

Conductores, aisladores y semiconductores

Cuando un cuerpo neutro es electrizado, sus cargas eléctricas, bajo la acción de las fuerzas correspondientes, se redistribuyen hasta alcanzar una situación de equilibrio. Algunos cuerpos, sin embargo, ponen muchas dificultades a este movimiento de las cargas eléctricas por su interior y solo permanece cargado el lugar en donde se depositó la carga neta. Otros, por el contrario, facilitan tal redistribución de modo que la electricidad afecta finalmente a todo el cuerpo. Los primeros se denominan *aisladores* y los segundos *conductores*.

Esta diferencia de comportamiento de los materiales respecto del desplazamiento de las cargas en su interior depende de la cantidad de electrones de sus átomos. Así, los átomos de los materiales conductores poseen electrones externos muy débilmente ligados al núcleo en un estado de semilibertad que les otorga una gran movilidad. Tal es el caso de los metales. En los materiales aislantes, sin embargo, los núcleos atómicos retienen con mayor fuerza a todos sus electrones, lo que hace que su movilidad sea escasa.

Entre los buenos conductores y los aisladores existe una gran variedad de situaciones intermedias. Es de destacar entre ellas la de los *materiales semiconductores* por su importancia en la fabricación de dispositivos electrónicos, que son la base de la actual revolución tecnológica. En condiciones ordinarias se comportan como malos conductores (es decir como aisladores), pero desde un punto de vista físico su interés radica en que se pueden convertir en conductores con cierta facilidad, ya sea mediante pequeños cambios en su composición, ya sea sometiéndolos a condiciones especiales, como elevada temperatura o intensa iluminación.

La ley de Coulomb

Aun cuando los fenómenos electrostáticos fundamentales eran ya conocidos en la época de Charles Coulomb (1736-1806), no se conocía todavía la proporción en la que variaban esas fuerzas de atracción y repulsión. Fue este físico francés quien, tras poner a punto un método de medida de fuerzas sensible a pequeñas magnitudes, lo aplicó al estudio de las interacciones entre pequeñas esferas cargadas.

Toda la electrostática surge del enunciado cuantitativo de la ley de Coulomb, referente a las fuerzas que actúan entre cuerpos cargados en reposo unos respecto a otros. Coulomb demostró experimentalmente que la fuerza entre dos cuerpos pequeños y cargados situados en el aire y separados por una distancia grande comparada con sus dimensiones cumple con las características enumeradas a continuación.

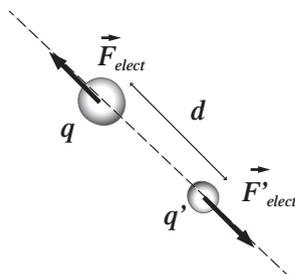
1. Está dirigida a lo largo de la línea que une las cargas,
2. Varía directamente con la magnitud de cada una de sus cargas

$F \propto q \cdot q'$ denotaremos con q y q' los valores de las cargas eléctricas
(\propto significa directamente proporcional)

3. Varía en razón inversa con el cuadrado de la distancia entre ellas,

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

4. Es atractiva si los cuerpos tienen cargas opuestas y repulsiva si tienen el mismo tipo de carga.



La recta de acción de las fuerzas eléctricas de interacción entre dos cuerpos pequeños cargados es la de la línea que une las cargas.



La fuerza eléctrica es atractiva para cargas de signo opuesto, y repulsiva para cargas de igual signo.

La expresión matemática de la ley de Coulomb que permite calcular el módulo de la fuerza eléctrica es:

$$F_{elect} = k \cdot \frac{q \cdot q'}{d^2}$$

Donde q y q' corresponden a los valores de las cargas que interactúan, d representa la distancia que las separa supuestas concentradas cada una de ellas en un punto y k es una constante de proporcionalidad que depende del medio en que se hallen dichas cargas.

En el Sistema Internacional, la unidad de carga eléctrica es el *coulomb* (C) en homenaje a ese físico francés. El valor experimental de la constante k , en el vacío o en el aire, es de $k_0 = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, aproximadamente.

Como ejercicio, calculemos cuántos electrones tiene que haber para reunir una carga eléctrica de -1 C :

Cada electrón tiene una carga de $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ y, por eso, para juntar una carga de -1 C hay reunir $1/1,6 \times 10^{-19} = 6,25 \times 10^{18}$ electrones.

Por otra parte, se ha comprobado experimentalmente que si las cargas q y q' se sitúan en un medio distinto del aire, la magnitud de las fuerzas de interacción se ve afectada. Así, por ejemplo, en el agua la intensidad de la fuerza electrostática entre las mismas cargas, situadas a igual distancia, es unas 80 veces menor, con respecto a la que experimentarían en el vacío o en el aire. La ley de Coulomb se puede escribir considerando la influencia del medio:

$$F_{elect} = \frac{k_0}{\epsilon_r} \cdot \frac{q \cdot q'}{d^2}$$

Donde ϵ_r se denomina *permitividad eléctrica relativa* (o *constante dieléctrica relativa*) del medio en el que se encuentran las cargas. Para el vacío ϵ_r vale 1; para el aire a la presión y temperatura normales vale prácticamente 1; para el aceite y muchos plásticos varía entre 3 y 5; para el agua y las membranas lipídicas es aproximadamente 80, y hay sustancias como el titanato de bario cuya constante dieléctrica relativa vale más de 100.

La ley de Coulomb se asemeja a la ley de la variación inversa del cuadrado de la distancia enunciada por Newton para la gravitación, $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$, la cual tenía ya más de cien años en el momento en que se realizaron los experimentos de Coulomb. Ambas son leyes del inverso de los cuadrados; la carga q desempeña el papel de la masa m en la ley de la gravitación de Newton. Una diferencia entre las dos leyes es que las fuerzas gravitatorias, hasta donde sabemos, son siempre de atracción, mientras que las fuerzas electrostáticas pueden ser de repulsión o atracción, dependiendo de que las dos cargas tengan el mismo signo o signos opuestos. Otra diferencia importante es que la intensidad de la fuerza electrostática depende del medio en que están las cargas, mientras que la intensidad de la fuerza gravitatoria es independiente del medio.

Ejemplo

Un átomo de hidrógeno está formado por un protón y un electrón que se mueve en torno a él. Sabiendo que sus cargas, iguales y de signo contrario, equivalen a $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ y que la intensidad de la fuerza atractiva que experimentan es de $8,2 \times 10^{-8} \text{ N}$, determinar el valor de la distancia media que los separa.

Si despejamos la distancia de la ley de Coulomb, queda:

$$d = \sqrt{\frac{k \cdot q \cdot q'}{F}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2} \cdot (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}}} = 5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$$

De acuerdo con la ley de Coulomb, dos cargas eléctricas de 1 C cada una separadas por una distancia de un metro, interactúan en el aire con una fuerza de $9 \times 10^9 \text{ N}$.

Esto significa que el coulomb es una cantidad de carga muy grande para un cuerpo puntual o de pequeña superficie; por eso son muy usados los submúltiplos del coulomb:

milicoulomb ($1 \text{ mC} = 10^{-3} \text{ C}$),
microcoulomb ($1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$),
nanocoulomb ($1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$)
picocoulomb ($1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ C}$).

La variación con el inverso del cuadrado de la distancia indica que pequeños aumentos en la distancia entre las cargas reducen considerablemente la intensidad de la fuerza o, en otras palabras, que las fuerzas electrostáticas son muy sensibles a los cambios en la distancia.

Campo Eléctrico

La idea de campo

Las cargas eléctricas no precisan de ningún medio material para ejercer su influencia sobre otras, de ahí que las fuerzas eléctricas se puedan considerar como *fuerzas de acción a distancia*. Otra manera de pensar la fuerza entre cargas es que la carga genera un *campo* en el espacio que la rodea y es ese campo el que ejerce fuerzas sobre otras cargas.

La noción de campo no es exclusiva de la electricidad. Por ejemplo, se puede pensar que la Tierra genera a su alrededor un *campo gravitatorio* que ejerce la fuerza de gravedad sobre los cuerpos próximos. De un modo análogo se introduce la noción de *campo magnético* y también la de *campo eléctrico*.

Cada cuerpo cargado modifica las propiedades del espacio que lo rodea con su sola presencia. Supongamos que solamente está presente la carga Q . Se dice que la carga Q crea un campo eléctrico en en todos los puntos del espacio.

Supongamos (fig.1) que ponemos una carga exploratoria q de, por ejemplo $1 \mu\text{C}$, en el punto P, y que sobre ella actúa una fuerza de, digamos, $5 \mu\text{N}$. Podemos imaginar que esa fuerza la ejerce el campo eléctrico creado por la carga Q .

Si ahora (fig.2) cambiamos la carga q por otra de valor doble que la anterior ($2 \mu\text{C}$), la ley de Coulomb nos asegura que también se duplicará la fuerza sobre esa carga ($10 \mu\text{N}$). A pesar de que cambió la carga y también cambió la fuerza, no cambió la relación entre ellas:

$$\frac{F}{q} = \frac{5 \mu\text{N}}{1 \mu\text{C}} = \frac{10 \mu\text{N}}{2 \mu\text{C}} = 5 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Ese valor, 5 N/C en este ejemplo, no depende del valor de la carga que coloquemos en el punto P y, por lo tanto, es una propiedad de ese punto. Lo llamaremos *intensidad de campo eléctrico (en el punto P)* y lo designaremos con la letra E (de eléctrico). Así, en este caso diremos que en el punto P el campo eléctrico tiene una intensidad de 5 N/C ; es decir, ejercerá una fuerza de 5 N por cada coulomb de carga que haya en ese punto.

El campo eléctrico es un vector, es decir que además de su intensidad está caracterizado por una dirección y un sentido. Por eso se puede representar mediante una flecha. El vector campo eléctrico en un punto tiene dirección y sentido coincidentes con los del vector fuerza que tendría aplicada una carga positiva ubicada en ese lugar.

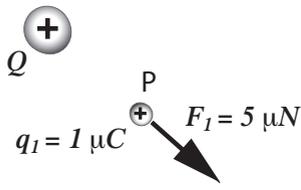


Fig. 1

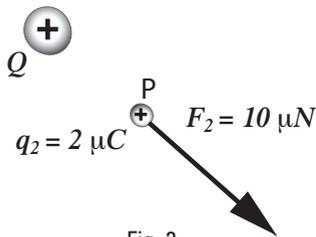
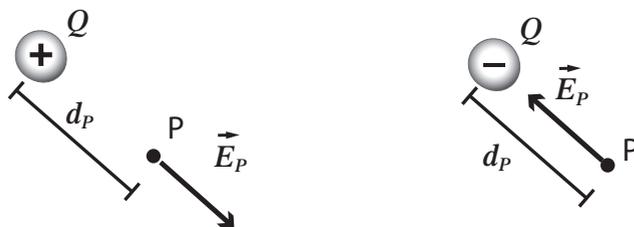


Fig. 2

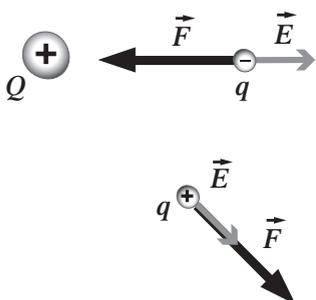


En la figura anterior, hemos dibujado el campo en el punto P producido por una carga Q positiva y negativa respectivamente.

La fuerza sobre la carga q , colocada en el punto P, se puede expresar como la multiplicación entre el valor de esa carga y el campo eléctrico en ese punto:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

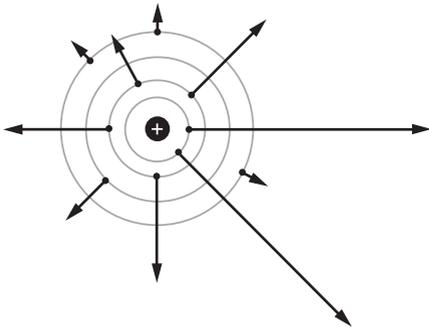
La expresión matemática anterior indica que la fuerza y el campo eléctrico tienen igual dirección. El sentido es el mismo si la carga q es positiva y es contrario si la carga es negativa.



Líneas de campo o de fuerza

De acuerdo con la ley de Coulomb, y la definición de campo eléctrico, el módulo del campo eléctrico generado por una carga puntual Q es directamente proporcional al valor de esa carga e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia:

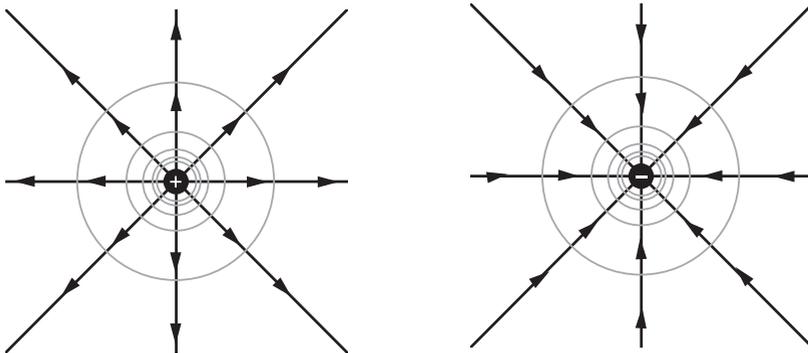
$$|\vec{E}| = \frac{|\vec{F}|}{|q|} = \frac{k \cdot |Q| \cdot |q|}{d^2} = \frac{k \cdot |Q|}{d^2}$$



Vector campo eléctrico en diversos puntos en la cercanías de una carga puntual positiva. Recordemos que estamos representando en dos dimensiones lo que es en tres dimensiones: las líneas grises circulares representan superficies esféricas concéntricas con la carga puntual. El vector campo eléctrico en todos los puntos ubicados en la misma superficie esférica (que son vectores perpendiculares a ella) tienen el mismo valor.

Dibujar el vector campo eléctrico en todos los puntos del espacio es obviamente imposible y aunque eligiéramos graficarlo solo en varios puntos, el diagrama sería engorroso pues se superpondrían las flechas. Michael Faraday ideó un diagrama, conocido como *diagrama de líneas de campo (o de fuerza)*, que resulta de mucha utilidad para representar un campo eléctrico. Las líneas de campo se orientan de manera que, en cada punto, la tangente a la línea tiene la dirección del campo eléctrico en dicho punto y apunta en el mismo sentido.

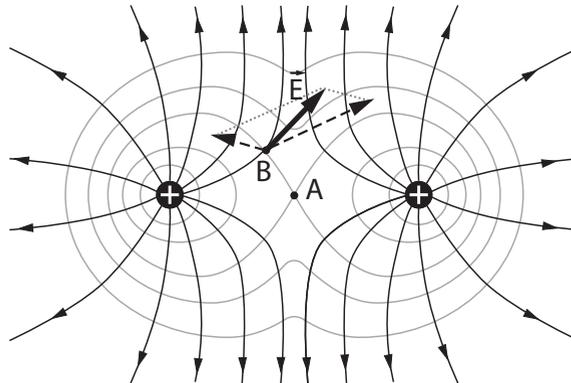
Una carga puntual positiva da lugar a un diagrama de líneas de campo radiales: las fuerzas eléctricas actúan en la dirección de la recta que une a las cargas que interactúan, y dirigidas hacia afuera porque las cargas positivas próximas recibirían fuerzas repulsivas. Para una carga puntual negativa el diagrama es semejante, pero las líneas radiales están dirigidas hacia la carga central. Recordemos que en cada uno de los dos casos el sentido de la fuerza electrostática será el de las líneas de campo si la carga exploratoria es positiva, mientras que será opuesto a este si la carga exploratoria es negativa.



Líneas de campo de una carga puntual. Se observa que en las cercanías de la carga, donde el campo eléctrico es más intenso, las líneas de campo están más apretadas, mientras que en zonas más alejadas de la carga, donde el campo eléctrico es más débil, las líneas de campo están más espaciadas: la densidad de líneas de campo da idea de la intensidad del campo en cada lugar del espacio. (Entre dos líneas de campo siempre hay otra. No es que las fuerzas se limiten a ciertas líneas en particular. Ya que es imposible dibujar infinitas líneas, se representan solo algunas).

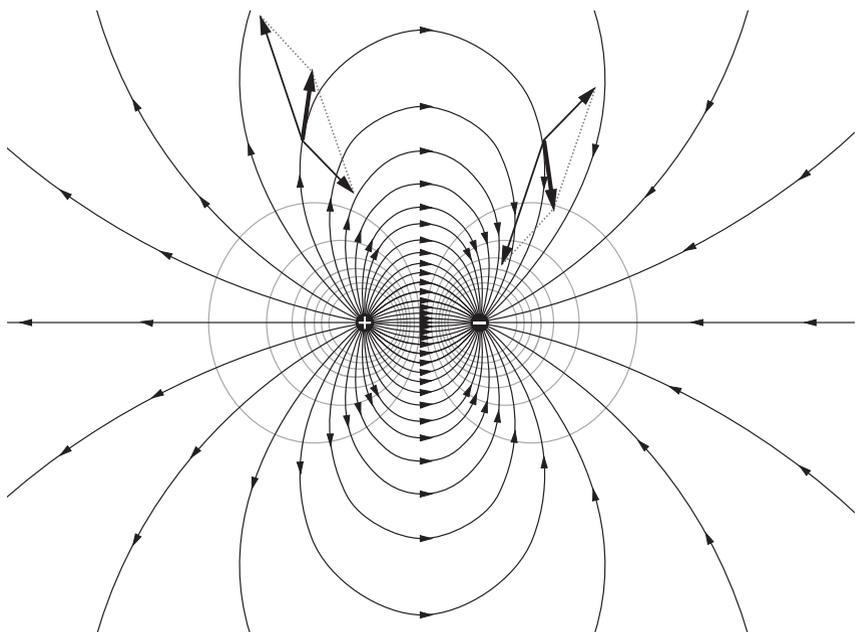
Cuando existen varias cargas, el campo eléctrico en cada punto del espacio resulta ser la suma vectorial de los campos eléctricos producidos por cada carga.

En la figura siguiente se muestra las líneas de campo en la proximidad de dos cargas positivas idénticas.



Líneas de campo producida por dos cargas positivas iguales. En el punto B se muestra cómo el vector campo eléctrico E , tangente a la línea de campo, es la suma vectorial de los campos eléctricos que crea cada una de las cargas. En el punto medio del segmento que une ambas cargas (punto A) el campo es nulo, pues los campos que crean las cargas son de igual valor y sentidos opuestos. Esta configuración de líneas de campo, vista de lejos, se asemeja a la de una única carga puntual positiva, de valor $2q$.

En la figura siguiente se muestran las líneas de campo eléctrico en la proximidad de dos cargas de igual magnitud y de diferente signo que, en conjunto, se denomina *dipolo* eléctrico. Aunque la carga neta de un dipolo eléctrico es cero, el hecho de que las cargas de igual valor y signo contrario estén ligeramente desplazadas produce un campo eléctrico. En algunas sustancias como el agua, los centros de las cargas positivas y negativas de las moléculas están desplazados, y por eso funcionan como dipolos. En ese caso decimos que la sustancia está compuesta por *moléculas polares*, lo que tiene importantes consecuencias en sus propiedades fisicoquímicas.



Dipolo eléctrico. En la zona entre ambas cargas el campo es más intenso (mayor densidad de líneas de campo) pues los campos eléctricos creados por cada una de las cargas se refuerzan. Las líneas son cerradas, salen de la carga positiva y entran a la negativa. Visto desde lejos un dipolo tiene un campo nulo, es decir es un elemento neutro; es decir, es un cuerpo eléctricamente neutro.

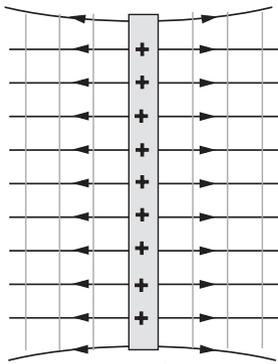


Fig. 1

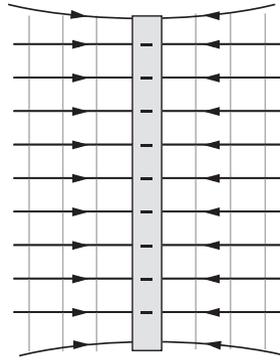


Fig. 2

Superficie plana uniformemente cargada. Una lámina plana infinita (o muy extensa, de modo que podamos ignorar los efectos de borde sin cometer errores importantes) con una cierta carga que se distribuye uniformemente, genera un campo eléctrico uniforme de ambos lados, es decir que tiene el mismo valor en todo el espacio. Las líneas del campo son perpendiculares al plano cargado: si la carga es positiva el sentido es saliente (Fig. 1) y si la carga es negativa el sentido es entrante al plano (Fig.2). Las líneas son paralelas y equidistantes, ya que el campo eléctrico tiene la misma dirección, sentido e intensidad en todos los puntos del espacio.

Es interesante estudiar el campo eléctrico entre dos superficies planas cargadas igual y uniformemente porque es la configuración que existe en un capacitor plano, como veremos más adelante, y explica el comportamiento eléctrico de la membrana celular.

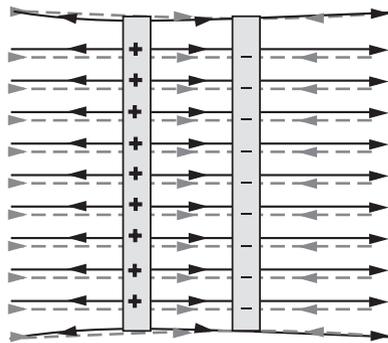


Fig. 1

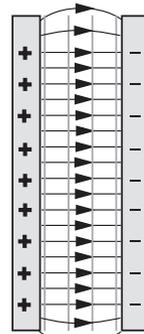


Fig. 2

Dos superficies planas paralelas uniformemente cargadas con igual carga pero de signo opuesto. En la figura 1 se dibujan superpuestas las líneas de campo de cada uno de los planos: los campos por fuera de los planos se anulan mientras que los del interior se refuerzan. El campo resultante se muestra en la figura 2: un campo eléctrico uniforme de doble intensidad que el creado por solo una de ellas y confinado en la región comprendida entre las placas.

Características generales de las líneas de campo

- La tangente a la línea en cualquier punto tiene la dirección del campo eléctrico en ese punto.
- Las líneas comienzan (nacen) en las cargas positivas y terminan (mueren) en la negativas.
- El número de líneas que abandonan una carga puntual positiva o entran en una carga negativa es proporcional al valor de la carga.
- Las líneas se dibujan simétricamente saliendo o entrando a la carga puntual.
- La separación entre las líneas en una región da idea del valor del campo allí, de manera que donde las líneas están más cerca entre sí, el campo es más intenso.
- Las líneas de campo nunca se cortan.

Las líneas de campo "nacen" en las cargas positivas y "mueren" en las negativas. Se dice por ello que las primeras son «manantiales o fuentes» y las segundas «sumideros» de líneas de campo

Fuerza y aceleración en el campo eléctrico

Una carga puntual en un campo eléctrico experimenta una fuerza proporcional al valor de la carga y a la intensidad del campo eléctrico en ese lugar:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

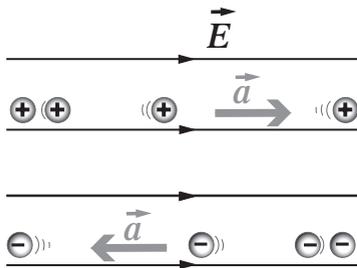
Aplicando la segunda ley de Newton:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{q}{m} \cdot \vec{E}$$

que indica que la aceleración de la carga tiene la misma dirección que el vector campo eléctrico.

- Si la carga es positiva, la aceleración de la carga tiene el mismo sentido del campo.
- Si la carga es negativa, la aceleración de la carga es contraria al campo.



Ejemplo

Determinar la intensidad de campo eléctrico en el vacío debido a una carga puntual $Q = 1,6 \times 10^{-6} \text{ C}$ en un punto situado a una distancia de $0,4 \text{ m}$ de la carga e indicar en dicho punto el vector que lo representa. ¿Cuál sería la fuerza eléctrica que se ejercería sobre otra carga de valor $3 \times 10^{-8} \text{ C}$ si se la situara en ese punto?

Solución:

El módulo de la intensidad de campo E debido a una carga puntual Q viene dada por la expresión:

$$|\vec{E}| = \frac{k \cdot |Q|}{d^2}$$

Donde Q es la carga que genera el campo y d la distancia entre esa carga y el punto considerado. Sustituyendo en la expresión anterior se tiene:

$$|\vec{E}| = \frac{9 \times 10^9 \text{ NmC}^{-2} \cdot 1,6 \times 10^{-6} \text{ C}}{(0,4 \text{ m})^2} = 9 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Por tratarse de un campo eléctrico debido a una carga positiva el vector correspondiente estará dirigido sobre la recta que une Q con el punto considerado y en el sentido que se aleja de la carga Q .

Conociendo el campo eléctrico, el cálculo de la fuerza se reduce a multiplicar E por el valor de la carga que se sitúa en el punto:

$$|\vec{F}| = |q| \cdot |\vec{E}|$$

$$|\vec{F}| = 3 \times 10^{-8} \text{ C} \cdot 9 \times 10^4 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

$$|\vec{F}| = 2,7 \times 10^{-3} \text{ N}$$

Como la carga q es positiva, el vector fuerza tendrá la misma dirección y sentido que el vector campo eléctrico.

Energía potencial electrostática

Una carga ubicada en un campo eléctrico uniforme recibe una fuerza eléctrica constante y se mueve, entonces, con una aceleración constante. El caso es semejante al de un cuerpo en caída libre en las proximidades de la Tierra.

Se puede demostrar que el trabajo de la fuerza eléctrica sobre una carga que va de un lugar a otro no depende del camino (es una fuerza conservativa). Igual que en el caso de la fuerza peso, se le puede asociar una energía potencial, de tal manera que *el trabajo de la fuerza eléctrica cuando la carga va de un punto a otro es igual a la variación de la energía potencial eléctrica cambiada de signo*:

$$L_{F_{e_{A \rightarrow B}}} = -\Delta E_{Pe}$$

Si el trabajo de la fuerza eléctrica es positivo, la variación de energía es negativa, es decir el sistema pierde energía potencial eléctrica. Si el trabajo de la fuerza eléctrica es negativo el sistema gana energía potencial eléctrica.

$\vec{P} = \vec{F}_{grav} = m \cdot \vec{g}$

Cuando un cuerpo cae desde el reposo bajo la sola acción de su peso, pierde energía potencial gravitatoria y aumenta su energía cinética. Para llevarlo hasta la altura inicial hace falta entregar energía mediante el trabajo positivo de una fuerza que contrarreste el trabajo negativo del peso que se opone al desplazamiento en contra del campo gravitatorio.

$\vec{F}_{elect} = q \cdot \vec{E}$

Cuando una carga positiva se mueve, desde el reposo, bajo la sola acción de la fuerza eléctrica, es decir en el sentido del campo, pierde energía potencial eléctrica y aumenta su energía cinética. Para llevarla hasta la posición inicial hay que entregar energía mediante el trabajo positivo de una fuerza que contrarreste el trabajo negativo de la fuerza eléctrica, que se opone al desplazamiento en contra del campo eléctrico.

Cuando una carga en reposo se suelta en un campo electrostático, bajo la única acción de la fuerza eléctrica, se mueve espontáneamente tendiendo a minimizar su energía potencial eléctrica. Para aumentar su energía potencial eléctrica se requiere un aporte energético. Un cuerpo que cae en el campo gravitatorio pierde más energía potencial gravitatoria cuanto mayor es su masa. Análogamente, una carga positiva que se mueve en el sentido del campo eléctrico pierde más energía potencial eléctrica cuanto mayor es el valor de su carga.

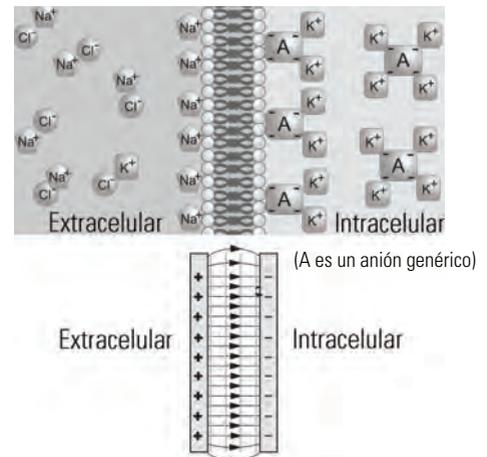
El módulo del trabajo de la fuerza eléctrica es directamente proporcional al valor de la carga (si la carga es doble pierde el doble de energía, si la carga es triple pierde el triple de energía, etc). Es útil saber cuánta es la energía puesta en juego por unidad de carga que se mueve en un campo eléctrico fijo. Esta cantidad de energía por unidad de carga depende exclusivamente de la configuración del campo (de la carga que lo crea y de la posición) y es independiente de cuál sea la carga que circunstancialmente se mueva. Desarrollamos a continuación el concepto de *diferencia de potencial*.

¿Hacia dónde empieza a moverse una carga negativa bajo la sola acción de la fuerza eléctrica? ¿Gana o pierde energía potencial eléctrica? ¿Gana o pierde energía cinética? ¿Qué se requiere para llevarlo hasta la posición inicial?

Campo eléctrico y energía: la diferencia de potencial

Muchas veces, la transferencia de cargas eléctricas de un lugar a otro requiere aporte de energía. En relación con ese aporte de energía resulta útil el concepto de *diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico*. Para entender esta idea recurriremos al ejemplo de la membrana celular.

El interior de las células suele ser eléctricamente neutro (hay tanta carga positiva como negativa). Sin embargo, una delgada capa de iones negativos se ubica en la cara interna de la membrana y atrae una capa de iones positivos que se ubica en el lado externo de la membrana. El resultado es que se establece un campo eléctrico dentro de la membrana, como puede verse en la figura adjunta.



Campo eléctrico en una membrana celular

Si se desea expulsar carga positiva fuera de la célula, por ejemplo iones K^+ , el campo eléctrico de la membrana se opondrá a dicho pasaje y, por lo tanto, para pasar habrá que gastar energía (hacer trabajo). El trabajo es tanto mayor cuanto más carga se quiera transportar. Dicho más precisamente, el trabajo es directamente proporcional a la carga transportada. Para muchas células ese trabajo es de unos 80 mJ (milijoules) por cada coulomb transportado del interior al exterior. Naturalmente, si se quiere transportar 2 C habrá que gastar 160 mJ (el doble). Entonces, se puede decir que el trabajo por unidad de carga es 80 mJ/C. A ese trabajo por unidad de carga positiva transportada a velocidad constante en el campo eléctrico de la membrana se lo denomina *diferencia de potencial eléctrico* (ΔV) entre ambas caras de la membrana. La diferencia de potencial se expresa en J/C, unidad denominada *volt* (V), en homenaje a quien ideó la primera pila eléctrica. Entonces, en nuestro caso:

$$\Delta V = 80 \frac{mJ}{C} = 80 mV$$

Notemos que solo consideramos la diferencia de potencial entre dos puntos y no el potencial en cada punto. Este último es arbitrario, como lo es el valor de energía potencial gravitatoria. Es cómodo tomar que el potencial es cero en el medio extracelular. Con esa convención, el potencial en la cara interna de la membrana resulta de $-80 mV$.

En nuestro ejemplo, mediante el trabajo positivo de la fuerza aplicada sobre los iones K^+ (opuesta a la fuerza eléctrica) se aumenta la energía potencial eléctrica del sistema. La diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos se puede interpretar también como la variación de energía potencial del sistema por unidad de carga positiva transportada entre dichos puntos.

$$\Delta V_{A \rightarrow B} = \frac{\Delta E_{pot A \rightarrow B}}{q} = \frac{-L_{F_{elect}} A \rightarrow B}{q}$$

Otro nombres con los que a veces se designa a la diferencia de potencial (eléctrica) es *tensión (eléctrica)* y *voltaje*.

Ejemplo

Calcular el gasto de energía para sacar de la célula un mol de iones K^+ .

$$L = q \cdot \Delta V = 6,02 \times 10^{23} \cdot 1,6 \times 10^{-19} C \cdot 80 \times 10^{-3} V = 7706 J$$

La diferencia de potencial puede pensarse como un peaje o impuesto que deben pagar las cargas para atravesar esa región. Ese impuesto no se paga en \$ sino en joules.

La limitación de esta analogía es que en el caso vial si vuelvo a pasar por el puesto de peaje en sentido contrario vuelvo a pagar por el derecho de tránsito, en cambio en el caso eléctrico el gasto de capital que hice a la ida lo recupero en el camino de vuelta...

Electronvolt

En muchos fenómenos eléctricos naturales se describe el comportamiento de cargas eléctricas del orden de magnitud de la carga eléctrica del electrón: $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Resulta práctico definir una unidad de energía, el *electronvoltio* (eV), que representa la energía cinética que adquiere un electrón (o un protón) cuando es acelerado por el campo eléctrico entre dos puntos entre los que existe una diferencia de potencial de 1 volt. Busquemos la equivalencia entre el electrovolt y el joule considerando que la ganancia de energía cinética de la carga tiene el mismo valor que su pérdida de energía potencial:

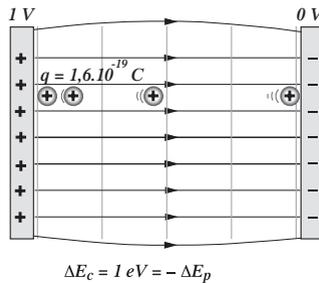
$$\Delta E_c = -\Delta E_p = -q \cdot \Delta V$$

para un protón:

$$1eV = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot (-1V)$$

$$1eV = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \frac{J}{C}$$

$$1eV = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$



Diferencia de potencial en un campo eléctrico uniforme

Cuando el campo eléctrico puede considerarse uniforme (es decir que no varía con la posición) se puede recurrir a una expresión sencilla para expresar la diferencia de potencial entre dos puntos.

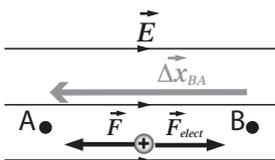
La diferencia de potencial entre dos puntos se puede pensar como el trabajo por unidad de carga que hay que hacer contra la fuerza eléctrica, para llevar cargas positivas con velocidad constante, desde el primer hasta el segundo punto. Analicemos primero su valor absoluto:

$$|\Delta V_{A \rightarrow B}| = \frac{|L_{F \ A \rightarrow B}|}{|q|} = \frac{|F| \cdot d}{|q|} = |E| \cdot d$$

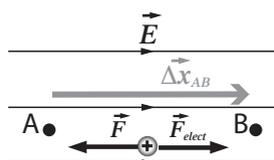
De manera que el valor absoluto de la diferencia de potencial entre dos puntos se expresa como el producto del módulo del campo eléctrico por la distancia d que separa a los puntos en la dirección del campo eléctrico (distancia horizontal en nuestro ejemplo).

$$|\Delta V| = |E| \cdot d$$

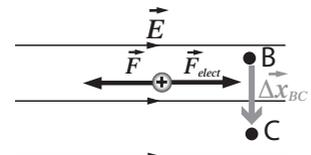
Analicemos el signo de la diferencia de potencial teniendo en cuenta el signo del trabajo de la fuerza aplicada para el traslado con velocidad constante:



Para trasladar la carga en el sentido contrario al del campo eléctrico (de B a A) el trabajo de la fuerza aplicada (contraria a la fuerza eléctrica) es positivo. Entonces la diferencia de potencial $V_A - V_B$ también es positiva: V_A es mayor que V_B .



Para trasladar la carga en el mismo sentido al del campo eléctrico (de A a B), el trabajo de la fuerza aplicada (contraria a la fuerza eléctrica) es negativo. Entonces la diferencia de potencial $V_B - V_A$ también es negativa: V_A es mayor que V_B .



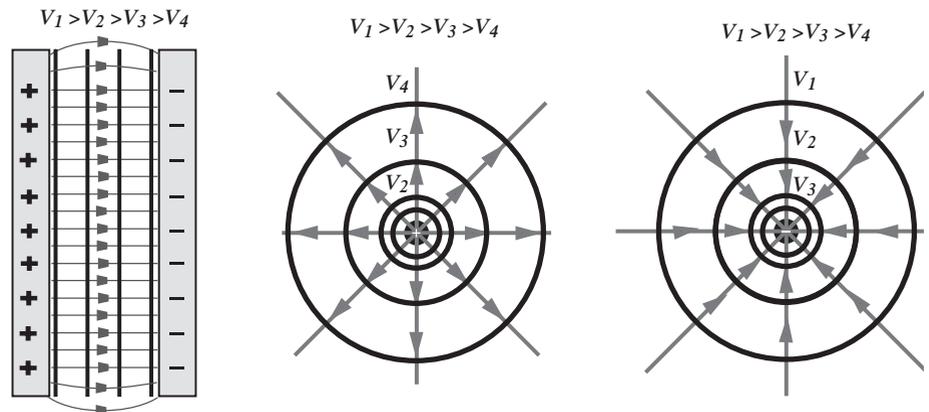
Para trasladar la carga en dirección perpendicular al del campo eléctrico, el trabajo de la fuerza aplicada (contraria a la fuerza eléctrica) es nulo. Entonces la diferencia de potencial $V_C - V_B$ también es nula así que ambos tienen el mismo potencial: V_C es igual que V_B .

El potencial eléctrico V tiene un valor determinado para cada punto del espacio y este valor disminuye en el sentido del campo eléctrico.

Superficie equipotencial

Si una carga se mueve en dirección perpendicular a las líneas de campo, no varía su energía potencial pues el trabajo eléctrico es nulo (la fuerza es perpendicular al desplazamiento). En ese caso todos los puntos de la superficie por los que pasa la carga tienen el mismo valor de potencial. Se llama *superficie equipotencial* a aquella superficie, perpendicular a las líneas de campo, en la que todos los puntos tienen el mismo potencial.

Superficies equipotenciales. Las líneas de campo (líneas grises) y las superficies equipotenciales (líneas negras) son perpendiculares entre sí. Para el caso del campo uniforme confinado entre dos planos cargados, las superficies equipotenciales son superficies planas paralelas a los planos generadores del campo. Para una carga puntual las superficies equipotenciales son superficies esféricas centradas en la carga.



Si se recorre el espacio en la dirección y sentido de las líneas de campo, se atraviesan perpendicularmente diferentes superficies equipotenciales con niveles decrecientes de potencial.

El potencial disminuye en el sentido de las líneas de campo porque las cargas positivas al moverse en ese sentido pierden energía potencial y, si no existe otra fuerza que la eléctrica, ganan energía cinética. Para llevar una carga positiva en ese sentido con velocidad constante se debe aplicar una fuerza cuyo trabajo negativo contrarreste el trabajo positivo de la fuerza eléctrica del campo.

La dirección y sentido del campo eléctrico indican la dirección y sentido en que más decrece el potencial. Su módulo indica cuánto cambia el potencial por unidad de longitud y coincide con el módulo del *gradiente* de potencial:

$$|E| = \frac{|\Delta V|}{|\Delta x|}$$

La última expresión permite observar que el campo eléctrico (que se mide N/C) también puede expresarse en V/m, unidad que es mucho más habitual.

Ejemplo

Una pequeña esfera cargada negativamente se encuentra en un campo electrostático. Si se traslada **siguiendo la dirección de una línea de campo, desde un punto A hasta otro B donde el potencial es mayor**, ¿cuál es la única opción correcta entre las que siguen?

- La energía potencial electrostática de la esfera permanece constante.
- El trabajo de la fuerza eléctrica es negativo.
- La esfera se mueve en el sentido del campo, y su energía potencial electrostática disminuye.
- La esfera se mueve en el sentido del campo, y su energía potencial electrostática aumenta.
- La esfera se mueve en el sentido opuesto del campo, y su energía potencial electrostática disminuye.
- La esfera se mueve en el sentido opuesto del campo, y su energía potencial electrostática aumenta.