

CAMPO ELÉCTRICO

ELECTRICIDAD ESTÁTICA

Se tiene constancia del interés de la humanidad por fenómenos de la electricidad y del magnetismo desde la remota antigüedad. Con respecto a la electricidad, hacia el año 600 a. C., Tales de Mileto (630-550 a.C.) observó que, después de frotar una barra de ámbar con un paño, la barra atraía otros objetos livianos. Tres siglos después, otro filósofo griego, Theophrastus (374-287 a.C.), escribió en un tratado que otras sustancias tienen este mismo poder. Desde entonces y a lo largo de la Edad Antigua y Media se conocieron otros hechos de la electricidad y también del magnetismo (como las interacciones entre imanes y la orientación de la brújula).

Hay que esperar al siglo XVII para encontrar el primer trabajo sistemático sobre fenómenos eléctricos y magnéticos. En el año 1600 la Reina Elizabeth I ordenó a Gilbert (1544-1603) estudiar los imanes para mejorar la exactitud de las brújulas usadas en la navegación. Gilbert amplió el trabajo a un número amplio de fenómenos eléctricos y magnéticos y recopiló los resultados más importantes de sus experimentos en el libro De Magnete. Fue él quien utilizó por primera vez el término electricidad (del griego "elektron", que significa ámbar). Además, clasificó los materiales en eléctricos (conductores) y aneléctricos (aislantes) e ideó el primer electroscopio.

El trabajo pionero de Gilbert tuvo amplia continuación, pudiendo citar, entre otros, a Von Guericke (1602-1686) (ideó la primera máquina electrostática y predijo la naturaleza eléctrica de los relámpagos), Gray (1666-1736) (demostró que los



materiales conductores pueden ser electrizados si están aislados y transmitió electricidad a través de ellos), Du Fay (1698-1739) (fue el primero en identificar la existencia de dos tipos de cargas eléctricas, que él denominó carga vítrea y carga resinosa), Van Musschenbroek (1692-1761) (descubrió la llamada botella de Leyden y la base de los actuales condensadores eléctricos), Watson (1715-1787) (demostró que una descarga de electricidad estática es una corriente eléctrica y estudió por primera vez la propagación de corrientes en gases enrarecidos), y Franklin (1706-1790) (demostró que los rayos eran descargas eléctricas de tipo electrostático e inventó el pararrayos).

A continuación se resumen algunos hechos de la electricidad estática. En nuestro instituto los estudiantes los comprueban realizando experimentos muy sencillos, en los que utilizan el péndulo eléctrico, el electroscopio, y, también, globos (los globos inflados se electrizan muy fácilmente por frotamiento y debido a su escasa masa, ponen en evidencia muy claramente efectos de las fuerzas eléctricas):

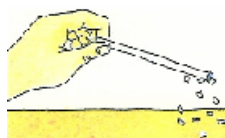
- La mayoría de objetos habitualmente no manifiestan propiedades eléctricas (al acercar diversos materiales al péndulo eléctrico o al electroscopio no ocurre nada)



- Algunos materiales, como el plástico (por ejemplo, un bolígrafo), el vidrio (por ejemplo, varillas) y el caucho (globos), se electrizan por frotamiento intenso con facilidad. Después de haber sido electrizados se ejercen entre sí fuerzas eléctricas de atracción o de repulsión. También ejercen fuerzas eléctricas sobre otros objetos no electrizados. Estas acciones no se observan sólo en objetos en estado sólido, sino

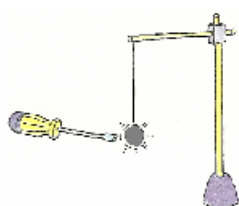
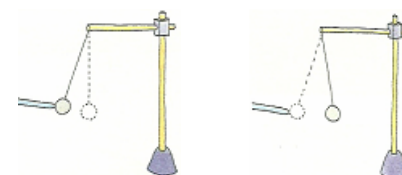
que afectan también a líquidos y gases. Resulta bastante espectacular observar, por ejemplo, cómo se desvía el agua que mana de un grifo cuando se le acerca un peine previamente frotado.

- Entre objetos del mismo material, previamente frotados del mismo modo (por ejemplo, dos globos frotados con el cabello o las bolitas de dos péndulos eléctricos previamente frotadas con piel de gato), se ejercen siempre fuerzas de repulsión.



- Un objeto frotado y otro neutro se ejercen fuerzas atractivas (por ejemplo: después de frotar un globo, se puede "dejar pegado a la pared" durante un buen rato; con un bolígrafo o una regla de plástico, previamente frotados, se atraen trocitos de papel; etc.)

- Cuando se frota objetos metálicos sujetándolos directamente con la mano (por ejemplo, varillas), parecen no electrizarse. Sin embargo, si se toca la esferita metálica de un péndulo electrostático con el extremo de un objeto electrizado (por ejemplo, una regla), se produce una fuerza de repulsión entre ellos. Si aplicamos el mismo proceso a la esferita de otro péndulo, se comprueba posteriormente que entre ambas esferitas se produce una repulsión.

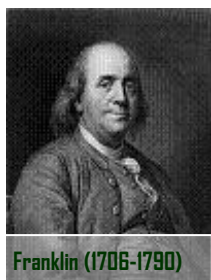


- Esta experiencia enseña que los objetos metálicos también se pueden electrizar siempre que se tome la precaución de no tocarlos para evitar que se deselectricen. Se puede confirmar electrizando la varilla metálica de un destornillador (normalmente el mango es de un material aislante) o la esfera metálica de una máquina electrostática, como las disponibles en el laboratorio.

- En todas las experiencias se puede comprobar que la intensidad de las fuerzas eléctricas disminuye rápidamente con la distancia.

MODELO DE CARGAS

El hecho de que los cuerpos "neutros" se electricen al frotarlos sugirió la idea de que mediante el frotamiento se añade o se quita "algo" al objeto y que el desequilibrio producido por ese exceso o esa carencia es el responsable de su electrización. Esta idea fue propuesta por Franklin (1706-1790), que imaginó la existencia de un "fluido eléctrico" que se hallaría en los cuerpos y cuya cantidad podía variar debido al frotamiento (pasando fluido eléctrico del cuerpo frotado al paño frotante, y viceversa). Para Franklin existían dos tipos de electrización correspondientes al exceso o la falta del fluido eléctrico: Cuando dos objetos del mismo material son frotados del mismo modo, ambos tienen exceso o defecto del fluido y se repelen. Cuando uno tiene exceso de fluido y otro carencia de él se atraen, como ocurre siempre entre el objeto frotado y el frotador.



Otra posible hipótesis se basa en suponer la existencia de una propiedad de la materia (la carga eléctrica) que se presenta en dos formas distintas, a las que llamamos carga positiva y carga negativa.

Esta hipótesis fue sugerida por primera vez por Du Fay (1698-1739) al observar el distinto comportamiento de un mismo cuerpo electrizado frente al ámbar y frente al vidrio. Propuso para ambos tipos de electricidad los nombres de "resinosa" y "vítrea". Con posterioridad se impuso la designación positiva-negativa para los dos tipos de electricidad, asignándose la positiva arbitrariamente al vidrio y la negativa al ámbar. Se planteó que en los cuerpos no electrizados la carga negativa y la positiva están en la misma cantidad y, por eso, sus efectos no se notan. En cambio, al frotar objetos pasa carga positiva o negativa de uno de ellos al otro. El modelo se completa postulando que las cargas del mismo signo se repelen y las de signo contrario se atraen.



Du Fay (1698-1739)

Este conjunto de hipótesis conforma el **modelo de cargas** y sigue siendo el modelo actualmente aceptado para explicar los fenómenos eléctricos. Muestra una gran capacidad para interpretar diferentes fenómenos de la electricidad y se pudo integrar de forma coherente con los conocimientos construidos sobre la estructura interna de la materia, particularmente sobre la estructura del átomo.

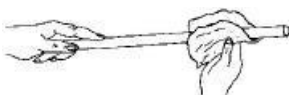
Un avance fundamental se produjo en este sentido en 1909, cuando Millikan demostró con el experimento de la gota de aceite que la carga eléctrica siempre se encuentra en la naturaleza como un múltiplo entero de una unidad fundamental de carga, e , igual en cantidad a la carga del electrón. Los modelos atómicos sucesivos (desde el modelo de Rutherford, hasta el modelo cuántico) enseñaron después que la materia común está formada básicamente por electrones (con carga negativa de valor $-e$), protones (con carga positiva del mismo valor $+e$), y neutrones (con carga cero). El modelo actual de la materia o modelo estándar dice que estas entidades están formadas por partículas más pequeñas, llamadas quarks (cuyas cargas son múltiplos de $e/3$), pero se considera que los quarks no pueden existir fuera de las partículas que forman. Por tanto, para todo fin práctico, la mínima carga observable sigue siendo, e . En el lenguaje de la física moderna, este hecho se expresa diciendo que la carga, q , está **cuantizada**, lo que significa que su valor es siempre un múltiplo de la carga fundamental ($q=Ne$, donde N es un número entero).

Los modelos atómicos también enseñaron que en la electrización por frotamiento se producen desplazamientos de electrones. Como son muy livianos y se ubican en la "corteza" atómica, los electrones se pueden desplazar con relativa facilidad dentro de algunos materiales y también pueden saltar de un material a otro. Estos desplazamientos e intercambios de electrones generan desequilibrios eléctricos que están en la base de las interacciones atractivas o repulsivas observadas. Tales interacciones atractivas o repulsivas de origen eléctrico coexisten con la interacción gravitatoria de atracción, pero normalmente esta última se puede despreciar por ser sumamente débil frente a las primeras.

APLICACIÓN DEL MODELO DE CARGAS

Seguidamente se aplica el modelo cargas para interpretar algunos hechos de la electricidad estática.

Tipos de carga



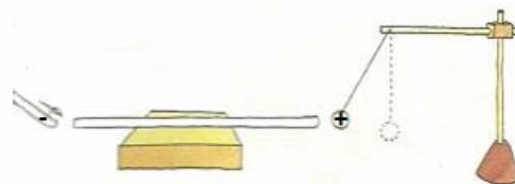
Se sabe que al frotar una barra de ebonita con un paño de piel de gato se produce un trasvase de electrones de la piel a la barra, mientras que, si la barra frotada es de vidrio, el trasvase de electrones tiene lugar en sentido contrario, es decir, desde la barra hacia el paño. Por tanto, el

modelo de cargas prevé que, tras el frotamiento, la barra de ebonita adquiere carga negativa y la barra de vidrio adquiere carga positiva. En todos los casos, el objeto frotado y el frotador adquieren cargas de signo contrario y, por tanto, se atraen.

Conductores y aislantes

En un día seco una varilla de ebonita o un globo de caucho, que han sido frotados con piel, permanecen cargados durante varios minutos. En cambio, una varilla metálica cargada pierde su carga instantáneamente al tocarla. La diferencia radica en la capacidad que tienen los electrones de moverse a través de diferentes materiales. El metal es un material conductor y la ebonita y el caucho son materiales aislantes.

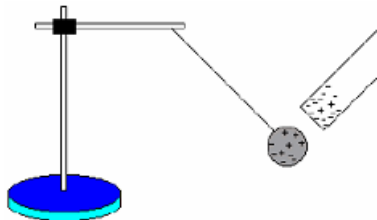
Por lo demás, la facilidad de movimiento de las cargas a través de los metales es consecuencia del enlace químico que determina su estructura. El enlace metálico conforma una red de iones positivos entre los cuales existen "bandas de electrones". Estos electrones se pueden mover con bastante facilidad a través del conductor, y, también pueden pasar de un material a otro. El hecho se puede poner en evidencia con el experimento mostrado en la figura adjunta, donde se observa que la barra metálica transmite la fuerza de atracción entre una barra con carga negativa (a la izquierda) y una esferita con carga positiva (a la derecha).



El grado con el que los electrones tienen libertad de movimiento en un material se describe con su **conductividad**. Esta propiedad varía enormemente entre los materiales, pues, por ejemplo, los metales permiten que las cargas se muevan unas 10^{23} veces más fácilmente que los aislantes comunes, como el vidrio. Otros materiales, llamados semiconductores, tienen una cantidad intermedia de electrones móviles por átomo.

Atracción entre un objeto cargado y otro neutro

En la figura adjunta se ve un ejemplo de cómo entre un cuerpo cargado y otro neutro se ejerce una fuerza eléctrica de atracción. En la situación planteada se supone que la barra se había cargado previamente por frotamiento, adquiriendo carga negativa, y que la esferita del péndulo eléctrico era inicialmente neutra. Entonces, al acercar la barra a la esferita



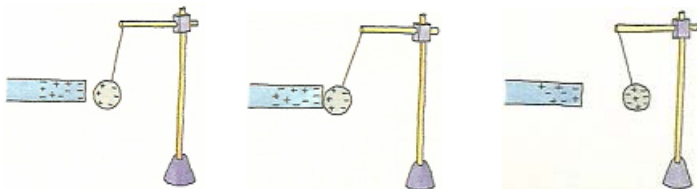
(sin llegar a tocarla) los electrones que hay en exceso en el borde de la barra repelen a los más próximos de la esferita y los desplazan alejándolos de la parte más próxima a la barra (los electrones se mueven por la esferita con relativa facilidad, al ser ésta metálica). Como consecuencia, en esa zona de la superficie de la esfera queda un exceso de carga positiva (por falta de electrones) y se produce un efecto neto de atracción entre la barra y la esferita.

El proceso que, en este caso, ha cargado negativamente una zona de la esferita se llama **inducción**. Se ha de tener en cuenta que en la inducción solo es arrastrada una pequeña parte de los electrones con capacidad de movimiento. Tan pronto como se producen cargas inducidas, ellas también ejercen fuerzas sobre los electrones libres situados en el interior de la esfera y en un tiempo extremadamente pequeño el sistema alcanza un estado de equilibrio, cuando en cada

punto del interior de la esfera, la fuerza que la barra cargada ejerce sobre un electrón queda equilibrada por una fuerza opuesta producida por las cargas inducidas.

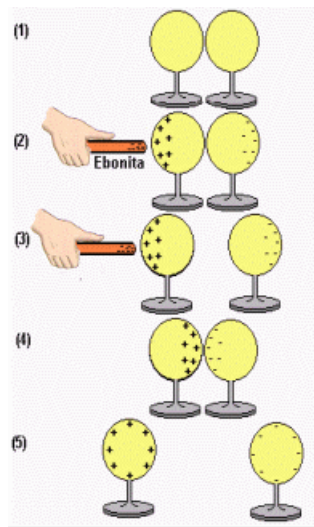
Repulsión después de que un objeto cargado toca a otro neutro

La secuencia de dibujos adjuntos explica el proceso por el que al tocar un cuerpo cargado con otro neutro, se produce en ocasiones una repulsión. Mientras se aproxima la barra de ebonita cargada negativamente a la esferita, se induce en ella carga positiva en la zona próxima a la barra y carga negativa en la zona opuesta (figura izquierda). En el momento del contacto de la barra con la esferita puede haber un trasvase de electrones de la ebonita a la esferita (figura central). Como consecuencia de dicho trasvase se enfrentan cargas del mismo signo (en este caso negativas) y se produce la repulsión (figura derecha).

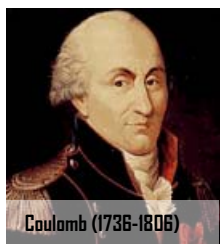


Carga por inducción de dos esferas

Terminamos estos ejemplos de aplicación del modelo de cargas mostrando un proceso adecuado para cargar por inducción a dos esferas metálicas con cargas de signo opuesto. Se dispone de inicialmente de las dos esferas metálicas, neutras, en contacto, y sostenidas por pies aislantes (1). Cuando una barra de ebonita cargada negativamente se aproxima a una de las esferas, pero sin llegar a tocarla, los electrones libres de las esferas metálicas son repelidos, y toda la nube de gas electrónico contenido en el interior de las esferas se desplaza ligeramente hacia la derecha, alejándose de la barra. Como los electrones no pueden escapar de las esferas, en la superficie de la esfera de la derecha, más alejada de la barra, se acumula un exceso de carga negativa. Esto origina una pérdida de carga negativa (por tanto, un exceso de carga positiva) en la superficie más próxima a la barra de la esfera de la izquierda (2). Las cargas inducidas permanecen sobre las superficies de las esferas mientras se mantenga cerca la barra de ebonita (si ésta se aleja, la nube de electrones de las esferas se desplaza hacia la izquierda y se restablece el estado neutro inicial). Teniéndolo en cuenta, se desplazan ligeramente las esferas mientras se mantiene la barra cerca la barra de ebonita. Así quedan dos esferas metálicas cargadas con cargas opuestas (3). Cómo se atraen entre sí, permanecen tan próximas como les sea posible (4), y solo cuando ambas esferas estén separadas lo suficiente, las cargas se distribuyen uniformemente en cada esfera (5).

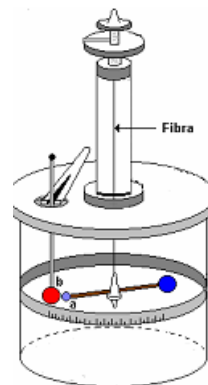


LEY DE COULOMB



El físico e ingeniero francés Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) fue el primero en establecer las leyes cuantitativas de la electrostática, además de realizar muchas investigaciones sobre magnetismo, rozamiento y electricidad. Sus investigaciones científicas están recogidas en siete memorias, en las que expone teóricamente los fundamentos del magnetismo y de la electrostática. Coulomb inventó en 1777 la balanza de torsión para medir la fuerza de atracción o repulsión que ejercen entre sí dos cargas eléctricas y estableció la función que liga esta fuerza con la distancia. Con este invento, culminado en 1785, pudo establecer la expresión matemática de la ley que calcula la fuerza eléctrica entre dos cargas.

La balanza de torsión (a la derecha) consta de una barra que cuelga de un hilo de un material elástico como fibra. Si la barra gira el hilo se tuerce y la fuerza de recuperación elástica tiende a que recupere su posición original. Para verificar la ley de Coulomb con este dispositivo, colocamos una esferita cargada en uno de los extremos de la barra (a) y le acercamos otra con carga del mismo signo (b). Las esferitas se ejercen una fuerza de repulsión eléctrica y tuercen el hilo. En estas condiciones la fuerza de torsión que el alambre ejerce sobre la barra es igual a la fuerza de repulsión eléctrica entre las cargas.



Acerca de los factores que determinan el valor de dicha fuerza, es lógico suponer que deberá ser mayor cuanto mayor sea la carga eléctrica acumulada por cada una de las esferas y menor cuanto mayor sea la distancia entre ellas. De forma más concreta, cabe plantear que si se duplica el valor de cualquiera de ambas cargas (q_1 o q_2) también se deberá duplicar el módulo de la fuerza que se ejercen. Por tanto, la fuerza electrostática debe ser proporcional al producto de ambas cargas.



Para plantear el tipo de dependencia entre el módulo de la fuerza y la distancia entre las cargas, tenemos en cuenta que la fuerza que ejerce, por ejemplo, la carga q_1 sobre la carga q_2 , es la misma en todos los puntos del espacio que estén a la misma distancia de q_1 y disminuye al aumentar esa distancia, r . Esto equivale a decir que la atracción o la repulsión que puede ejercer la carga q_1 sobre la carga q_2 es la misma en todos los puntos de una esfera de superficie $S=4\pi r^2$ centrada en q_1 . La fuerza disminuye al alejarnos hacia esferas de mayor superficie y, por lo tanto, planteamos que su módulo ha de ser inversamente proporcional a la cantidad $4\pi r^2$.

Finalmente, se ha de considerar la influencia del medio, puesto que la interacción eléctrica no se transmite igual, por ejemplo, en el vacío que en el aire o en el agua. A tal fin, se introduce una constante, ϵ , llamada permitividad eléctrica. La constante se escribe en el denominador de la expresión que calcula la fuerza, con lo que un medio con permitividad alta transmite mal la interacción eléctrica (es un medio "no eléctrico" o dieléctrico) y un medio con permitividad baja la transmite bien (es un medio conductor).

El conjunto de estos razonamientos conduce a la expresión operativa de la ley de ley de Coulomb:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Material	Constante (k)
Vacío	1
Aire (seco)	1,00059
Poliestireno	2,56
Nylon	3,4
Papel	3,7
Cuarzo fundido	3,78
Vidrio Pyrex	5,6
Caucho de neopreno	6,7
Agua	80
Titanato de estroncio	233

En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la carga se expresa en culombios, C , siendo la carga de un electrón igual a $1.602 \cdot 10^{-19} C$. La distancia se mide en metros, m , y la fuerza en Newtons, N . Respecto a la permitividad, ϵ , resulta cómodo simplificar la ley de Coulomb, utilizando la constante alternativa: $k=1/4\pi\epsilon$.

El mayor valor de la constante corresponde al vacío ($k_0=9 \cdot 10^9 SI$, $\epsilon_0=8.84 \cdot 10^{-12} SI$). Por lo tanto, en el vacío es donde la fuerza eléctrica entre cargas tiene mayor intensidad y cualquier medio material interpuesto produce una disminución de la misma. Por ello,

resulta habitual usar una permitividad relativa ϵ' del medio, igual al número de veces que es menor que la del vacío (es decir, $\epsilon' = \epsilon/\epsilon_0$) o, alternativamente, de una constante k' relativa, inversa de la anterior ($k' = k/k_0$). La tabla adjunta recoge los valores de esta segunda constante en varios medios.

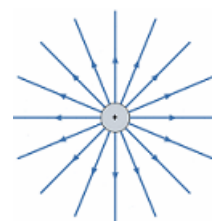
CONCEPTO DE CAMPO ELÉCTRICO

Para interpretar la acción a distancia ejercida por las cargas eléctricas, resulta de gran utilidad el concepto de campo, en este caso el campo eléctrico.



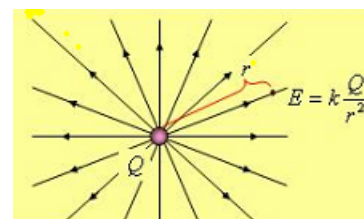
La animación adjunta, disponible en la Web del Departamento, reproduce el procedimiento que se ha de seguir para representar el campo eléctrico creado por una carga puntual Q . Colocamos en varios puntos alrededor de la carga, Q , otra carga, q (positiva), a la que llamamos carga testigo o carga de prueba. En cada lugar, la carga que crea el campo, Q , ejerce una determinada fuerza eléctrica, F_e sobre la carga testigo, q . Por definición, la intensidad del campo electrostático en cada punto, E , es igual al cociente entre la fuerza ejercida sobre la carga testigo colocada ahí y el valor de dicha carga de prueba ($E=F_e/q$; $F_e=qE$). En consecuencia, el campo, E , se representa dibujando un vector con la misma orientación que tiene la fuerza que sufre la carga testigo y con una longitud proporcional al valor de su intensidad, E .

Siguiendo este procedimiento llenamos el espacio circundante a la carga Q de vectores que indican el campo que produce y la totalidad de tales vectores representa al campo electrostático en esa región. Las líneas de fuerza se trazan dibujando líneas tangentes a dichos vectores. La representación obtenida muestra que el campo producido por una carga puntual es radial. Es decir, sus líneas son abiertas y forman un haz centrado en la carga que lo crea. Si dicha carga es positiva, las líneas "nacen" de ella y se dirigen hacia el infinito. Si la carga productora del campo es negativa, las líneas vienen desde el infinito para "morir" en ella.



Para obtener la expresión que calcula el campo eléctrico en cada punto alrededor de la carga, Q , reiteramos el procedimiento de colocar ahí la carga de prueba, q , y luego dividir la fuerza que sufre dicha carga de prueba, entre la propia carga, q . Se obtiene que el campo eléctrico producido por una carga puntual, Q , a una cierta distancia, r , es:

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



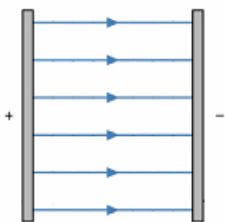
El campo eléctrico puede ser creado por varias cargas. Entonces, el vector que representa al campo resultante en cada punto se obtiene sumando los vectores-campo que produce cada uno de ellos.



Otra La animación del Departamento aplica este concepto para reproducir el procedimiento seguido en la representación del campo eléctrico generado por un sistema formado por dos cargas fijas. Antes de manipularla recomendamos resolver el problema usando lápiz y papel. Se han de considerar los tres casos posibles de las cargas que producen el campo: ambas positivas, ambas negativas o una carga de cada signo.

El dibujo de las líneas del campo proporciona información cualitativa de cómo es la intensidad del campo, **E**, en cada lugar: Es más intenso en las regiones donde se aprietan las líneas de fuerza y más débil donde las líneas de fuerza quedan más separadas. En consecuencia, la intensidad del campo se relaciona con la densidad de las líneas de fuerza que lo representan.

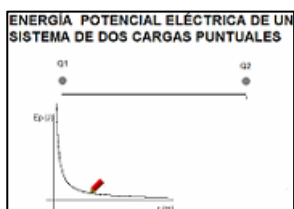
Para muchas aplicaciones prácticas, en lugar de campos radiales interesa disponer de campos eléctricos uniformes y, a ser posible, de intensidad controlable. Un dispositivo capaz de conseguirlo es el condensador plano. Consta de dos placas metálicas rectangulares, enfrentadas, y cargadas con la misma carga de signo opuesto. En el espacio interior entre ambas placas, las líneas del campo eléctrico resultan prácticamente paralelas, indicando que el campo eléctrico es uniforme ahí. Además, su intensidad se puede controlar modificando el valor de la carga que almacenan las placas, su superficie o la distancia entre ellas.



Además de los dos casos típicos considerados aquí (campo radial y campo uniforme), cabe considerar otras muchas distribuciones de carga, que pueden producir campos eléctricos con líneas de fuerza de geometría diversa (por ejemplo, un hilo o, más en general, un conductor con forma cilíndrica, una superficie conductora esférica, etc.). Quienes estén interesados, pueden descargar el documento disponible en la Web, donde se resuelven éstos y otros ejemplos y se aportan conceptos útiles para ello (el concepto de flujo del campo eléctrico y el teorema de Gauss)

ENERGÍA Y POTENCIAL ELÉCTRICOS

Para completar la caracterización del campo eléctrico, se requiere evaluar la energía asociada al mismo. Asociado a ella, a su vez, se introduce un concepto de mucha utilidad: el potencial eléctrico.



La animación adjunta, disponible en la Web del Departamento, evalúa y representa punto a punto la energía potencial eléctrica almacenada por el sistema electrostático más sencillo, formado por dos cargas puntuales. Se consideran los dos casos posibles: 1) Las cargas tienen el mismo signo. En este caso la energía eléctrica del sistema es positiva, porque, para mantenerlo, es necesario aplicar una fuerza externa que contrarreste a la fuerza de repulsión eléctrica que se ejercen las cargas. Si se deja al sistema evolucionar libremente, dicha fuerza de repulsión eléctrica hará que las cargas se vayan separando y aumente su energía cinética a medida que disminuye la energía potencial eléctrica. 2) Una carga tiene signo positivo y la otra tiene signo negativo. En este caso la energía eléctrica del sistema es negativa. Para mantenerlo se precisa aplicar una fuerza externa que contrarreste a la fuerza de atracción que se ejercen las cargas. En ambos casos, el nivel de energía cero se tendría si las cargas estuvieran infinitamente separadas.

En otro documento, disponible en la página Web, se deduce la expresión que calcula la energía potencial eléctrica de un sistema de dos cargas, teniendo en cuenta estas consideraciones:

$$E_p = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r}$$

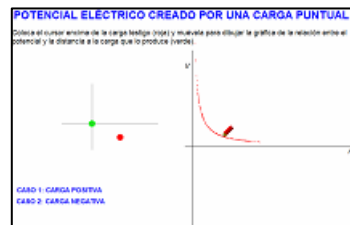
Del mismo modo que se introduce el concepto de campo eléctrico para sustituir, o mejor, complementar, la interpretación de las fuerzas eléctricas entre cada dos cargas, por la idea de una perturbación que produce en el espacio circundante cada carga, conviene introducir el concepto de **potencial eléctrico**, para caracterizar, en relación con la energía

potencial eléctrica de un sistema, cada punto del espacio que es perturbado por cada carga. De acuerdo con esto, el procedimiento seguido para obtener el valor de esta magnitud en cualquier punto alrededor de una carga, Q , comienza también colocando ahí una pequeña carga de prueba o carga testigo, q . Seguidamente se ha de dividir la energía potencial del sistema obtenido (formado por ambas cargas, Q y q) entre la carga testigo, q .

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

De acuerdo con esto, el potencial eléctrico creado por una carga Q , a una cierta distancia, r , es:

A diferencia del campo, el potencial eléctrico es una magnitud escalar. A semejanza de él tiene un determinado valor en cada punto del espacio circundante a la carga que lo produce. Otra animación del Departamento representa la variación de este valor en función de la distancia a la carga.



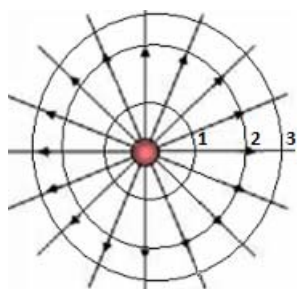
RELACIÓN ENTRE CAMPO Y POTENCIAL

Después de ver el campo, E , y el potencial, V , son dos formas distintas de caracterizar el campo eléctrico, interesa fijarse en la relación entre ambos conceptos. Limitando el análisis a una sola componente espacial, x , la ley matemática que expresa dicha relación es:

$$E_x = - \frac{dV}{dx}$$

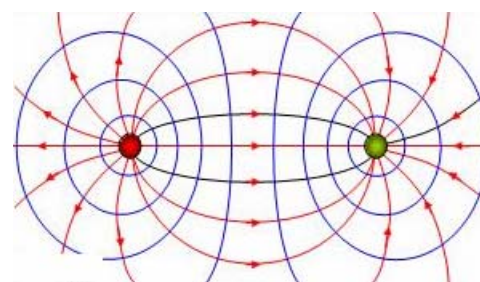
Expresa que la magnitud de la componente del campo eléctrico en la dirección adoptada, x , equivale al ritmo de variación del potencial eléctrico con la distancia. El signo menos indica que la orientación del campo es la que coincide con el sentido hacia el que el potencial decrece.

En la figura de la izquierda se visualiza esta relación en el caso del campo creado por una carga puntual de signo positivo.

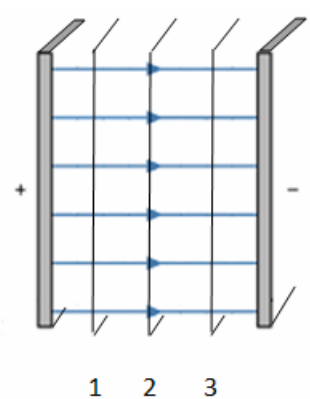


En este caso, las líneas de fuerza del campo eléctrico forman un haz que emerge de la carga en todas las direcciones y se dirige hacia el exterior. Junto con ellas, se han dibujado también tres superficies esféricas (1, 2 y 3) con centro en la carga. Son **superficies equipotenciales**, ya que, como el valor del potencial eléctrico depende únicamente de la carga y de la distancia, en todos los puntos que pertenecen a cada una de estas superficies, el potencial tiene un valor constante. El dibujo completo muestra que, tal como predice la relación escrita un poco más arriba, las líneas del campo eléctrico atraviesan a dichas superficies equipotenciales perpendicularmente y se dirigen desde donde el potencial es mayor (superficie 1) hacia donde es menor (superficie 3).

Este tipo de representación que dibuja las líneas de fuerza del campo y superficies equipotenciales es muy instructivo, porque, después de calcular el potencial en cada punto circundante a cualquier distribución de carga, ayuda a prever la dirección y el sentido de las líneas de fuerza del campo, y viceversa. Como ejemplo, a la se muestran derecha las líneas del campo eléctrico (en color rojo) y las superficies equipotenciales (en azul) del sistema formado por



dos cargas puntuales de signos opuestos (la positiva representada de color rojo y la negativa de color verde).



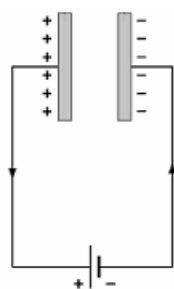
Un caso de especial interés es el del condensador plano. Entre sus placas el campo eléctrico es prácticamente uniforme y por eso sus líneas de fuerza son casi paralelas. Dichas líneas se dirigen desde la zona donde el potencial es mayor (la placa con carga positiva) hacia donde es menor (la placa con carga negativa). A su camino atraviesan las superficies equipotenciales, en este caso planos paralelos a las placas, siendo mayor el potencial cuanto más cerca se esté de la placa positiva (superficie 1) y menor cuanto más cerca se esté de la negativa (superficie 3).

En este caso especial, la intensidad del campo eléctrico uniforme existente entre las placas y la tensión, V , o diferencia de potencial entre ellas, se relacionan mediante la sencilla expresión:

$$E = \frac{V}{d}$$

CARGA Y DESCARGA DEL CONDENSADOR

Después de haber visto que el condensador plano es un dispositivo útil para producir un campo eléctrico uniforme, nos interesamos por los procesos de carga y descarga del mismo.



La fotografía más a la izquierda muestra un montaje de laboratorio que carga un condensador plano de placas cilíndricas y el dibujo adyacente muestra un diagrama del circuito de carga. Al conectar el generador se establece una diferencia de potencial eléctrico entre las placas y el campo eléctrico por el cable hace fluir electrones en el sentido que indican las flechas en el diagrama, es decir, desde la placa situada a la izquierda (quedará con carga positiva), hacia la placa situada a la derecha (quedará con carga negativa). Aunque los electrones no pueden atravesar el hueco entre las placas del condensador, durante periodo de tiempo que dura el proceso de carga, hay una corriente eléctrica en el circuito, si bien de intensidad cada vez menor. Hay que tener en cuenta que durante el proceso, la carga fluye cada vez con mayor dificultad debido a que la fuerza de repulsión de los electrones acumulados en la placa negativa sobre los que se van incorporando aumenta paulatinamente y también a que cada vez va siendo mayor la dificultad de extraer electrones de la placa positiva.

El proceso alcanza su límite cuando las placas no pueden almacenar más carga y se define la magnitud *capacidad*, $C = Q/V$ (Q es la carga almacenada; V es la tensión aplicada entre las placas) para dar cuenta justamente de la capacidad

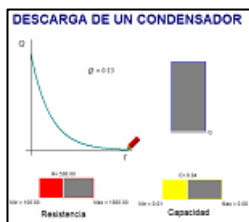
máxima de almacenamiento de carga del condensador. Esta propiedad del condensador y la resistencia del cable, influyen en el tiempo que necesita el condensador para cargarse (se requiere más tiempo cuanto mayor sea cada uno de estos factores). Estos conceptos se pueden reforzar usando una animación del Departamento, que representa la evolución de la carga de un condensador a lo largo de este proceso y permite al usuario modificar los factores influyentes.



Una vez alcanzado el límite de carga que puede almacenar el condensador, la corriente deja de fluir aunque el generador se mantenga conectado. La carga acumulada queda disponible en el condensador y no se pierde después de desconectarlo, debido a que el aire es un buen aislante. No obstante, se puede reforzar aún más el aislamiento utilizando otros materiales, como por ejemplo, algunas resinas sintéticas.

El condensador cargado tiene muchas utilidades. Como veremos, se puede usar el campo eléctrico que existe entre sus placas para afectar a movimientos de haces de partículas cargadas. Si el condensador se deja inalterado, dicho campo es uniforme. Y, si se conecta a una corriente alterna u oscilante, las dos placas se están cargando continuamente alternándose en cada una la carga positiva y la negativa. Entonces, el campo eléctrico entre ellas también oscila cambiando de orientación con la misma frecuencia del alternador.

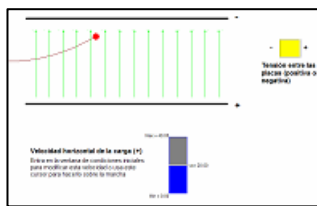
Otra utilidad del condensador se obtiene cuando se conectan entre sí por el exterior sus dos placas a través de un cable



conductor. Entonces, la diferencia de potencial entre los extremos de dicho cable produce un campo eléctrico que hace fluir a los electrones en exceso de la placa con carga negativa hacia la placa con carga positiva. Así se produce la descarga del condensador. En el momento inicial, la carga almacenada es máxima y la tensión también, de modo que la intensidad de corriente de descarga también es máxima. Poco a poco, dicha corriente va decayendo y finalmente se anula cuando las placas quedan neutras. Como en el proceso de carga, aquí también influye la resistencia del cable y la capacidad del condensador. Otra animación del Departamento representa el proceso de descarga de un condensador.

MOVIMIENTOS DE CARGAS EN CAMPOS ELÉCTRICOS

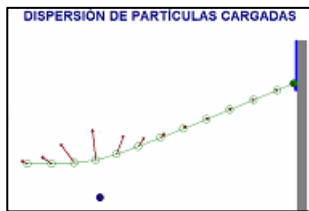
El estudio de movimientos de haces de partículas cargadas (por ejemplo, haces de electrones, protones, etc.) en campos eléctricos se rige básicamente por la aplicación de las leyes de la mecánica a tales partículas, después de conocer la fuerza eléctrica que el campo ejerce sobre ellas. En el caso más sencillo, dicho campo puede ser uniforme.



Una animación del Departamento muestra el movimiento de un electrón que penetra entre las placas de un condensador cargado. Como el campo eléctrico es uniforme, ejerce una fuerza constante sobre el electrón y le produce una aceleración también constante y perpendicular a la velocidad inicial del electrón. La situación es así análoga a la de un tiro horizontal y la solución del problema también es similar, puesto que se puede tratar el movimiento considerando su descomposición en un movimiento horizontal uniforme y un movimiento vertical de aceleración constante (producida por el campo). La trayectoria resultante es parabólica. A partir de esta situación, la animación admite que se alterne sobre la marcha el signo de las placas, para modificar la trayectoria del electrón.

En general, los campos eléctricos que pueden afectar al movimiento de partículas cargadas no serán uniformes, sino más complicados (por ejemplo, radiales, oscilantes, etc.). Un caso interesante y sencillo, donde el campo es radial, son los procesos de dispersión de partículas subatómicas de carga positiva (protones, partículas α) por núcleos atómicos también positivos. En este caso, la fuerza ejercida por el núcleo sobre el proyectil de carga positiva es de repulsión y se calcula sencillamente aplicando la ley de Coulomb a ambos (el núcleo y el proyectil). No obstante, se ha de tener en consideración que dicha fuerza varía a lo largo del movimiento del proyectil, ya que su valor depende de la distancia entre él y el núcleo.

Para practicar esta situación se puede utilizar una animación que permite modificar la posición inicial desde dónde se



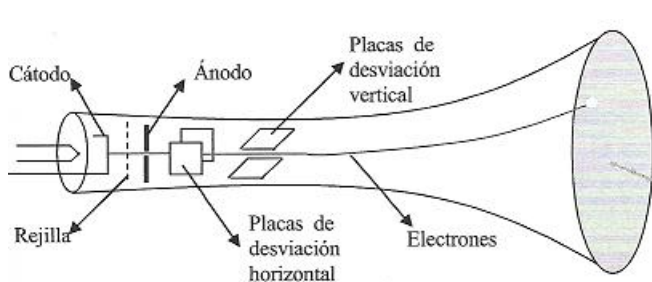
lanza el proyectil y dibuja la trayectoria consecuente de éste. También representa a lo largo del movimiento la fuerza de repulsión que el núcleo ejerce sobre el proyectil. Los estudios sobre dispersión de partículas cargadas tienen enorme relevancia en el conocimiento de la estructura interna de la materia. Las observaciones pioneras de Geiger y Mardsen sobre la dispersión de partículas α por los átomos de una fina lámina de oro, dieron la pista a Rutherford para establecer el primer modelo atómico nuclear. Desde entonces, los experimentos de dispersión de partículas cargadas contribuyen a conocer detalles y conceptos asociados a la estructura atómico-molecular.

APLICACIONES

I. Tubo de rayos catódicos

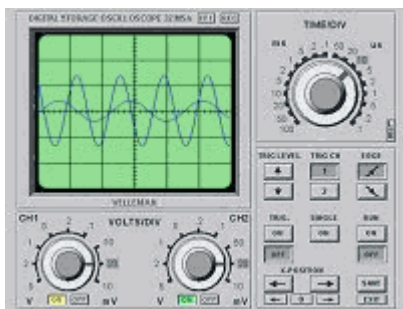
El tubo de rayos catódicos es un dispositivo de visualización que inventó Crookes (1832-1919) en 1875. Se ha venido empleando en monitores, televisores y osciloscopios, aunque en la actualidad se está sustituyendo paulatinamente por las nuevas tecnologías de proyección de imágenes (plasma, LCD, LED).

El descubrimiento de los rayos catódicos se produjo durante 1858 y 1859 por Plücker (1801-1868), que denominó así a rayos que emanaban de una lámpara de vacío. Posteriormente, en 1897, Thomson (1856-1940) determinó la relación entre la carga y la masa de los rayos catódicos, midiendo cuánto se desvían por un campo eléctrico y la cantidad de energía que llevan. Como se explica en el tema dedicado a la Estructura atómica, Thomson dedujo el carácter corpuscular de los rayos y su naturaleza eléctrica negativa. Además obtuvo la relación entre su carga y su masa. Esta relación mostraba que las partículas que componían los rayos catódicos tenían que ser muy livianas. Poco después, se las bautizó con el nombre de electrones, y en 1913 Millikan (1868-1953) obtuvo por separado el valor de su carga eléctrica y de su masa con el experimento de la gota de aceite.



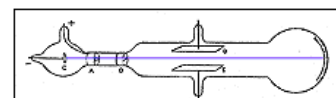
A la izquierda se muestra un esquema de un tubo de rayos catódicos. Mediante emisión termoiónica una placa metálica caliente o cátodo emite electrones, que son acelerados por la acción del campo eléctrico existente entre esa placa o cátodo (de carga negativa) y otra placa o ánodo (de carga positiva). El conjunto conforma un cañón de electrones y se obtiene un haz fino después de que éstos pasan por una ranura del ánodo. A partir de ahí los electrones entran en el tubo propiamente dicho y se les aplica, mediante sendos condensadores, un campo eléctrico vertical y otro campo eléctrico horizontal. Finalmente, el haz de electrones incide sobre una pantalla fluorescente, donde produce un destello de una intensidad que depende de la del propio haz.

Cada uno de los campos eléctricos aplicados, por ser perpendicular a la velocidad inicial de los electrones, produce una desviación del haz. En consecuencia, variando la intensidad de estos campos adecuadamente se puede conseguir la desviación que se desee, tanto vertical como horizontal. De este modo, se consigue que el haz pueda incidir a lo largo de la pantalla y proporcione a la misma, puntos de intensidad luminosa variable.



En el caso de un osciloscopio, la intensidad del haz se mantiene constante, y la imagen dibujada reproduce el camino que recorre el haz. Normalmente, la desviación horizontal se hace proporcional al tiempo, y la desviación vertical es proporcional a la señal. Modificando esta señal vertical, se puede visualizar la evolución en el tiempo de funciones diversas. Modificando ambas señales, se pueden visualizar composiciones de señales o de movimientos perpendiculares, para obtener, por ejemplo, las figuras de Lissajous, resultado de la composición de dos movimientos oscilatorios.

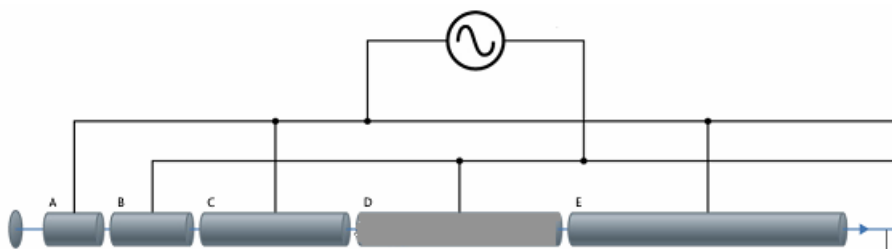
En el caso de un monitor de televisión o en el de un ordenador, el haz electrónico barre toda la pantalla durante una fracción muy breve de tiempo, produciendo la sensación visual de una imagen.



II. Acelerador lineal de partículas

Un acelerador lineal de partículas es un dispositivo que consigue que un haz de partículas cargadas adquiera una gran energía cinética. Ello resulta de gran utilidad, porque los haces de partículas de gran velocidad se utilizan para investigar la estructura subatómica de la materia. Estas investigaciones precisan de experimentos en los que dichos haces inciden sobre determinados materiales. Las partículas aceleradas colisionan con otras partículas y se generan nuevas partículas que son objeto de estudio.

El fundamento de los aceleradores más básicos es el mismo que el del cañón de electrones que hay en un extremo del tubo de rayos catódicos. Es decir, consiste en un tubo más o menos largo en el que se hace el vacío para que las partículas aceleradas se puedan desplazar sin encontrar obstáculos. Las partículas son aceleradas mediante la aplicación de un campo eléctrico que se produce entre dos o más placas cargadas paralelas.



Los aceleradores de altas energías, más sofisticados, se pueden esquematizar mediante el dibujo adjunto. El haz de partículas cargadas, va pasando sucesivamente por el interior de tubos metálicos de longitud creciente, A, B, C, D,

E,..., que están conectados a una tensión alterna. Para entender cómo funciona el sistema suponemos que se quiere acelerar un haz de partículas de carga positiva. Entonces, cuando se emite el haz, el primer tubo A tiene carga negativa y lo atrae produciéndole una aceleración antes de que el haz penetre en el tubo. Cuando el haz viaja por el interior del tubo, lo hace pasando justo por su eje. El tubo lo atrae con la misma fuerza eléctrica en todas las direcciones y, por tanto, no se modifica la trayectoria del haz. Justamente cuando dicho haz llega al punto medio del tubo A cambia el sentido de la corriente que alimenta todos los tubos lo que provoca que el tubo A, que tenía carga negativa, tenga carga positiva, el tubo B pase a tener carga negativa, el C positiva, etc. De esta manera, cuando el haz sale del tubo A, es repelido por él y atraído por el tubo B, lo que implica que el haz es acelerado en su trayecto de A hacia B. El mismo proceso se repite en cada etapa, es decir, cuando el haz llega a la mitad del tubo B, vuelve a cambiar de sentido de la corriente. B pasa a tener carga positiva, y A y C vuelven a tener carga negativa. Así cuando el haz sale del tubo B, es

repelido por él y atraído por C, con lo que el haz vuelve a ser acelerado al pasar de B a C. Y así sucesivamente. Cada nuevo tubo tiene una longitud mayor que el anterior, porque la carga de los tubos cambia de signo a intervalos de tiempo iguales (determinados por la frecuencia de la corriente alterna que los carga) y en cada nueva etapa el haz viaja a mayor velocidad.



El acelerador lineal más largo del mundo es el colisionador Stanford Linear Accelerator (SLAC), ubicado al sur de San Francisco. Acelera electrones y positrones a lo largo de 2 millas de longitud (algo más de 3 km), hacia varios blancos, anillos y detectores ubicados en su finalización. Se construyó originalmente en 1962, y se ha ido ampliando y mejorando para seguir siendo uno de los centros de investigación de física de partículas más avanzados del mundo. Los experimentos realizados en el centro han ganado el premio Nobel en nueve ocasiones.

Los documentos, animaciones y referencias aludidas en este documento están en la página dedicada al Campo Eléctrico (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Campo-electrico\Electrico.htm>) dentro de la Web del Departamento de Física y Química del IES "Leonardo Da Vinci" de Alicante (<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/fisica.htm>)