

INTRO.CARGAS ELÉCTRICAS EN ...

La carga eléctrica constituye una propiedad fundamental de la materia. Se manifiesta a través de ciertas fuerzas, denominadas electrostáticas, que son las responsables de los fenómenos eléctricos. Su influencia en el espacio puede describirse con el auxilio de la noción física de campo de fuerzas. El concepto de potencial hace posible una descripción alternativa de dicha influencia en términos de energías.

El término eléctrico, y todos sus derivados, tiene su origen en las experiencias realizadas por Tales de Mileto, un filósofo griego que vivió en el siglo sexto antes de Cristo. Tales estudió el comportamiento de una resina fósil, el ámbar -en griego *elektron*-, observando que cuando era frotada con un paño de lana adquiría la propiedad de atraer hacia sí pequeños cuerpos ligeros; los fenómenos análogos a los producidos por Tales con el ámbar o *elektron* se denominaron fenómenos eléctricos y más recientemente fenómenos electrostáticos.

La *electrostática* es la parte de la física que estudia este tipo de comportamiento de la materia, se preocupa de la medida de la carga eléctrica o cantidad de electricidad presente en los cuerpos y, en general, de los fenómenos asociados a las *cargas eléctricas en reposo*. El desarrollo de la teoría atómica permitió aclarar el origen y la naturaleza de los fenómenos eléctricos; la noción de *fluido eléctrico*, introducida por Benjamín Franklin (1706-1790) para explicar la electricidad, fue precisada a principios de siglo al descubrirse que la materia está compuesta íntimamente de átomos y éstos a su vez por partículas que tienen propiedades eléctricas.

Como sucede con otros capítulos de la física, el interés de la electrostática reside no sólo en que describe las características de unas fuerzas fundamentales de la naturaleza, sino también en que facilita la comprensión de sus aplicaciones tecnológicas. Desde el pararrayos hasta la televisión una amplia variedad de dispositivos científicos y técnicos están relacionados con los fenómenos electrostáticos.

FENÓMENOS ELECTROSTÁTICOS

Electrización

Cuando a un cuerpo se le dota de propiedades eléctricas se dice que ha sido electrizado. La electrización por frotamiento permitió, a través de unas cuantas experiencias fundamentales y de una interpretación de las mismas cada vez más completa, sentar las bases de lo que se entiende por electrostática.

Si una barra de ámbar (de caucho o de plástico) se frota con un paño de lana, se electriza. Lo mismo sucede si una varilla de vidrio se frota con un paño de seda. Aun cuando ambas varillas pueden atraer objetos ligeros, como hilos o trocitos de papel, la propiedad eléctrica adquirida por frotamiento no es equivalente en ambos casos. Así, puede observarse que dos barras de ámbar electrizadas se repelen entre sí, y lo mismo sucede en el caso de que ambas sean de vidrio. Sin embargo, la barra de ámbar es capaz de atraer a la de vidrio y viceversa.

Este tipo de experiencias llevaron a W. Gilbert (1544-1603) a distinguir, por primera vez, entre la electricidad que adquiere el vidrio y la que adquiere el ámbar. Posteriormente Franklin al tratar de explicar los fenómenos eléctricos consideró la electricidad como un fluido sutil, llamó a la electricidad «vítrea» de Gilbert *electricidad positiva* (+) y a la «resinosa» *electricidad negativa* (-). Las experiencias de electrización pusieron de manifiesto que:

Cargas eléctricas de distinto signo se atraen y cargas eléctricas de igual signo se repelen.

Una experiencia sencilla sirvió de apoyo a Franklin para avanzar en la descripción de la carga eléctrica como propiedad de la materia. Cuando se frota la barra de vidrio con el paño de seda, se observa que tanto una como otra se electrizan ejerciendo por separado fuerzas de diferente signo sobre un tercer cuerpo cargado. Pero si una vez efectuada la electrización se envuelve la barra con el paño de seda, no se aprecia fuerza alguna sobre el cuerpo anterior. Ello indica que a pesar de estar electrizadas sus partes, el conjunto paño-barra se comporta como si no lo estuviera, manteniendo una *neutralidad eléctrica*.

Este fenómeno fue interpretado por Franklin introduciendo el *principio de conservación de la carga*, según el cual cuando un cuerpo es electrizado por otro, la cantidad de electricidad que recibe uno de los cuerpos es igual a la que cede el otro, pero en conjunto no hay producción neta de carga. En términos de cargas positivas y negativas ello significa que la aparición de una carga negativa en el vidrio va acompañada de otra positiva de igual magnitud en el paño de lana o viceversa, de modo que la suma de ambas es cero.

Cuando un cuerpo cargado eléctricamente se pone en contacto con otro inicialmente neutro, puede transmitirle sus propiedades eléctricas. Este tipo de electrización denominada *por contacto* se caracteriza porque es permanente y se produce tras un reparto de carga eléctrica que se efectúa en una proporción que depende de la geometría de los cuerpos y de su composición. Existe, no obstante, la posibilidad de electrizar un cuerpo neutro mediante otro cargado sin ponerlo en contacto con él. Se trata, en este caso, de una electrización a distancia o *por influencia*. Si el cuerpo cargado lo está positivamente la parte del cuerpo neutro más próximo se cargará con electricidad negativa y la opuesta con electricidad positiva. La formación de estas dos regiones o *polos* de características eléctricas opuestas hace que a la electrización por influencia se la denomine también *polarización eléctrica*. A diferencia de la anterior este tipo de electrización es transitoria y dura mientras el cuerpo cargado se mantenga suficientemente próximo al neutro.

La naturaleza eléctrica de la materia

La teoría atómica moderna explica el por qué de los fenómenos de electrización y hace de la carga eléctrica una propiedad fundamental de la materia en todas sus formas. Un átomo de cualquier sustancia está constituido, en esencia, por una región central o *núcleo* y una envoltura externa formada por *electrones*.

El núcleo está formado por dos tipos de partículas, los *protones*, dotados de carga eléctrica positiva, y los *neutrones*, sin carga eléctrica aunque con una masa semejante a la del protón. Tanto unos como otros se hallan unidos entre sí por efecto de unas fuerzas mucho más intensas que las de la repulsión electrostática -las fuerzas nucleares- formando un todo compacto. Su carga total es positiva debido a la presencia de los protones.

Los electrones son partículas mucho más ligeras que los protones y tienen carga eléctrica negativa. La carga de un electrón es igual en magnitud, aunque de signo contrario, a la de un protón. Las fuerzas eléctricas atractivas que experimentan los electrones respecto del núcleo hace que éstos se muevan en torno a él en una situación que podría ser comparada, en una primera aproximación, a la de los planetas girando en torno al Sol por efecto, en este caso de la atracción gravitatoria. El número de electrones en un átomo es igual al de protones de su núcleo correspondiente, de ahí que en conjunto y a pesar de estar formado por partículas con carga, el átomo completo resulte eléctricamente neutro.

Aunque los electrones se encuentran ligados al núcleo por fuerzas de naturaleza eléctrica, en algunos tipos de átomos les resulta sencillo liberarse de ellas. Cuando un electrón logra escapar de dicha influencia, el átomo correspondiente pierde la neutralidad eléctrica y se convierte en un *ion positivo*, al poseer un número de protones superior al de electrones. Lo contrario sucede cuando un electrón adicional es incorporado a un átomo neutro. Entonces el *ion* formado es *negativo*.

La *electrización por frotamiento* se explica del siguiente modo. Por efecto de la fricción, los electrones externos de los átomos del paño de lana son liberados y cedidos a la barra de ámbar, con lo cual ésta queda cargada negativamente y aquél positivamente. En términos análogos puede explicarse la electrización del vidrio por la seda. En cualquiera de estos fenómenos se pierden o se ganan electrones, pero el número de electrones cedidos por uno de los cuerpos en contacto es igual al número de electrones aceptado por el otro, de ahí que en conjunto no hay producción ni destrucción de carga eléctrica. Esta es la explicación, desde la teoría atómica, del principio de conservación de la carga eléctrica formulado por Franklin con anterioridad a dicha teoría sobre la base de observaciones sencillas.

La *electrización por contacto* es considerada como la consecuencia de un flujo de cargas negativas de un cuerpo a otro. Si el cuerpo cargado es positivo es porque sus correspondientes átomos poseen un defecto de electrones, que se verá en parte compensado por la aportación del cuerpo neutro cuando ambos entran en contacto, El resultado final es que el cuerpo cargado se hace menos positivo y el neutro adquiere carga eléctrica positiva. Aun cuando en realidad se hayan transferido electrones del cuerpo neutro al cargado positivamente, todo sucede como si el segundo hubiese cedido parte de su carga positiva al primero. En el caso de que el cuerpo cargado inicialmente sea negativo, la transferencia de carga negativa de uno a otro corresponde, en este caso, a una cesión de electrones.

La *electrización por influencia* es un efecto de las fuerzas eléctricas. Debido a que éstas se ejercen a distancia, un cuerpo cargado positivamente en las proximidades de otro neutro atraerá hacia sí a las cargas negativas, con lo que la región próxima queda cargada negativamente. Si el cuerpo cargado es negativo entonces el efecto de repulsión sobre los electrones atómicos convertirá esa zona en positiva. En ambos casos, la separación de cargas inducida por las fuerzas eléctricas es transitoria y desaparece cuando el agente responsable se aleja suficientemente del cuerpo neutro.

La carga del electrón (o del protón) constituye el valor mínimo e indivisible de cantidad de electricidad. Es, por tanto, la carga elemental y por ello constituye una unidad natural de cantidad de electricidad. Cualquier otra carga equivaldrá a un número entero de veces la carga del electrón. El *coulomb* es la unidad de carga eléctrica en el Sistema Internacional y equivale a $6,27 \cdot 10^{18}$ veces la carga del electrón (e^-), es decir:

$$1 \text{ C} = 6,27 \cdot 10^{18} e^-$$

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 sólo 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 las sustancias respecto del desplazamiento de las cargas en su interior depende de su naturaleza íntima. Así, los átomos de las sustancias conductoras 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 las sustancias aisladoras, sin embargo, los núcleos atómicos retienen con fuerza 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, pero desde un

punto de vista físico su interés radica en que se pueden alterar sus propiedades conductoras con cierta facilidad, ya sea mediante pequeños cambios en su composición, ya sea sometidos 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 aún la proporción en la que esas fuerzas de atracción y repulsión variaban. 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 dotadas de carga eléctrica. El resultado final de esta investigación experimental fue la ley que lleva su nombre y que describe las características de las fuerzas de interacción entre cuerpos cargados.

Cuando se consideran dos cuerpos cargados (supuestos puntuales), la intensidad de las fuerzas atractivas o repulsivas que se ejercen entre sí es directamente proporcional al producto de sus cargas e inversamente proporcional al cuadrado de las distancias que las separa, dependiendo además dicha fuerza de la naturaleza del medio que les rodea.

Como fuerzas de interacción, las fuerzas eléctricas se aplican en los respectivos centros de las cargas y están dirigidas a lo largo de la línea que los une.

La interpretación de la ley de Coulomb

La expresión matemática de la ley de Coulomb es:

$$F_e = K \frac{q \cdot q'}{r^2} \quad (9.1)$$

en donde q y q' corresponden a los valores de las cargas que interactúan tomadas con su signo positivo o negativo, r representa la distancia que las separa supuestas concentradas cada una de ellas en un punto y K es la constante de proporcionalidad correspondiente que depende del medio en que se hallen dichas cargas.

El hecho de que las cargas aparezcan con su signo propio en la ecuación anterior da lugar a la existencia de dos posibles signos para la fuerza F_e , lo cual puede ser interpretado como el reflejo de los dos tipos de fuerzas, atractivas y repulsivas, características de la interacción electrostática. Así, cargas con signos iguales darán lugar a fuerzas (repulsivas) de signo positivo, en tanto que cargas con signos diferentes experimentarán fuerzas (atractivas) de signo negativo. Consiguientemente el signo de la fuerza en la ecuación (9.1) expresa su sentido atractivo o repulsivo.

La constante de proporcionalidad K toma en el vacío un valor igual a

$$K = 8,9874 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

esa elevada cifra indica la considerable intensidad de las fuerzas electrostáticas. Pero además 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 pura la intensidad de la fuerza electrostática entre las mismas cargas, situadas a igual distancia, se reduce en un factor de 1/81 con respecto de la que experimentaría en el vacío. La constante K traduce, por tanto, la influencia del medio.

Finalmente, 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 otros términos, que las fuerzas electrostáticas son muy sensibles a los cambios en la distancia r .

La ley de Newton y la ley de Coulomb

La comparación entre la ley de Newton de la gravitación universal y la ley de Coulomb de la electrostática muestra la existencia entre ellas de una cierta analogía o paralelismo.

$$F_g = -G \frac{m m'}{r^2} \quad F_e = K \frac{q q'}{r^2}$$

Esta analogía no supone una identidad entre la naturaleza de ambos tipos de fuerzas, sólo indica que los fenómenos de interacción entre cargas y los de interacción entre masas podrán ser estudiados y tratados de un modo similar. A pesar de esta analogía formal, existen algunas diferencias que cabe destacar. La primera se refiere al valor de las constantes G y K . El valor de G resulta ser mucho menor que K :

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ unidades SI}$$

$$K = 8,99 \cdot 10^9 \text{ unidades SI (en el vacío)}$$

Por tal motivo, las fuerzas entre cargas serán mucho más intensas que las fuerzas entre masas para cantidades comparables de una y otra magnitud. Además, las fuerzas gravitatorias son siempre atractivas, mientras que las eléctricas pueden ser atractivas o repulsivas en función de los signos de las cargas que interactúan.

El coulomb como unidad de carga

La ley de Coulomb proporciona una idea de la magnitud del coulomb como cantidad de electricidad.

Así, haciendo en la (9.1)

$$q = q' = 1 \text{ C y } r = 1 \text{ m}$$

resulta $F_e = K \cdot 9 \cdot 10^9 \text{ N}$; es decir, dos cargas de un coulomb situadas a una distancia de un metro, experimentarían una fuerza electrostática de nueve mil millones de newtons. La magnitud de esta fuerza descomunal indica que el coulomb es una cantidad de carga muy grande, de ahí que se empleen sus submúltiplos para describir las situaciones que se plantean en el estudio de los fenómenos electrostáticos. Los submúltiplos del coulomb más empleados son:

El milicoulomb: ($1 \text{ mC} = 10^{-3} \text{ C}$).

El microcoulomb: ($1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$).

Y el nanocoulomb: ($1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$).

APLICACIÓN DE LA LEY DE COULOMB

La ley de Coulomb relaciona la magnitud de las fuerzas electrostáticas con las características del medio, reflejadas en su constante K , con el valor de las cargas interactuantes y con la distancia

comprendida entre sus centros. Por tal motivo es posible averiguar uno de estos elementos si se conoce el resto.

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

$1,6 \cdot 10^{-19}$ C y que la intensidad de la fuerza atractiva que experimentan es de $8,2 \cdot 10^{-18}$ N, determinar el valor de la distancia media que los separa (radio de Bohr).

De acuerdo con la ley de Coulomb:

$$F = K \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}$$

La distancia entre dos cargas puede expresarse en función de la fuerza de interacción en la forma:

$$r = \sqrt{\frac{K Q q}{F}}$$

En este caso $q_{e^-} = -1,60 \cdot 10^{-19}$ C, $q_{p^+} = +1,60 \cdot 10^{-19}$ C; la fuerza F por ser atractiva se considera negativa: $F = -8,2 \cdot 10^{-18}$ N y la constante K es la del vacío: $K = 9 \cdot 10^9$ N · m²/C². Sustituyendo en la ecuación anterior, resulta:

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1,60 \cdot 10^{-19})^2}{8,2 \cdot 10^{-18}}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 1,60^2 \cdot 10^9 \cdot 10^{-38}}{8,2 \cdot 10^{-18}}} = \\ &= 2,8 \cdot 10^{-11} \text{ m} \end{aligned}$$

EL CAMPO ELÉCTRICO

El concepto físico de campo

Las cargas eléctricas no precisan de ningún medio material para ejercer su influencia sobre otras, de ahí que las fuerzas eléctricas sean consideradas *fuerzas de acción a distancia*. Cuando en la naturaleza se da una situación de este estilo, se recurre a la idea de *campo* para facilitar la descripción en términos físicos de la influencia que uno o más cuerpos ejercen sobre el espacio que les rodea.

La noción física de campo se corresponde con la de un espacio dotado de propiedades medibles. En el caso de que se trate de un *campo de fuerzas* éste viene a ser aquella región del espacio en donde se dejan sentir los efectos de fuerzas a distancia. Así, la influencia gravitatoria sobre el espacio que rodea la Tierra se hace visible cuando en cualquiera de sus puntos se sitúa, a modo de detector, un cuerpo de prueba y se mide su peso, es decir, la fuerza con que la Tierra lo atrae. Dicha influencia gravitatoria se conoce como *campo gravitatorio terrestre*. De un modo análogo la física introduce la noción de *campo magnético* y también la de *campo eléctrico* o electrostático.

El campo eléctrico

El campo eléctrico asociado a una carga aislada o a un conjunto de cargas es aquella región del espacio en donde se dejan sentir sus efectos. Así, si en un punto cualquiera del espacio en donde está definido un campo eléctrico se coloca una carga de prueba o carga testigo, se observará la aparición de fuerzas eléctricas, es decir, de atracciones o de repulsiones sobre ella.

Todo campo físico queda caracterizado por sus propiedades. En el caso del campo eléctrico, una forma de describir las propiedades del campo sería indicar la fuerza que se ejercería sobre una misma carga si fuera trasladada de un punto a otro del espacio. El referirse a la misma carga de prueba permite comparar los distintos puntos del campo en términos de intensidad. La carga de referencia más simple a efectos de operaciones es la carga unidad positiva. La fuerza eléctrica que en un punto cualquiera del campo se ejerce sobre la carga unidad positiva, tomada como elemento de comparación, recibe el nombre de *intensidad del campo eléctrico* y se representa por la letra **E**. Por tratarse de una fuerza la intensidad del campo eléctrico es una magnitud vectorial que viene definida por su módulo *E* y por su dirección y sentido. En lo que sigue se considerarán por separado ambos aspectos del campo **E**.

La expresión del módulo de la intensidad de campo *E* puede obtenerse fácilmente para el caso sencillo del campo eléctrico creado por una carga puntual *Q* sin más que combinar la ley de Coulomb con la definición de *E*. La fuerza que *Q* ejercería sobre una carga unidad positiva 1^+ en un punto genérico *P* distante *r* de la carga central *Q* viene dada, de acuerdo con la ley de Coulomb, por:

$$F_e = K \frac{Q \cdot 1^+}{r^2}$$

pero aquella es precisamente la definición de *E* y, por tanto, ésta será también su expresión matemática

$$E = K \frac{Q}{r^2} \quad (9.2)$$

Puesto que se trata de una fuerza electrostática estará aplicada en *P*, dirigida a lo largo de la recta que une la carga central *Q* y el punto genérico *P*, en donde se sitúa la carga unidad, y su sentido será atractivo o repulsivo según *Q* sea negativa o positiva respectivamente.

Si la carga testigo es distinta de la unidad, es posible no obstante determinar el valor de la fuerza por unidad de carga en la forma:

$$E = \frac{F}{q} \quad (9.3)$$

Donde *F* es la fuerza calculada mediante la ley de Coulomb entre la carga central *Q* y la carga de prueba o testigo *q* empleada como elemento detector del campo. Es decir:

$$E = \frac{K Q q / r^2}{q} = K \frac{Q}{r^2}$$

expresión idéntica a la (9.2).

A partir del valor de *E* debido a *Q* en un punto *P* y de la carga *q* situada en él, es posible determinar la fuerza *F* en la forma

$$F = q \cdot E \quad (9.4)$$

Expresión que indica que la fuerza entre Q y q es igual a q veces el valor de la intensidad de campo E en el punto P .

Esta forma de describir las fuerzas del campo y su variación con la posición hace más sencillos los cálculos, particularmente cuando se ha de trabajar con campos debidos a muchas cargas.

La unidad de intensidad de campo E es el cociente entre la unidad de fuerza y la unidad de carga; en el SI equivale, por tanto, al newton (N)/coulomb (C).

Representación del campo eléctrico

Es posible conseguir una representación gráfica de un campo de fuerzas empleando las llamadas *líneas de fuerza*. Son líneas imaginarias que describen, si los hubiere, los cambios en dirección de las fuerzas al pasar de un punto a otro. En el caso del campo eléctrico, las líneas de fuerza indican las trayectorias que seguirían las partículas positivas si se las abandonase libremente a la influencia de las fuerzas del campo. El campo eléctrico será un vector tangente a la línea de fuerza en cualquier punto considerado.

Una carga puntual positiva dará lugar a un mapa de líneas de fuerza radiales, pues las fuerzas eléctricas actúan siempre en la dirección de la línea que une a las cargas interactuantes, y dirigidas hacia fuera porque las cargas móviles positivas se desplazarían en ese sentido (fuerzas repulsivas). En el caso del campo debido a una carga puntual negativa el mapa de líneas de fuerza sería análogo, pero dirigidas hacia la carga central. Como consecuencia de lo anterior, en el caso de los campos debidos a varias cargas las líneas de fuerza nacen siempre de las cargas positivas y mueren en las negativas. Se dice por ello que las primeras son «manantiales» y las segundas «sumideros» de líneas de fuerza.

APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE INTENSIDAD DE CAMPO

La intensidad de campo E , como fuerza por unidad de carga, es una magnitud que admite una representación vectorial. Además está relacionada con la fuerza de modo que conociendo el valor de E en un punto es posible determinar la fuerza que experimentaría una carga distinta de la unidad si se la situara en dicho punto, y viceversa.

Se trata ahora de determinar la intensidad de campo eléctrico debido a una carga puntual $Q = 1,6 \cdot 10^{-6}$ C en un punto P situado a una distancia de 0,4 m de la carga y de dibujar en dicho punto el vector que lo representa. ¿Cuál sería la fuerza eléctrica que se ejercería sobre otra carga $q = 3 \cdot 10^{-8}$ C si se la situara en P ? Tómese como medio el vacío con $K = 9 \cdot 10^9$ N m²/C².

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

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

Dicho valor depende de la carga central Q y de la distancia al punto P , pero en él no aparece para nada la carga que se sitúa en P por ser ésta, siempre que se utiliza este concepto, la carga unidad positiva. Sustituyendo en la anterior expresión se tiene:

$$E = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-6}}{0,4^2} = 9 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

Por tratarse de una fuerza debida a una carga positiva también sobre la unidad de carga positiva será repulsiva y el vector correspondiente estará aplicado en P y dirigido sobre la recta que une Q con P en el sentido que se aleja de la carga central Q .

Conociendo la fuerza por unidad de carga, el cálculo de la fuerza sobre una carga diferente de la unidad se reduce a multiplicar E por el valor de la carga q que se sitúa en P :

$$F = q \cdot E = 9 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 10^{-8} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

LA SUPERPOSICIÓN DE LOS CAMPOS ELÉCTRICOS

La descripción de la influencia de una carga aislada en términos de campos puede generalizarse al caso de un sistema formado por dos o más cargas y extenderse posteriormente al estudio de un cuerpo cargado. La experiencia demuestra que las influencias de las cargas aisladas que constituyen el sistema son aditivas, es decir, se suman o superponen vectorialmente. Así, la intensidad de campo \mathbf{E} en un punto cualquiera del espacio que rodea dos cargas Q_1 y Q_2 será la suma vectorial de las intensidades \mathbf{E}_1 y \mathbf{E}_2 debidas a cada una de las cargas individualmente consideradas.

Este principio de superposición se refleja en el mapa de líneas de fuerza correspondiente. Tanto si las cargas son de igual signo como si son de signos opuestos, la distorsión de las líneas de fuerza, respecto de la forma radial que tendrían si las cargas estuvieran solitarias, es máxima en la zona central, es decir, en la región más cercana a ambas. Si las cargas tienen la misma magnitud, el mapa resulta simétrico respecto de la línea media que separa ambas cargas. En caso contrario, la influencia en el espacio, que será predominante para una de ellas, da lugar a una distribución asimétrica de líneas de fuerza.

LA ENERGÍA ELECTROSTÁTICA

Trabajo y energía potencial electrostática

La idea de energía potencial, como forma de energía asociada a la posición de los cuerpos, está presente también en los campos eléctricos. Así, una carga q negativa situada en un punto P a una distancia r de otra carga central positiva Q acumula en esa posición una cierta energía potencial, energía que podría liberarse si se dejara en libertad, ya que se desplazaría hacia Q por efecto de la fuerza atractiva. Situarla de nuevo en la posición inicial supondría la realización de un trabajo en contra de la fuerza atractiva ejercida por Q . Este trabajo exterior a las fuerzas del campo se invierte precisamente en aumentar su energía potencial E_p y puede escribirse en la forma

$$W_e = E_p(\text{final}) - E_p(\text{inicial}) = \Delta E_p \quad (9.5)$$

Como sucede cuando se tira de un cuerpo sujeto a un muelle y a continuación se suelta, el trabajo eléctrico podría ser recuperado si la carga q se dejara en libertad, es decir, si no se la obligara a ocupar la posición definida por el punto P .

Según la ecuación (9.5), el trabajo W_e tendrá el signo de ΔE_p . Un desplazamiento de la carga q que suponga un aumento en su energía potencial, $E_p(\text{final}) > E_p(\text{inicial})$, corresponderá a un trabajo positivo, es decir, un trabajo realizado por fuerzas exteriores al campo. Por contra, un

desplazamiento de q que lleve consigo una disminución de su energía potencial, $E_p(\text{final}) < E_p(\text{inicial})$, habrá sido efectuada por las fuerzas del campo con la realización de un trabajo negativo.

Este criterio de signos considera el trabajo positivo cuando lleva asociado una ganancia de energía potencial y negativo cuando se efectúa a expensas de una disminución de la energía potencial de la carga considerada.

Potencial electrostático en un punto

Del mismo modo que se introduce la noción de intensidad de campo eléctrico E para referir las fuerzas electrostáticas a la unidad de carga positiva, es posible hacer la misma operación con la energía potencial. Si se desea comparar, en términos de energías potenciales, un punto de un campo eléctrico con otro, será preciso utilizar en todos los casos como elemento de comparación una misma carga. La más sencilla de manejar es la carga unidad positiva y su energía potencial se denomina *potencial electrostático*. Surge así el concepto de potencial electrostático V en un punto P como la energía potencial eléctrica que poseería la unidad de carga positiva situada en dicho punto del campo.

Por analogía con la ecuación (9.3) de la intensidad de campo, la expresión del potencial será:

$$V = \frac{E_p}{q} \quad (9.6)$$

Por tratarse de una energía por unidad de carga, el potencial será una magnitud escalar cuya unidad en el SI vendrá dada por el cociente entre el joule (J) y el coulomb (C). Dicho cociente recibe el nombre de volt (V):

$$1 \text{ volt (V)} = \frac{1 \text{ joule (J)}}{1 \text{ coulomb (C)}}$$

Diferencia de potencial

Si el potencial eléctrico en un punto caracteriza desde un punto de vista energético ese punto del campo, su diferencia entre dos puntos dados está relacionada con la tendencia al movimiento de las cargas positivas entre ellos; por tal motivo se la denomina también *tensión eléctrica*. Comparando los movimientos de las cargas bajo la acción de un campo eléctrico con los de las masas por efecto de las fuerzas del peso, la diferencia de potencial entre dos puntos podría ser asimilada a la diferencia de altura o nivel. Las cargas positivas se desplazan espontáneamente por un campo eléctrico de los puntos de mayor potencial a los de menor potencial, del mismo modo que los cuerpos con masa caen desde los puntos de mayor altura. Las cargas negativas lo hacen en sentido contrario.

Esta propiedad de la magnitud diferencia de potencial como responsable del sentido del movimiento de las cargas en el seno de un campo eléctrico puede ser deducida combinando las ecuaciones (9.5) y (9.6). El resultado es la nueva expresión:

$$\begin{aligned} V &= V(\text{final}) - V(\text{inicial}) = \\ &= \frac{E_p(\text{final}) - E_p(\text{inicial})}{q} = \frac{W_e}{q} \end{aligned} \quad (9.7)$$

De la ecuación anterior resulta un nuevo significado para la diferencia de potencial entre dos puntos como el trabajo necesario para trasladar la unidad de carga positiva de uno a otro punto.

Pero, además, despejando W_e resulta:

$$W_e = q \cdot \Delta V \quad (9.8)$$

siendo q la carga que se desplaza y ΔV la diferencia de potencial entre las posiciones extremas. Si q es positiva, una ΔV positiva (aumento del potencial) corresponderá a un trabajo W_e positivo, es decir, efectuado por agentes exteriores al campo, con lo que el movimiento de la carga q será forzado. Si ΔV es negativo (disminución del potencial), W_e también lo será, lo que indica que las fuerzas actuantes son las propias del campo, dando lugar a un movimiento espontáneo de la carga q positiva. En el caso de que q fuera negativa los criterios serían opuestos a los anteriores.

La visualización de cómo varía el potencial de un punto a otro en un campo electrostático se efectúa recurriendo a la noción de *superficie equipotencial* como lugar geométrico de los puntos del campo que se encuentran a igual potencial. Su representación gráfica da lugar a una serie de superficies que, a modo de envolturas sucesivas, rodean al cuerpo cargado cuyo campo se está considerando. Cada una de ellas une todos los puntos de igual potencial.

Aunque teóricamente habría infinitas envolturas, se representan sólo las que corresponden a incrementos o variaciones fijas del potencial eléctrico. Así se habla de la superficie equipotencial de 10 V, de 20 V, de 30 V, etc... Entre cualquier par de puntos de una misma superficie equipotencial, su diferencia de potencial es, de acuerdo con su definición, nula.

UNA ECUACIÓN PARA EL POTENCIAL

Junto al concepto de potencial electrostático, es posible obtener, a partir de las magnitudes físicas implicadas en su definición, una expresión para la diferencia de potencial primero y para el potencial después. En el caso de que el campo sea debido a una carga puntual Q , la deducción de la ecuación potencial V en un punto genérico P sería como sigue.

Sean O y P dos puntos del espacio que rodea a la carga Q , y r_O y r_P las distancias respectivas a dicha carga tomada como origen de referencia. El trabajo necesario para trasladar una carga q desde O a P corresponde a una fuerza variable con la distancia, pero puede descomponerse el trayecto en tramos lo suficientemente cortos como para considerar que en ellos la fuerza es constante; en tal caso:

$$W_{O \rightarrow P} = W_{O \rightarrow 1} + W_{1 \rightarrow 2} + W_{2 \rightarrow 3} + \dots + W_{n \rightarrow P}$$

donde los sumandos representan esos trabajos elementales.

De acuerdo con la definición de trabajo $W = F \cdot \Delta r$ y recordando que en este caso la fuerza F es la electrostática entre Q y q , se podrá escribir, recurriendo a la ley de Coulomb, la expresión:

$$W_{O \rightarrow 1} = K \frac{Qq}{r^2} (r_1 - r_0)$$

donde r^2 puede ser tomado como el producto $r_1 \cdot r_0$, lo que equivale a considerar r como la media geométrica de las distancias extremas. Admitiendo esta aproximación resulta:

$$W_{O \rightarrow 1} = K Q q \frac{r_1 - r_0}{r_1 r_0} = K Q q \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{r_1} \right)$$

Análogamente:

$$W_{1 \rightarrow 2} = K Q q \frac{r_2 - r_1}{r_2 r_1} = K Q q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

y así sucesivamente hasta el último intervalo:

$$W_{n \rightarrow p} = K Q q \frac{r_p - r_n}{r_p r_n} = K Q q \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_p} \right)$$

Sumando todos estos trabajos elementales se tiene:

$$W_{O \rightarrow p} = K Q q \left[\left(\frac{1}{r_O} - \frac{1}{r_1} \right) + \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right) + \dots + \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{r_p} \right) \right]$$

En donde los términos intermedios contenidos entre el corchete se cancelan dos a dos, pues son iguales y de signo opuesto, resultando para el trabajo total:

$$W_{O \rightarrow p} = K Q q \left(\frac{1}{r_O} - \frac{1}{r_p} \right)$$

Este trabajo, realizado por las fuerzas del campo, supondrá una disminución de la energía potencial de la carga q , de modo que se cumplirá la ecuación

$W_{O \rightarrow p} = \Delta E_p = -q \Delta V$, que combinada con la anterior da como resultado la expresión de la diferencia de potencial entre O y P :

$$\Delta V = K Q \left(\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_O} \right)$$

Si O se considera situado en el infinito respecto de la carga Q , la diferencia de potencial de cualquier otro punto respecto del infinito resultará:

$$V - V_\infty = \frac{K Q}{r_p}$$

Si por convenio se considera que el potencial V en el infinito es cero (lo que, además, parece razonable, pues la fuerza también se hace cero a esa distancia) resulta la expresión:

$$V = \frac{K Q}{r}$$

que representa el potencial electrostático del campo debido a la carga puntual Q en un punto que dista r de dicha carga.

APLICACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE TRABAJO Y DIFERENCIA DE POTENCIAL

Dado que la diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico representa el trabajo necesario para trasladar la unidad de carga positiva de uno a otro punto, es posible utilizar los valores del potencial electrostático para calcular trabajos en el seno de los campos eléctricos.

El campo eléctrico creado por una carga $Q = 4 \cdot 10^{-6}$ C situada en el vacío es tal que el potencial electrostático en un punto M que dista 3 m de Q es $V_M = 1,2 \cdot 10^4$ V y en otro punto N separado 2 m de la carga es $V_N = 1,8 \cdot 10^4$ V. Se trata de calcular el trabajo necesario para trasladar una carga $q = -2 \cdot 10^{-8}$ C de M a N interpretando el signo resultante.

La diferencia de potencial ΔV entre los puntos final e inicial viene dado por:

$$\Delta V = V_N - V_M = 1,8 \cdot 10^4 - 1,2 \cdot 10^4 = 0,6 \cdot 10^4 \text{ V}$$

Según la expresión

$$W_e = q \cdot \Delta V$$

el trabajo eléctrico necesario para trasladar una carga q distinta de la unidad será:

$$W_e = 0,6 \cdot 10^4 \cdot (-2 \cdot 10^{-8}) = -1,2 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Donde el signo negativo indica que el trabajo es realizado, en este caso, por las fuerzas del campo. En efecto, dado que la carga q tiene signo opuesto a la carga central Q que se supone fija, la fuerza entre ambas será atractiva y el desplazamiento de q del punto M (más alejado) al N (más próximo) se efectuará espontáneamente.