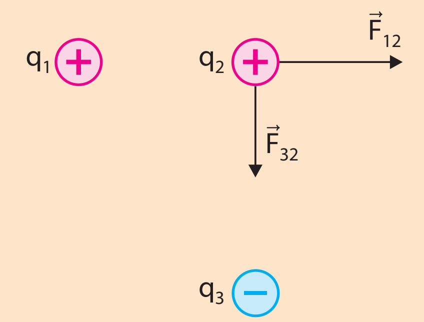


**Fig. 18.** Representación de $\vec{F}_{12}$ y $\vec{F}_{32}$

Para determinar la fuerza neta de dos fuerzas en diferentes direcciones utilizaremos el método del paralelogramo (fig. 19)

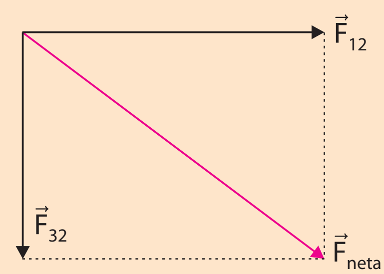


**Fig. 19.** Escala 1cm – 0,10N

La longitud del vector resultante es 5,0cm que según nuestra escala (1cm – 0,10N) corresponde a una fuerza $|\vec{F}_{Neta}| = 0{,}50N$

También es posible calcular analíticamente el módulo de la fuerza neta utilizando el Teorema de Pitágoras. En la figura 20 vemos que los vectores $\vec{F}_{12}$, $\vec{F}_{32}$ y $\vec{F}_{Neta}$ forman un triángulo rectángulo en el que $\vec{F}_{12}$ y $\vec{F}_{32}$ son los catetos y $\vec{F}_{Neta}$ es la hipotenusa.

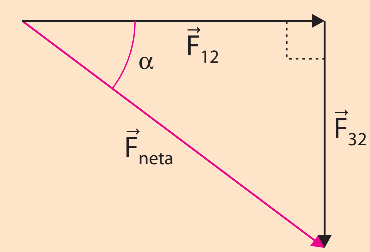


**Fig. 20.** Los vectores fuerza forman un triángulo rectángulo.

Recordando que la hipotenusa se calcula $Hip = \sqrt{cat^2 + cat^2}$ :

$$|\vec{F}_{Neta}| = \sqrt{\left|\vec{F}_{12}\right|^2 + \left|\vec{F}_{32}\right|^2} = \sqrt{0{,}40^2N^2 + 0{,}30^2N^2} \Rightarrow \boxed{|\vec{F}_{Neta}| = 0{,}50N}$$

Para que quede completamente definido el vector, nos falta especificar su dirección. Para ello podemos hacerlo también por dos procedimientos. **Método gráfico**, midiendo directamente el ángulo $\alpha$ con semicírculo. **Método analítico**, calculando su valor:

$$tg\alpha = \frac{cat.op}{cat.ady} = \frac{F_{32}}{F_{12}} = \frac{0{,}30N}{0{,}40N} = 0{,}75 \quad \alpha = tg^{-1}0{,}75 = 37° \quad \boxed{\alpha = 37°}$$

En lugar de $\alpha$, podríamos haber calculado el ángulo complementario $\beta$.
$\beta = 90° - \alpha$ $\quad \beta = 53°$
Especificando uno de los dos ángulos es suficiente.

## Campo Eléctrico

Consideremos una carga "Q" fija en una determinada posición y algunos puntos (a, b y c ) del espacio que la rodean (fig. 21).

Si en cualquiera de esos puntos colocáramos otra carga "q" positiva que llamaremos "carga de prueba", sobre ella actuaría una fuerza eléctrica ejercida por la carga "Q" (fig. 22). Esto nos muestra que el espacio que rodea a "Q" se ha visto modificado por su presencia.

Para describir este hecho decimos que "Q" genera un campo eléctrico a su alrededor y dicho campo ejerce una fuerza eléctrica sobre "q".

En un punto del espacio existe un Campo Eléctrico si al colocar una carga en dicho punto, actúa sobre ella una fuerza de origen eléctrico.

El concepto de campo es mucho más amplio y puede aplicarse a otras magnitudes físicas. Por ejemplo un campo de temperaturas o presiones En dichos campos a cada punto del espacio le corresponderá un valor de temperatura o presión respectivamente.

Los campos pueden clasificarse en campos escalares y vectoriales

**Campo Escalar:** a cada punto del espacio se le asigna un valor numérico con su correspondiente unidad de medida. Por ejemplo un campo de temperatura (fig 23).

**Campo Vectorial:** a cada punto del espacio se le asigna un vector, por lo que además de un valor numérico (módulo del vector) debe especificarse su dirección y sentido. Por ejemplo un campo eléctrico o un campo magnético.

### Vector Campo Eléctrico

El campo eléctrico es una magnitud vectorial lo que implica que para definirlo es necesario conocer su módulo, dirección y sentido en cada punto.

El vector campo eléctrico "$\vec{E}$" creado por una carga Q, tendrá las siguientes características:

- dirección y sentido igual que la fuerza "$\vec{F}$" que este campo aplicaría a una carga puntual q > 0 ubicada en dicho punto.
- $\left|\vec{E}\right| = \dfrac{\left|\vec{F}\right|}{q}$ módulo (fig. 24)

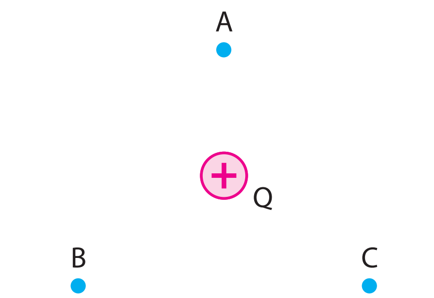

**Fig. 21.**

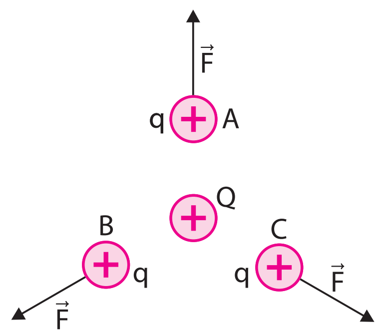

**Fig. 22.** La carga "Q" ejerce fuerza sobre "q".

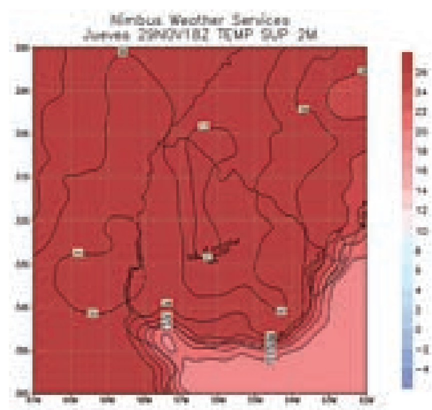
**Fig. 23.** Campo escalar de temperaturas

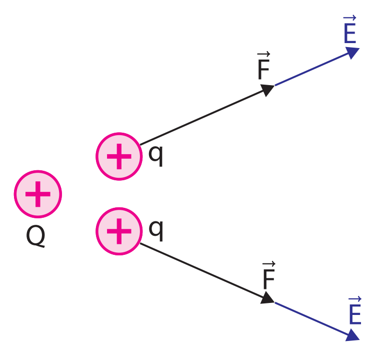

**Fig. 24.** La carga Q produce campo eléctrico en todos los puntos que la rodean.

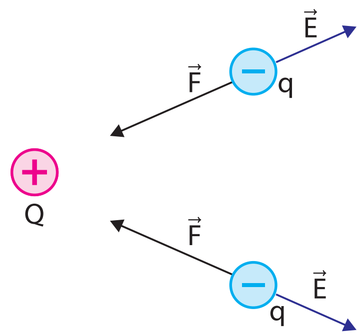


**Fig. 25.** Si "q" es negativa $\vec{E}$ y $\vec{F}$ tienen sentidos opuestos.

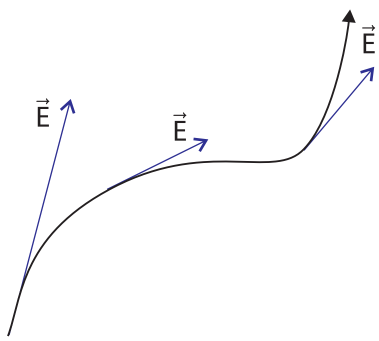


**Fig. 26.** El vector campo Eléctrico $\vec{E}$ es tangente a la línea de campo en cualquier punto.

**Consideraciones importantes:**

- El campo eléctrico no depende de la carga de prueba "q" , sino de las cargas "Q" que lo producen.

- Si la carga de prueba "q" fuera negativa, el sentido del campo eléctrico y de la fuerza eléctrica serían opuestos (fig. 25) .

- La unidad de campo eléctrico en el Sistema Internacional es $\frac{N}{C}$ .

**Líneas de campo eléctrico**

Las líneas de campo eléctrico, también llamadas líneas de fuerza, son curvas imaginarias que se utilizan para visualizar algunas características del campo eléctrico en una zona del espacio.

Estas líneas se dibujan de forma que el vector campo eléctrico sea tangente a dicha línea en cualquiera de sus puntos. (fig. 26)

A partir de las líneas de campo podemos conocer la dirección y sentido del campo eléctrico en cualquier punto, no así su módulo. Pero sí sabemos que en las zonas donde las líneas están más juntas el campo eléctrico es más intenso.

En las siguientes figuras vemos trazadas las líneas de campo para diferentes distribuciones de carga.

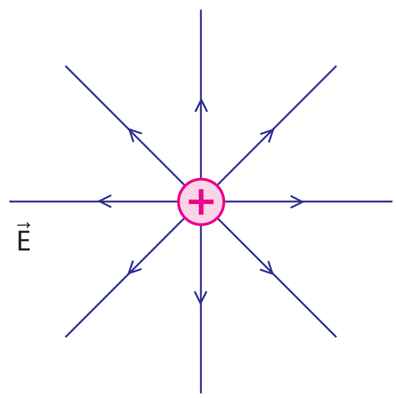


**Fig. 27a.** Líneas de campo correspondientes a una carga puntual positiva.

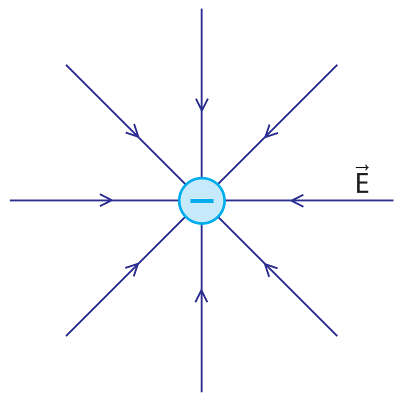


**Fig. 27b.** Líneas de campo correspondientes a una carga puntual negativa.

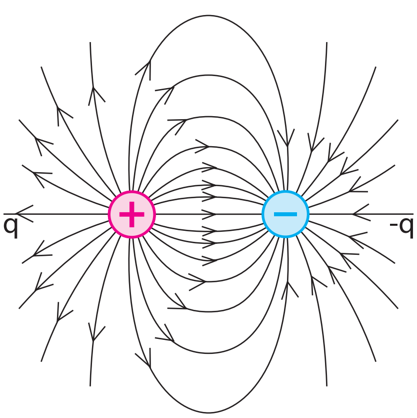


**Fig. 27c.** Las líneas "salen" de la carga positiva y "llegan" a la negativa.

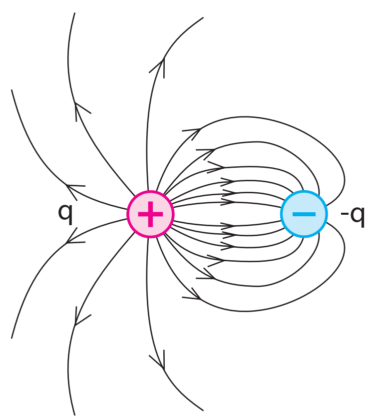


**Fig. 27d.** En las zonas donde el campo es mayor, las líneas están más juntas.

### Campo eléctrico creado por una carga puntual

En las figuras 27 a y b hemos visto que se representan las líneas de campo eléctrico alrededor de una carga puntual. En ambos casos las direcciones de las líneas son radiales con centro en la carga, siendo el sentido "desde la carga" en la carga positiva y "hacia la carga" en la negativa.

El módulo del campo eléctrico producido por una carga puntual "Q" a una distancia "d" de ella es: $\left|\vec{E}\right| = \dfrac{K \times |Q|}{d^2}$

Puedes probar deducir esta ecuación a partir de la Ley de Coulomb

$\left|\vec{F}\right| = \dfrac{K \times |Q_1| \times |q_2|}{d^2}$ y la definición de campo eléctrico $\left|\vec{E}\right| = \dfrac{\left|\vec{F}\right|}{q}$.

**Aclaración:** a partir de ahora utilizaremos "q" para referirnos a todas las cargas eléctricas.

## Ejemplo 5

a) Determina el campo eléctrico creado por la carga $q = -3{,}0 \times 10^{-8}$ C en el punto "P" (fig. 28)

El módulo del campo eléctrico se calcula:

$$\left|\vec{E}\right| = \frac{K \times |q|}{d^2} = \frac{9{,}0 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \times 3{,}0 \times 10^{-8}\,C}{0{,}10^2\,m^2} \Rightarrow \boxed{\left|\vec{E}\right| = 2{,}7 \times 10^4 \frac{N}{C}}$$

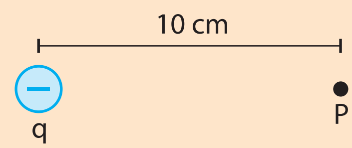

**Fig. 28.** Ejemplo 5.

Como el campo eléctrico es una magnitud vectorial para determinarlo completamente además de su módulo debemos indicar su dirección y sentido. Al ser "q" una carga negativa el vector campo eléctrico "apunta" hacia la carga (fig. 29).

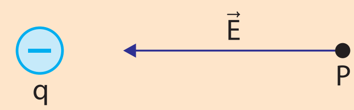

**Fig. 29.**

b) Determina la fuerza eléctrica que se ejercerá sobre un electrón ($q = -1{,}6 \times 10^{-19}$C) al colocarlo en el punto "P".

En el punto "P" hay campo eléctrico creado por la carga "q", por lo tanto al colocar un electrón en dicho punto, sobre él actuará un fuerza eléctrica.

La relación entre estas magnitudes es $\left|\vec{E}\right| = \dfrac{\left|\vec{F}\right|}{q}$ y despejando obtenemos:

$$\left|\vec{F}\right| = q \times \left|\vec{E}\right| \Rightarrow \left|\vec{F}\right| = 1{,}6 \times 10^{-19}\,C \times 2{,}7 \times 10^4 \frac{N}{C} \Rightarrow \boxed{\left|\vec{F}\right| = 4{,}3 \times 10^{-15}\,N}$$

Como la carga del electrón es negativa, la fuerza eléctrica tiene sentido opuesto al del campo eléctrico y la vemos representada en la figura 30.

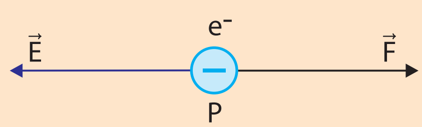

**Fig. 30.**

## Ejemplo 6

En la distribución de cargas de la figura 31, la cargas eléctricas tienen los siguientes valores $q_1 = q_2 = -4{,}0nC$ y la distancia $d = 12cm$.

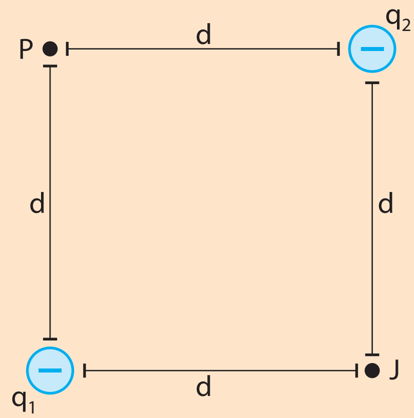


**Fig. 31.** Ejemplo 6

a) Determina el campo eléctrico resultante en el punto "P".

Como en punto "P" se superponen los campos eléctricos creados por $q_1$ y $q_2$, comenzaremos por calcular y representar ambos campos.

$$\left|\vec{E}_1\right| = \frac{K \times |q_1|}{d^2} = \frac{9{,}0\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\times 4{,}0\times10^{-9}C}{0{,}12^2 m^2} \Rightarrow \boxed{\left|\vec{E}_1\right| = 2{,}5\times10^3 \frac{N}{C}}$$

$$\left|\vec{E}_2\right| = \frac{K \times |q_2|}{d^2} = \frac{9{,}0\times10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\times 4{,}0\times10^{-9}C}{0{,}12^2 m^2} \Rightarrow \boxed{\left|\vec{E}_2\right| = 2{,}5\times10^3 \frac{N}{C}}$$

Los módulos de los campos eléctricos son iguales, debido a que las cargas y las distancias desde ellas al punto "P" también son iguales.

Como las cargas son negativas, el sentido de ambos vectores campo eléctrico es hacia las cargas y para determinar el campo resultante utilizamos la regla del paralelogramo (fig. 32).

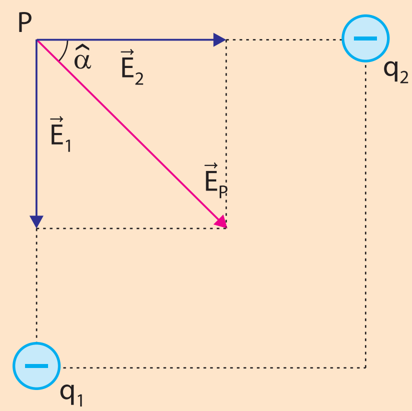


**Fig. 32.** Escala 1cm – $1{,}0\text{x}10^3 \frac{N}{C}$

El vector campo eléctrico resultante tiene una longitud de 3,5cm que según la escala elegida corresponde a $\boxed{\left|\vec{E}_P\right| = 3{,}5\times10^3 \frac{N}{C}}$

También es posible calcular el campo eléctrico resultante en el punto "P" utilizando el Teorema de Pitágoras, obteniéndose igual resultado.

Recuerda, que para definir completamente el vector $\vec{E}_P$, debemos especificar su dirección. Observa que el triángulo formado es un rectángulo isósceles, por lo que $\beta = \alpha = 45°$

b) Determina el valor que debe tener una carga $q_3$ ubicada en "J" para que el campo eléctrico en "P" sea nulo, sabiendo que la distancia "JP" es 0,17m.

Al colocar una carga en el punto "J" creará un campo eléctrico $\vec{E}_3$ en el punto "P" y para que el campo resultante sea nulo se debe cumplir que la suma de los tres vectores sea cero.

$$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 = \vec{0} \Rightarrow \vec{E}_3 = -(\vec{E}_1 + \vec{E}_2)$$

Esto significa que $\vec{E}_3$ debe ser un vector opuesto al resultante de $\vec{E}_1$ y $\vec{E}_2$ por lo que tendrá igual módulo y dirección que la suma vecorial.

$\vec{E}_1 + \vec{E}_2 (3{,}5\text{x}10^3 \frac{N}{C})$ y sentido opuesto (fig. 33).

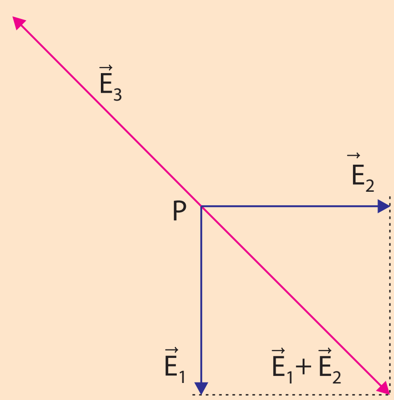


**Fig. 33.** $\vec{E}_3$ es opuesto a $\vec{E}_1 + \vec{E}_2$

Despejando $q_3$ de $\left|\vec{E}_3\right| = \frac{K\times|q_3|}{d_3^2}$ obtenemos $|q_3| = \frac{\left|\vec{E}_3\right|\times d_3^2}{K}$

$$|q_3| = \frac{\left|\vec{E}_3\right|\times d_3^2}{K} = \frac{3{,}5\times10^3 \frac{N}{C}\times 0{,}17^2 m^2}{9{,}0\times10^9 \frac{Nm^2}{C}} \Rightarrow \boxed{|q_3| = 1{,}1\times10^{-8}C}$$

Finalmente si observamos el sentido del campo eléctrico $\vec{E}_3$ en la figura 33, concluimos que el signo de $q_3$ es positivo.

# PREGUNTAS

1) ¿Qué tipos de cargas eléctricas existen en la naturaleza?

2) ¿Qué tipo de carga eléctrica tiene un protón?

3) ¿Qué tipo de carga eléctrica tiene un electrón?

4) Indica para cada par de partículas cargadas de la figura 34 si se atraen o se repelen.

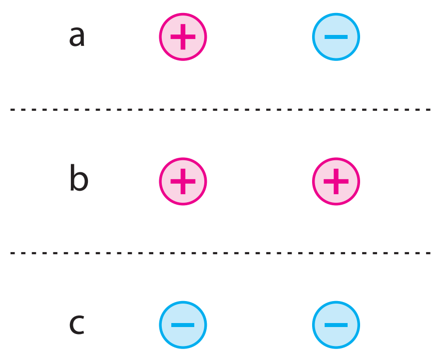


**Fig. 34.** Pregunta 4

5) Clasifica las siguientes afirmaciones en verdadero o falso:
   a) Un cuerpo neutro al perder electrones queda cargado negativamente
   b) Un cuerpo neutro al ganar electrones queda cargado positivamente
   c) Al frotar dos cuerpos pueden intercambiar protones.
   d) Si frotamos dos cuerpos de igual material no se cargan eléctricamente.

6) ¿Cuál es la unidad de la carga eléctrica en el Sistema Internacional de Unidades?

7) ¿Cuál es la carga eléctrica de un electrón expresada en Coulomb?

8) ¿Cuál es la carga eléctrica de un protón expresada en Coulomb?

9) ¿Qué significa que la carga eléctrica es una magnitud cuantizada?

10) ¿Por qué un cuerpo no puede tener una carga neta de $4{,}0 \times 10^{-19}$C?

11) ¿Qué significa que la carga eléctrica se conserva? Describe un ejemplo en el que se manifieste dicha propiedad.

12) Una varilla de vidrio inicialmente neutra, se carga positivamente luego de frotarla con un trozo de tela:
   a) ¿Se creó carga eléctrica en el proceso?
   b) ¿El trozo de lana también se carga? En caso afirmativo indica el signo de la carga y compara su valor respecto a la carga de la varilla.

13) a) Explica por qué si acercamos una regla cargada positivamente a una pequeña esfera descargada (fig. 35), esta es atraída por la regla.
   b) ¿Cambia tu respuesta si la regla tuviera carga negativa?
   c) Explica que sucedería si se tocara la bolita con la regla.

14) Enuncia la Ley de Coulomb, escribe su ecuación e indica las unidades del Sistema Internacional de todas las magnitudes involucradas.

15) Demuestra que las unidades de la constate "K" en el Sistema Internacional de Unidades es $\frac{Nm^2}{C^2}$

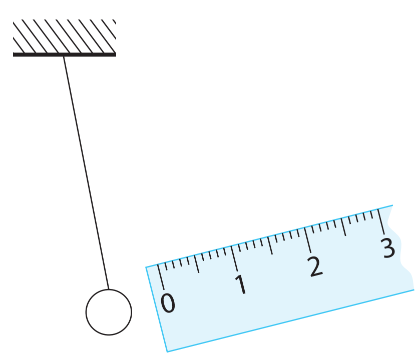


**Fig. 35.** Pregunta 13

16) Dos cargas $q_1$ y $q_2$ interactúan ejerciéndose fuerzas de módulo 0,40N cuando están separadas una distancia "d". ¿Cuál será el módulo de la fuerza eléctrica en los siguientes casos?

a) Se aumenta el valor de $q_1$ al doble

b) Se aumentan los valores de $q_1$ y $q_2$ al triple

c) Se colocan a una distancia "2d" sin modificar las cargas

d) Se aumentan ambas cargas al doble y las cargas se colocan a la mitad de distancia.

17) Explica qué es un campo escalar y qué es un campo vectorial dando un ejemplo de cada uno.

18) ¿En qué unidad se expresa el campo eléctrico en el Sistema Internacional de Unidades?

19) Representa las líneas de campo eléctrico correspondientes a las distribuciones de carga de la figura 36 a, b y c.


**Fig. 36a.** Pregunta 19.

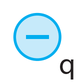


**Fig. 36b.** Pregunta 19.


**Fig. 36c.** Pregunta 19.

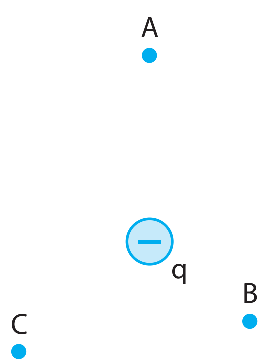


**Fig. 37.** Pregunta 21.

20) ¿Por qué las líneas de campo eléctrico nunca se intersecan?

21) a) En la figura 37 representa (sin escala) el vector campo eléctrico creado por "q" en los puntos A, B y C.

b) ¿Cuál es la ecuación que permite calcular el módulo del campo eléctrico creado por una carga puntual a cierta distancia de ella?

c) Ordena de menor a mayor los módulos del campo eléctrico existente en los puntos A, B y C.

## PROBLEMAS

1) A una pequeña esfera eléctricamente neutra se le quitan 2,0 x $10^{12}$ electrones que son transferidos a una segunda esfera inicialmente descargada.

   a) ¿Cuál es la carga (valor y signo) de cada esfera luego de transferir los electrones?

   b) Si la distancia entre las esferas es 20cm. ¿Cuál es el módulo de la fuerza eléctrica que actúa sobre cada esfera?

2) Determina y representa en un esquema las fuerzas eléctricas que se ejercen dos cargas $q_1$ = 2,0 x $10^{-8}$C y $q_2$ = -3,0 x $10^{-8}$C si la distancia entre ellas es 6,0cm.

3) Determina y representa en un esquema las fuerzas eléctricas que se ejercen dos cargas $q_1$ = 3,0 μC y $q_2$ = 4,0 μC si la distancia entre ellas es 400mm.

4) El módulo de la fuerza de interacción eléctrica entre dos cargas es 0,45N. Si una de las cargas es $q_1$ = -4,0μC y la distancia entre ellas es 40cm ¿cuál es el valor y signo de la carga $q_2$? (fig. 38)

5) ¿A qué distancia se deben colocar dos cargas cuyos valores son $q_1$=6,0μC y $q_2$ = 4,0μC para que se ejerzan fuerzas eléctricas cuyo módulo sea 5,4N?

6) Dos cargas iguales al estar separadas 10cm se realizan fuerzas eléctricas de modulo 8,1x $10^{-6}$ N. ¿Cuál es el valor de cada carga?

7) Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre la carga $q_2$ en la distribución de cargas de la figura 39. Datos: d = 10cm, $q_1$ = 2,0 μC, $q_2$ = 3,0 μC, $q_3$ = - 4,0 μC.

8) Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre las cargas $q_1$ y $q_3$ utilizando los mismos datos del problema 7.

9) Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre la carga $q_2$ en la distribución de cargas de la figura 40. Datos: d = 10cm, $q_1$ = 2,0 μC, $q_2$ = 3,0 μC, $q_3$ = - 4,0 μC.

10) Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre las cargas $q_1$ y $q_3$ utilizando los mismos datos del problema 9.

11) a) Considerando la distribución de cargas de la figura 41, determina el valor de $q_2$ para que la fuerza neta sobre "$q_3$" sea nula.

    b) En estas condiciones ¿$q_1$ estará en equilibrio?

    Datos: $d_1$ = 10cm, $d_2$ = 20cm, $q_1$ = -3,0 μC, $q_3$ = 1,0 μC.

12) Determina la fuerza eléctrica neta que actúa sobre la carga $q_4$ en la distribución de cargas de la figura 42. Datos: d = 10cm, $q_1$ =-2,0 μC, $q_2$ = 2,0 μC, $q_3$ = 4,0 μC, $q_4$ = 1,0 μC

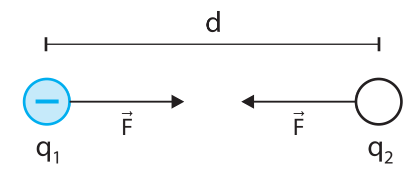

**Fig. 38.** Problema 4.

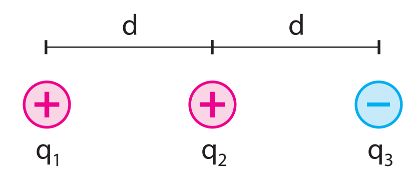

**Fig. 39.** Problema 7 y 8.

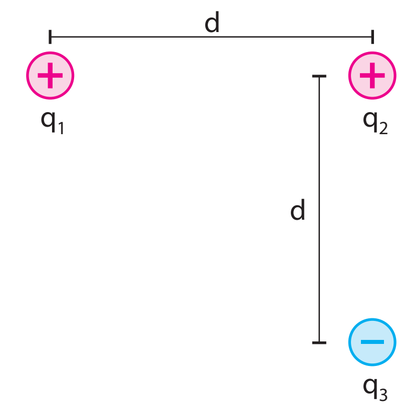

**Fig. 40.** Problema 9 y 10.

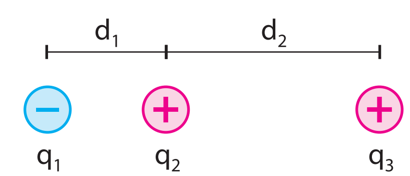

**Fig. 41.** Problema 11.

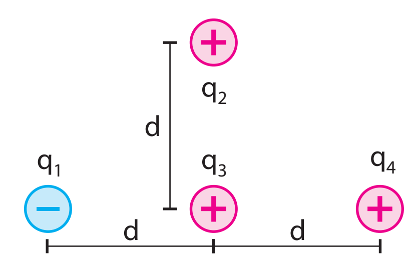

**Fig. 42.** Problema 12.

13) La partícula de carga $q_1 = 2{,}0\ \mu C$ está sostenida de un hilo aislante (fig. 43) y la partícula $q_2$ se encuentra suspendida en equilibrio 3,0cm por debajo de $q_1$. Si las masas de las partículas son $m_1 = 4{,}0 \times 10^{-6}Kg$ y $m_2 = 2{,}0 \times 10^{-6}Kg$, determina cuántos electrones en exceso tiene la partícula 2 y la tensión del hilo.

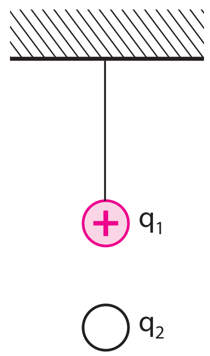


**Fig. 43.** Problema 13.

14) Calcula y representa el campo eléctrico creado por $q = 3{,}0 \times 10^{-12}C$ en los puntos A, B y C (fig. 44). $d_C = d_B = 3{,}0cm$, $d_A = 2{,}0cm$

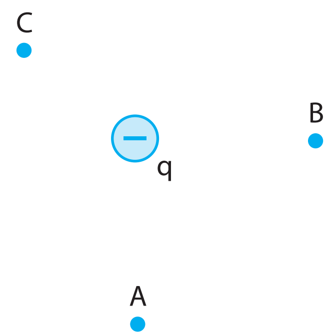


**Fig. 44.** Problema 14.

15) a) ¿Cuál es el valor una carga que genera a 10cm de ella un campo eléctrico de módulo $8{,}0 \times 10^{-2}\ \frac{N}{C}$ ?

b) Con los datos que dispone. ¿Es posible conocer el signo de la carga?

16) ¿A qué distancia de una carga $q = 5{,}0\mu C$ el campo eléctrico generado por ella es $5{,}0 \times 10^{3}\ \frac{N}{C}$ ?

17) En la distribución de cargas de la figura 45 cuyos datos son:

$d = 10cm$, $q_1 = 3{,}0\ nC$, $q_2 = -3{,}0\ nC$.

a) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "A"

b) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "B"

c) ¿Existirá algún punto dónde el campo eléctrico resultante sea nulo?


**Fig. 45.**

18) Teniendo en cuenta los datos de la figura 46, determina el valor de $q_3$ para que el campo eléctrico resultante en el punto "A" sea nulo. Datos: $d = 10cm$, $q_1 = 4{,}0\ nC$, $q_2 = 8{,}0\ nC$.

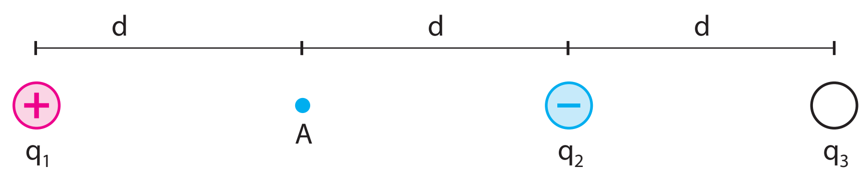


**Fig. 46.**

19) En la distribución de cargas de la figura 47 cuyos datos son:

$d = 10cm$, $q_1 = 3{,}0\ nC$, $q_2 = -3{,}0\ nC$.

a) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "A"

b) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "B"

c) Calcula y representa el campo eléctrico resultante en el punto "C"

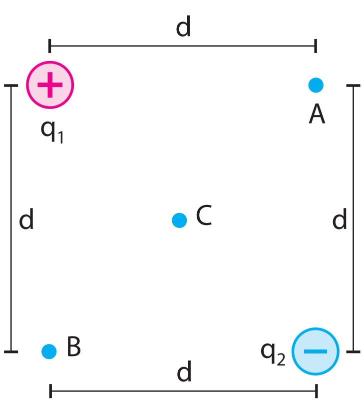


**Fig. 47.** El punto "C" es el centro del cuadrado.