

Instituto Politécnico

Universidad Nacional de Rosario Universidad Nacional de

Electrostática 4^o Año

Física

Masterización: RECURSOS PEDAGÓGICOS

Cód- 7405-19

Silvia Vettorel
Ignacio Tabares
Alicia Oliva



Dpto. de Física



Capítulo 3

Electrostática y Capacitores

1.1 Introducción

Durante estos años, en Física, nos hemos centrado en el estudio de la interacción gravitatoria asociada a la propiedad de la materia conocida como masa. Sin embargo otra de las interacciones fundamentales que existen en la naturaleza es “interacción eléctrica”, la cual está asociada a la propiedad de la materia conocida como “carga eléctrica”

La interacción eléctrica está presente en nuestras vidas mucho más de los que habitualmente se piensa y no sólo por la profusión de dispositivos tecnológicos que basan su funcionamiento en ella, ya que la interacción fundamental a escala humana resulta ser la interacción eléctrica.

Recordemos que las teorías físicas actuales reconocen cuatro tipos de fuerzas: las gravitacionales, las nucleares fuertes y débiles y las electromagnéticas. La primera tiene importancia en escala astronómica, las nucleares fuertes y débiles prevalecen en el núcleo del átomo y, por último, la electromagnética toma valores importantes a escala humana.

Las fuerzas que mantienen estable la estructura atómica y molecular son de origen eléctrico, es así como las fibras del papel que estás leyendo se mantienen cohesionadas eléctricamente y la solidez de los muebles que nos rodean se debe a las fuerzas eléctricas que unen las moléculas que los integran. Más aún la vida misma es posible por la acción de las fuerzas eléctricas ya que todos los procesos indispensables dependen de las fuerzas eléctricas y no tanto de las gravitatorias y nucleares. El oxígeno del aire que respiramos es incorporado a la sangre por la acción de fuerzas eléctricas, la transformación de los alimentos, la transmisión de los impulsos nerviosos, el funcionamiento de cada célula del cuerpo, incluso las cerebrales, y por lo tanto las sensaciones, las emociones la inteligencia, etc. dependen de la acción de las interacciones eléctricas.

1.2 Un poco de historia

Esta historia se inicia en tiempos remotos con el uso del ámbar, una resina fosilizada de conífera de color pardo amarillento, empleado en joyería durante miles de años. Probablemente al trabajarlo, los artesanos advirtieron que presentaba una extraordinaria cualidad: al ser frotado con un trozo de tela o de piel, atraía pequeños trozos de materia ligera tales como pelusas y trozos de cabellos, por ejemplo. La palabra griega para designar al ámbar es *elektron*, por lo que ya vemos el origen de un grupo de palabras muy familiares actualmente; electrón, electricidad, electrónica, electromedicina, etc.

Las investigaciones sobre este tema las retoma en el siglo XIV el médico inglés William Gilbert que publica en 1600 el libro, en latín como era costumbre de la época, *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*, que en castellano quiere decir, “Sobre los imanes los cuerpos magnéticos y el gran imán terrestre”. En él

resumía varios años de investigaciones sobre el magnetismo y la electricidad y allí aparecen por primera vez términos como *fuerza eléctrica*, *atracción eléctrica*, *polos de un imán* entre otros. Escribió además que la *electricidad* era un fluido que se encontraba contenido en el ámbar y otros materiales y que el frotamiento con un paño o una piel libera, un modelo actualmente desterrado.

A partir de estos trabajos iniciales de Gilbert otros investigadores continuaron avanzando en particular buscando y clasificando aquellos materiales que se pueden “electrizar” por frotamiento. Se hallaron combinaciones de vidrio, azufre, cuarzo, etc. Frotado entre sí y con telas de lana, seda, pieles de gato, de conejo, etc. Para realizar estos trabajos se diseñaron los primeros instrumentos, principalmente máquinas de frotamiento y los péndulos o el electrómetro de hojas.

En todos estos trabajos lo que se observó fue que cuando se electrizaba por contacto una pequeña lámina metálica suspendida en forma de péndulo se separaba violentamente de la barra y mantenía ese rechazo mientras no se descargaba eléctricamente. En 1733 el botánico francés Du Fay observó que cuando acercaba a un péndulo, previamente electrizado con una barra de vidrio, una barra de resina frotada en lugar de rechazar el péndulo era atraído por esta barra. Luego de repetidos experimentos concluyó que en la naturaleza existían dos tipos de electricidad la *vítrea* y la *resinosa*.

En 1743, en las colonias inglesas de América, Benjamin Franklin realiza experimentos con una máquina de frotamiento y observa que se puede cargar eléctricamente a dos personas que se encuentran aisladas y que si estas se tocan entre sí no se observa ningún fenómeno pero si tocan a un tercero que está en contacto con la tierra salta una chispa entre ellas. El análisis de estos experimentos lo llevaron a pensar que existe un único fluido eléctrico, contenido en todos los cuerpos, y que el efecto del frotamiento no hace más que quitar o agregar fluido por lo que decidió asignarle el signo más al agregado de electricidad y el menos al defecto. La elección del “+” y el “-” por parte de Franklin ha permanecido hasta el presente y es la razón por la que se le asigna el signo negativo a la carga del electrón.

Es interesante notar que durante los siguientes 150 años no se encontró ningún experimento que permitiera decidir si en la naturaleza existen una o dos electricidades, pero eso no impidió que las investigaciones sobre la electricidad continuaran avanzando sobre la base del modelo de fluido hasta tal punto que cuando el avance de la ciencia pudo explicar la estructura del átomo, hacia 1900, ya existía la iluminación eléctrica, los motores eléctricos, los telégrafos eléctricos y muchos otros dispositivos tecnológicos eléctricos que se diseñaron asentados en el modelo de fluido y sin resolver si había uno o dos de ellos.

Actualmente se conoce un poco mejor la estructura de la materia que en ese entonces, se sabe que la electricidad no es un fluido sino que es una interacción que se presenta entre partículas con carga eléctrica.



2. La carga está cuantificada y se conserva

El estudio de un fenómeno físico sugiere la elección de un modelo en el cual se apoyen las teorías desarrolladas y se comprueben mediante la experimentación. Adoptaremos entonces el modelo de átomo que ya conocemos: un núcleo central constituido por una cierta cantidad de protones y neutrones y un conjunto de electrones que se encuentran en orbitales exteriores al núcleo.

Los electrones poseen una masa muy pequeña y una carga eléctrica que, debido a la elección que hecha por Franklin hace más de 250 años, se les asigna un valor negativo y por otro lado los protones, con una masa 1840 veces mayor, que tienen un valor de carga eléctrica igual (al del electrón) pero de signo positivo. Un átomo estable tiene igual número de protones que de electrones y su carga neta es cero.

La cantidad de carga eléctrica que posee un electrón es la mínima posible¹ y se la denomina *carga elemental*. Debido a esto las partículas (conjunto de electrones y/o protones) pueden tener una cantidad de carga total igual a un múltiplo entero de la carga elemental según cuantos electrones y/o protones lo compongan. Es por eso que se dice que la carga eléctrica está *cuantizada* y por este motivo la carga eléctrica total de cualquier partícula será siempre un múltiplo entero de la carga del electrón.

Por otra parte la carga eléctrica es una propiedad intrínseca del protón o del electrón, y no es posible quitarle la carga eléctrica a ninguno de ellos y dejar sólo la masa, esto hace además que la carga eléctrica se conserve. Cuando se transfiere carga eléctrica de un cuerpo a otro lo que se hace es trasladar protones o electrones con su carga. Por eso a los protones o electrones se los llama **portadores** de carga eléctrica. Por ejemplo si tenemos un trozo de vidrio y un paño de lana ambos en equilibrio eléctrico (igual número de electrones que protones) y se frota el vidrio con el paño durante un tiempo breve hay una transferencia de electrones del vidrio al paño, y como el signo asignado a los electrones es negativo la carga neta del paño es negativa y la del vidrio positiva por el defecto de electrones ocurrido por el frotamiento. Este fenómeno sucede porque en el vidrio los electrones de los orbitales exteriores se pueden extraer con poco esfuerzo. Hay otros materiales con estructura atómica distinta en los que es más difícil extraer electrones.

Cuando se tiene un cuerpo cargado eléctricamente por exceso o por defecto de electrones y se encuentran con átomos a los que le faltan electrones o le sobran electrones que en general no están ligados a ningún átomo, ésta es una situación de desequilibrio por la que los cuerpos expulsan con relativa facilidad los electrones que le “sobran” y atraen de los alrededores los que les “faltan”.

Este proceso de atracción o rechazo de electrones se realiza por medio de fuerzas (llamada fuerza eléctrica) que son muy importantes y que en algunos casos cuando no encuentra electrones “libres” se produce la atracción de los electrones ligados a otro cuerpo.

¹ Un modelo de partícula más reciente que introduce el descubrimiento de los quarks (partículas elementales de la materia) explicita que la carga de estos puede llegar a ser un tercio de la carga elemental, es decir, los quarks tienen una carga menor a la carga elemental. De todos modos no se han podido observar libres en la naturaleza.

3. Materiales eléctricos

Una clasificación de los materiales en términos de su capacidad para conducir o transferir carga eléctrica. Así se distinguen los **conductores**: aquellos que permiten que la carga eléctrica se mueva con gran libertad, de los **aisladores**: aquellos donde la carga eléctrica se mueve con mucha dificultad, y los **semiconductores**: aquellos donde su capacidad de conducir carga es intermedia entre los dos primeros dependiendo fuertemente de las condiciones en los que éste se halle. Esta propiedad eléctrica que presenta la materia dependerá de la estructura atómica que posean dichos materiales.

En los conductores los electrones de valencia de los átomos (aquellos que se encuentran ubicados en sus orbitales externos o último nivel de energía) están débilmente ligados pudiendo librarse de los átomos y moverse por el conductor. Los conductores por excelencia son los metales como por ejemplo el cobre, la plata, el hierro entre otros.

Los metales tienen la característica de que los electrones de nivel superior de sus átomos están ligados al resto del átomo con fuerzas extremadamente débiles; tan débiles que las vibraciones hacen que algunos de estos electrones exteriores pasen de un átomo a otro al azar, no permaneciendo establemente en un mismo átomo. En las redes metálicas la proximidad de los núcleos atómicos es tal que el nivel de energía más externo de cada átomo es tan próximo al de los vecinos, que los electrones más externos no pertenecen establemente a cada átomo. Es lógico que la temperatura es un factor importante que puede influir en estos materiales, ya que al aumentar la temperatura podría incrementarse en gran medida la agitación térmica de los portadores impidiendo que estos sigan una trayectoria definida.

Los **aislantes o dieléctricos** también tienen estructuras cristalinas o amorfas como los metales; pero el enlace entre sus átomos es de otra naturaleza, de manera que las distancias intermoleculares son mayores que en los metales y los electrones de la capa externa de estas estructuras se encuentran ligados a sus respectivos núcleos por fuerzas importantes, en consecuencia, no se mueven libremente dentro de la materia.

Los **semiconductores** tienen el mismo tipo de estructura que los aislantes pero los electrones de la capa externa en estos materiales se encuentran ligados a fuerzas intermedias (es decir no tan débiles como en un conductor, ni tan fuertes como en un aislador). Esto hace que se comporte como aisladores o conductores según sean ciertas condiciones externas, que aumentan o disminuyan, respectivamente, la magnitud de las fuerzas antes mencionadas, como por ejemplo: temperatura, luz o bien campos eléctricos aplicados. Estas propiedades en el comportamiento de un semiconductor ha permitido su uso en dispositivos electrónicos. El silicio y el germanio son los ejemplos más conocidos de semiconductores.

Es simple explicar estas propiedades que presentan los materiales desde la Teoría de Bandas. Existen, según esta teoría, tres tipos de bandas electrónicas: una llamada banda de valencia, una banda prohibida y una banda llamada de conducción.

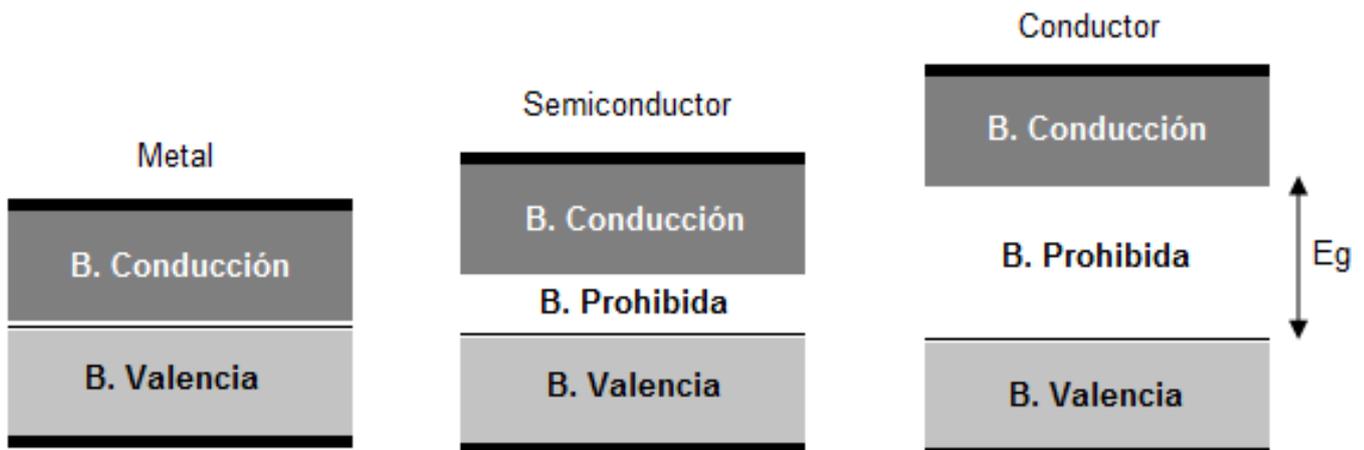
La primera está representada por el nivel energético más alto que alcanza un material en ausencia de excitación externa (incluyendo los fenómenos térmicos). En esta banda se mueven los electrones de valencia, que son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica.



La tercera banda está ocupada por los electrones libres, es decir, aquellos que se han desligado de sus átomos y pueden moverse libremente en el material y cuando los electrones se encuentran en esta banda pueden transportar carga eléctrica.

La ubicación de estas dos bandas dependerá del material en estudio.

Un electrón puede pertenecer a la banda de valencia o a la banda de conducción, pero para poder migrar desde una a la otra, debe atravesar la llamada banda prohibida, en la que no pueden existir electrones.



La energía necesaria para que un electrón ubicado en la banda de valencia, salte a la banda de conducción, y el material conduzca carga eléctrica, se denomina Energía de la Banda Prohibida y la notamos como E_g .

La cantidad de energía necesaria para lograr la conducción eléctrica en los materiales define a los mismos como conductores, aisladores y semiconductores como lo hemos definido oportunamente.

Por ejemplo, mientras que un metal tiene un valor de $E_g=0J$, un semiconductor basado en Silicio presenta un valor aproximado de $E_g=1.9 \times 10^{-19}J$ y un aislador, como el diamante, tiene un valor 5,5 veces el valor de ese semiconductor.

La cantidad de energía para que se produzca el salto de los electrones desde una banda hacia otra podrá ser transferida mediante la elevación de la temperatura del material, por una fuente o batería o por radiación lumínica.

4. Carga y descarga de los cuerpos

El comportamiento de los cuerpos frente a las cargas eléctricas varía si se trata de conductores o dieléctricos. En el caso de los conductores imaginemos que a un cuerpo metálico se le agregan algunos electrones, como estos por una parte se repelen entre sí, recordemos que cargas de igual signo se rechazan, y por otra parte tienen movilidad

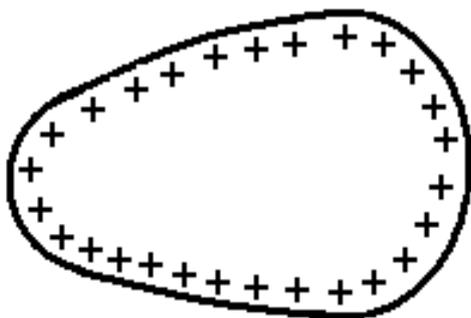


Fig.1 Cuerpo conductor cargado con cargas positivas. Como estas se rechazan se distribuyen en la periferia

se van a distribuir por el cuerpo tratando de alejarse y separarse lo más posible unos de otros. Como consecuencia de ello después de un tiempo muy breve las cargas estarán distribuidas sobre la superficie del cuerpo. No ocurre lo mismo con los dieléctricos, cuando se le incorporan cargas a uno de ellos, necesariamente quedan en el lugar donde se las aplicó. Pero aún hay más, si un operador de laboratorio frota una barra metálica y la acerca a la esfera no conductora de un péndulo, no se observa ninguna atracción. La barra metálica se cargó con el frotamiento, pero como es conductora, las cargas producidas van a tierra a través del cuerpo del operador que la sostiene. Si el metal está sostenido con un mango aislador, las cargas no pueden irse y la barra queda electrizada pero tampoco es observable la atracción ya que en la mayoría de los cuerpos metálicos las cargas que pueden transferirse por frotamiento son muy pocas para que se puedan apreciar sus efectos luego que se distribuyen.

En los aisladores ocurre lo contrario, si se frota una zona de una barra de material aislante, las cargas producidas permanecen en esa zona, el ejemplo clásico, es lo que ocurre cuando se frota una regla de plástico.

4.1 Conexión a tierra

Cuando un conductor cargado se conecta a tierra por medio de un alambre o tubo de conducción las cargas se redistribuyen entre el conductor y todo el planeta Tierra, esto hace que sobre el conductor que tenemos en el laboratorio queden muy pocas cargas, a los efectos prácticos el cuerpo se ha descargado. Nuevamente, las cargas no desaparecieron, se distribuyeron sobre todo el planeta por lo su efecto no es apreciable. La tierra puede considerarse entonces un sumidero infinito al cuál los electrones pueden

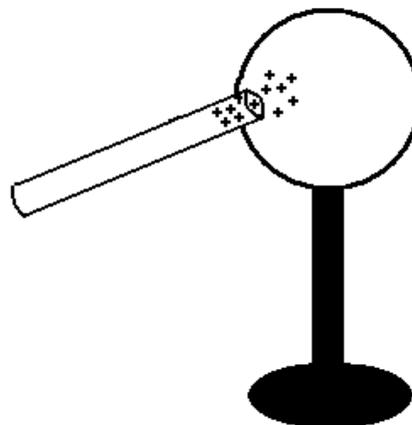


Fig. 2 Dieléctrico con cargas. Las mismas quedan en el lugar donde se las aplicó.

migrar fácilmente. Del mismo modo, si un cuerpo está cargado positivamente, la tierra le provee todos los electrones necesarios para que restablezca el equilibrio sin que se vea afectada. Con esto en mente, podemos entender como cargar un conductor por medio de un proceso conocido como inducción.

4.2 Carga por inducción

Para entender la inducción, consideremos una barra de plástico con cargas negativas que se acerca a una esfera conductora neutra (descargada) aislada de tierra. Las cargas negativas de la barra cargada rechazan los electrones libres de la esfera conductora por lo que los átomos de la esfera que se encuentran próximos a la barra quedan, por defecto de electrones, cargados positivamente y la semiesfera más alejada de la barra queda cargada negativamente. Todo esto ocurre en la superficie de la esfera ya que recordemos que por ser conductora no hay electrones libres en su interior. Fig. 3a

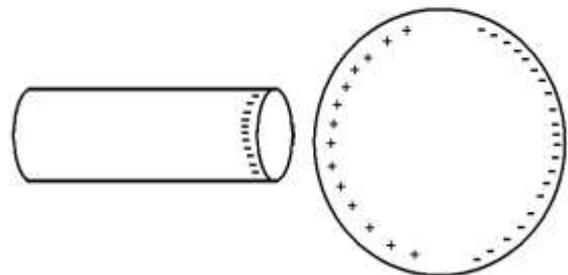


Fig. 3a Barra cargada que se acerca a un cuerpo conductor produciendo una redistribución de cargas sobre su superficie.

Si se realiza el mismo experimento con un alambre conductor conectado desde la semiesfera negativa a tierra, o lo que es lo mismo se pone a tierra el extremo negativo una vez que se distribuyeron las cargas las cargas negativas y conecta a tierra, las cargas negativas repelidas por la presencia de la barra salen de la esfera mientras la región con déficit de electrones queda cargada positivamente (Fig. 3b).

Si posteriormente se quita la puesta a tierra y se aleja la barra cargada negativamente la esfera queda con una carga positiva. Es importante insistir que en la electrización por contacto el material se carga con parte del exceso de cargas de la barra proveedora y en consecuencia se carga con su mismo signo; por el contrario cuando se carga por inducción queda con distinto signo que la barra inductora, que nunca está en contacto con el cuerpo y no pierde cargas.

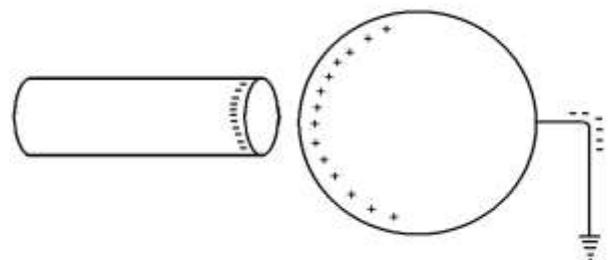


Fig 3 b Cuando se pone a tierra el extremo del opuesto del cuerpo conductor las cargas negativas van a tierra dejando el cuerpo cargado sin contacto con la barra.

4.3 Polarización

En el caso de los dieléctricos el fenómeno es diferente, en cada átomo los electrones están fuertemente ligados al núcleo en consecuencia en condiciones normales el centro de carga positiva coincide con el centro de carga negativa, en presencia de un objeto cargado, esos centros pueden desplazarse ligeramente, lo que produce más carga

positiva en un lado del átomo o de la molécula que del otro. Este efecto es conocido como **polarización**.

En algunos materiales ocurre que las moléculas que la integran no son simétricas, la del agua es un ejemplo, por tal motivo tienen polarización permanente. Esta polarización no es apreciable en condiciones normales porque las moléculas están orientadas al azar, pero en presencia de un objeto cargado las moléculas se orientan y el efecto final que se aprecie es una acumulación de cargas de un signo en una cara del cuerpo y del signo opuesto en la otra cara lo que produce una carga inducida sobre la superficie del aislador, como se muestra en la figura 4. Como los electrones siguen vinculados al núcleo en todos estos casos el conectar un extremo a tierra no produce ningún efecto.

Esta configuración se mantiene mientras no se aleje la barra cargada ya que cuando esto ocurre las moléculas vuelven a orientarse al azar y el sistema retoma su situación inicial.

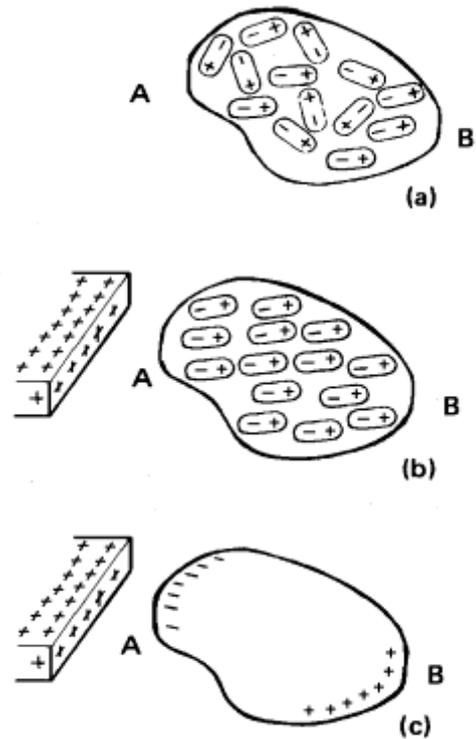


Fig. 4 Material dieléctrico constituido por moléculas polares orientadas al azar (a), cuando se aproxima una barra cargada las moléculas tienen una pequeña reorientación (b), en esas condiciones los extremos del signo material quedan cargados con cargas de distinto. Cuando se aleja la barra el sistema retoma la configuración original.



5. Ley de Coulomb

En 1785, Charles Coulomb (1736-1806) estableció la ley fundamental que establece la fuerza eléctrica de interacción entre dos partículas cargadas en reposo. Experimentalmente encontró que la fuerza eléctrica tiene las siguientes propiedades:

- La fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la separación entre las dos partículas, denotado con la letra r , y está dirigida a lo largo de la línea que las une.
- La fuerza es proporcional al producto de las cargas q_1 y q_2 de las partículas.
- La fuerza atrae las partículas si las cargas son de signo opuesto y las rechaza si las cargas tienen el mismo signo.

A partir de estas observaciones, Coulomb pudo expresar la magnitud de la fuerza eléctrica entre dos cargas puntuales como:

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

dónde k es una constante conocida como constante de Coulomb o constante eléctrica del vacío, cuyo valor depende de las unidades elegidas y del medio en el que se encuentran sumergidas las cargas. Además, usaremos el término carga puntual para referirnos a una partícula de tamaño despreciable que posee carga eléctrica.

En el Sistema Internacional la unidad correspondiente a la carga eléctrica es el *coulomb* (C). Es decir:

$$[q] = C \text{ (Coulomb)}$$

Adoptando el Sistema Internacional para la representación de ésta nueva magnitud la constante eléctrica del vacío tiene un valor de:

$$k = 8.98 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$$

Cuyo valor se puede aproximar para la resolución de problemas en

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

Suele escribirse la constante k , por razones prácticas de ordenamiento de unidades y por su relación con otros tipos de leyes (como la Ley de Gauss), como:

$$k = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}$$

Donde la constante ϵ_0 se conoce como *permitividad² del vacío* y tiene el valor:

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$$

Siguiendo con nuestro modelo electrostático, la unidad más pequeña de carga (denotada por **e**) es la del electrón (-e) o la de un protón (+e) con una magnitud:

$$|e| = 1.6 \times 10^{-19} C$$

Por lo tanto, 1C de carga es igual a la carga de $6,3 \cdot 10^{18}$ electrones. Este número puede compararse con el número de electrones libres en 1 cm^3 de cobre, el cual es del orden de 10^{23} . Vale notar que 1 C es una cantidad de carga muy grande. En los experimentos electrostáticos ordinarios, donde una barra de caucho o vidrio se carga por fricción, se obtiene una carga neta del orden del 10^{-6} . En otras palabras, sólo una fracción muy pequeña de la carga total disponible se transfiere entre la barra y el material de frotamiento.

La siguiente tabla muestra los valores de carga eléctrica y masa para las partículas constitutivas de un átomo:

Partícula	Símbolo	Carga	Masa [kg]
Protón	P	+e	$1,67261 \cdot 10^{-27}$
Neutrón	N	0	$1,67261 \cdot 10^{-27}$
Electrón	E	-e	$9,10956 \cdot 10^{-31}$

Si bien ya conocemos el módulo de la fuerza eléctrica que existe entre dos partículas cargadas, ahora es necesario expresar la dirección y sentido de la misma ya que las fuerzas son magnitudes vectoriales. Recordando la experimentación que hizo Coulomb, él descubrió que ésta fuerza actuaba a lo largo de la línea que une ambas cargas, por lo que la expresión de la fuerza eléctrica resulta ser:

$$\vec{F}_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

Dónde \hat{r} es un vector unitario o versor, dirigido de q_1 a q_2 , como muestra las siguientes figuras:

² La permitividad mide de alguna forma la tendencia que tiene un material a polarizarse por la acción de un campo eléctrico. Es definitiva se refiere a una medida de cuanto el material “permite” polarizarse.

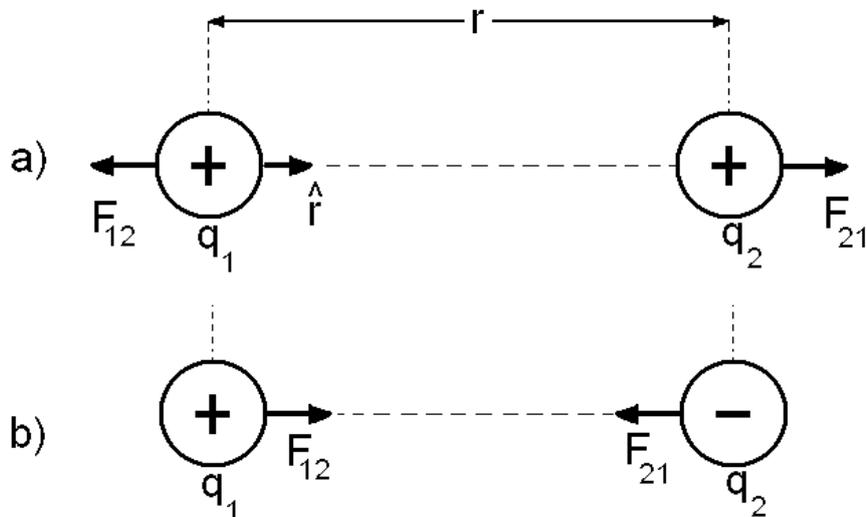


Fig. 5. Fuerzas de interacción para el caso de cargas de igual y de distinto signo.

Puesto que la ley de Coulomb obedece a la tercera Ley de Newton o principio de acción y reacción, la fuerza eléctrica ejercida sobre q_1 por q_2 es igual en magnitud a la fuerza ejercida sobre q_2 por q_1 y en la dirección opuesta, es decir:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

Por último, de acuerdo con la ecuación anterior, vemos que si q_1 y q_2 tienen el mismo signo, el producto q_1q_2 es positivo y la fuerza es repulsiva, como se ve en la figura a. Si q_1 y q_2 son de signo opuesto, como en la figura b, el producto q_1q_2 es negativo y la fuerza es atractiva.

5.1 Principio de Superposición

Muchas veces ocurre que hay más de dos cargas presentes y es necesario conocer la fuerza eléctrica neta sobre una de ellas. Si bien cuando están presentes dos cargas la fuerza entre ellas está dada por la Ley de Coulomb, cuando se tienen varias, la fuerza resultante sobre cualquiera de ellas es igual a la suma vectorial de las fuerzas ejercidas por las demás cargas individuales presentes. Por ejemplo si hay cuatro cargas, entonces la fuerza resultante sobre la carga 1 debido a las cargas 2, 3 y 4, es la suma vectorial dada por:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14}$$

Este es el principio de superposición aplicado a fuerzas electrostáticas y nos indica que la acción de cada carga es independiente de la presencia de las demás.

5. El Modelo de Campo

Cuando se estudiaron las Leyes de Newton para explicar el movimiento de los cuerpos, pudimos observar que algunas fuerzas estaban aplicadas directamente sobre los mismos, es decir, estas fuerzas existen siempre y cuando los cuerpos estén en contacto; y es por esto que a éstas fuerzas se les da el nombre de **fuerzas de contacto**. En cambio existe otro tipo de fuerzas, como la fuerza peso, que la ejerce la Tierra sobre todos los cuerpos que se encuentran en sus proximidades, aunque no estén en contacto, y se las llaman **fuerzas de acción a distancia**.

Las fuerzas eléctricas y magnéticas, así como la fuerza gravitatoria, son fuerzas de largo alcance. Por ejemplo no se requiere que una partícula cargada este en contacto con otra para ejercerle una fuerza eléctrica, o bien, no se requiere que una masa este en contacto con otra para ejercerle una fuerza gravitatoria. Además de que estas fuerzas pueden ser ejercidas en el espacio vacío.

El concepto de *fuerzas de acción a distancia* presentó un problema complejo, en los tiempos de Newton, el cual consistía en responder las siguientes cuestiones:

1. ¿Cuál es el mecanismo por el cual una partícula puede ejercer una fuerza sobre otra incluso a través del espacio vacío que existe entre ambas?
2. Tomemos la fuerza gravitatoria que existe entre el sol y la tierra. Si el sol dejara de existir en un determinado instante de tiempo ¿la fuerza gravitatoria dejará de existir instantáneamente o habrá un retraso hasta que la misma responda?

Volviendo al caso de la fuerza eléctrica supongamos que colocamos dos cargas ubicadas a una cierta distancia r . Si una de ellas se mueve súbitamente, la fuerza eléctrica ejercida sobre la segunda que ha permanecido inmóvil ¿variara instantáneamente o existirá un retardo?

Y si existieran estos retardos, ¿cuánto tiempo duran?

Michael Faraday fue uno de los pioneros en querer responder estas preguntas y, para esto, comenzó a observar como las limaduras de hierro se orientaban en las cercanías de un imán. Esto se debía a que el imán modificaba las propiedades magnéticas del espacio que lo rodeaba, y entonces al acercar limaduras de hierro, éstas interactuaban con lo que el imán había producido, pero no directamente con él.

La alteración en el espacio se convierte entonces en el **agente** por el cual las partículas, en este caso el imán y las limaduras, pueden interactuar; éste es el mecanismo por el cual se ejercen fuerzas de acción a distancia y se lo denomina **Campo**.

Es así como de la misma forma que una masa genera un **campo gravitatorio** y este campo interactúa con otras masa que puedan estar a su alrededor, o bien, una corriente genera un **campo magnético** y este interactúa con una brújula, una carga eléctrica genera un **campo eléctrico** y éste interactuará con otra partícula que esté cargada.

Aquí podemos observar dos cuestiones: la partícula interactúa **con el campo** (el cual muchas veces no interesa quien lo genera) y la partícula podrá interactuar con el campo **siempre y cuando** la naturaleza de la partícula sea la misma que la naturaleza



del campo (es decir no habrá interacción entre un campo eléctrico y una partícula con masa, porque la naturaleza de ambos no es igual)

Ahora bien respondamos la segunda inquietud.

Supongamos que una carga eléctrica q_A genera un campo eléctrico y se coloca una carga q_B a una distancia r . Si la carga q_A se mueve, la fuerza eléctrica ejercida en q_B no sufrirá alteración hasta que no se propague el cambio en el campo eléctrico producido por q_A a través del espacio a una velocidad c (velocidad de la luz), y la fuerza eléctrica ejercida cambiará luego de transcurrido un tiempo r/c .

Si el Sol, que se encuentra a una distancia de aproximadamente 149.600.000km, desapareciera en un instante de tiempo dado, la fuerza de atracción gravitatoria sobre la tierra no se modificará hasta que no se propague el campo gravitatorio generado por el sol. Como la velocidad de la luz es $3 \cdot 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, el tiempo transcurrido será de aproximadamente 8 minutos.

5.1 Campo Eléctrico

Comencemos nuestro estudio sobre el campo eléctrico basándonos en como el modelo de campo describe la interacción entre cargas. De esto modo:

1. Algunas cargas, la cual podríamos llamar cargas generadoras, alteran el espacio circundante creando un campo eléctrico E .
2. Una carga ubicada en el campo eléctrico generado en el ítem anterior, experimenta una fuerza ejercida **por el campo**.

Es decir para lograr un modelo útil para describir las interacciones eléctricas debemos cumplir estas dos tareas. Primero debemos aprender como calcular el campo eléctrico producido por un conjunto de partículas cargadas. Segundo tendremos que determinar cómo escribir la fuerza eléctrica ejercida por éste campo a una carga ubicada en el mismo.

Vale observar, en este momento, que una forma de detectar si existe campo eléctrico en algún punto del espacio es colocar una carga "de prueba" y observar si a ésta se le ejerce una fuerza eléctrica. Si la respuesta es afirmativa esto querrá decir que en ese punto (donde se colocó la carga) existe un campo eléctrico; en cambio si no se observa una fuerza eléctrica estaremos en condiciones de decir que no hay campo eléctrico en el

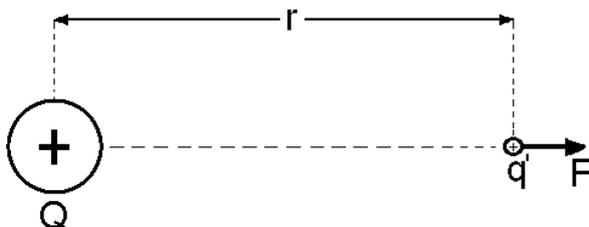


Fig. 6 Carga de prueba q' en las proximidades de una carga Q y fuerza que obra sobre ella.

punto donde se colocó la carga de prueba. Esta definición nos suministra una prueba experimental para comprobar si en un punto existe un campo eléctrico.

Colocamos una partícula con carga Q en un punto determinado en el espacio, si en un punto a una distancia r colocamos una carga de prueba, q' , a ésta se le ejerce una fuerza de origen eléctrico existe un campo eléctrico en el punto. La fuerza eléctrica será:

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

Se define la carga de prueba q' como una partícula cuya masa es de valor despreciable frente las demás dimensiones del sistema y con una carga positiva mucho menor que el valor de la carga que contiene Q , esto es así para que la presencia de la carga q' no altere significativamente las condiciones del campo.

Puesto que la fuerza es una magnitud vectorial, el campo eléctrico será también vectorial y tendrá la misma dirección que la fuerza (por ser la carga de prueba positiva).

Por último el módulo del campo se obtiene como el cociente del módulo de la fuerza ejercida sobre la carga de prueba colocada en el punto.

$$E = \frac{F}{q'} = \frac{k \frac{Q \cdot q'}{r^2}}{q'} = k \frac{Q}{r^2}$$

Es así como el campo eléctrico depende sólo de Q que es la carga eléctrica que está alterando las propiedades eléctricas del espacio.

Si se quiere determinar la intensidad del campo eléctrico resultante originado por varias cargas en un punto determinado del espacio, se aplica el principio de superposición ya la presencia de una carga no altera el efecto de las otras. Esto permite hacer:

1. Calcular el campo originado por cada carga, como si ésta fuera la única presente.
2. Suma vectorialmente cada uno de estos campos, calculados por separado para encontrar el campo resultante \vec{E} .

5.2 Diferencias entre campo eléctrico y campo gravitatorio

- a) El campo gravitatorio está relacionado con la masa y por lo tanto es universal, existe para todos los cuerpos que necesariamente tienen masa. El campo eléctrico sólo existe cuando los cuerpos están cargados eléctricamente.
- b) El campo gravitatorio es siempre de atracción, mientras que el campo eléctrico puede ser de atracción (cargas de diferente signo) o de repulsión (cargas de igual signo).
- c) La constante eléctrica k_e es aproximadamente 10^{20} veces mayor que la constante gravitatoria G . Lo que indica que el campo gravitatorio es muy débil comparado con el campo eléctrico. Esta diferencia tiene una consecuencia útil: en el estudio de los fenómenos eléctricos, los fenómenos gravitatorios son despreciables.
- d) Una masa, esté en reposo o en movimiento, sólo crea un campo gravitatorio. Una carga eléctrica en movimiento, además del campo eléctrico, crea un campo magnético.



6. Líneas de campo

El trazado de las líneas de campo eléctrico es una herramienta que permite conocer como es la estructura del campo eléctrico en el espacio producido por un conjunto de partículas cargadas. Estas líneas, de carácter imaginarias ya que no tienen existencia física, permiten obtener información acerca de la dirección del campo eléctrico y su intensidad en los puntos del espacio.

- 1) La dirección del campo eléctrico en un punto cualquiera del espacio es tangente a la línea de campo eléctrico que pasa por ese punto.

En cualquier punto de un campo eléctrico, el campo sólo puede tener una dirección, por lo tanto por cada punto del campo, sólo puede pasar una línea de campo. De esto se deduce que las líneas de campo no se cruzan ni se cortan jamás.

- 2) La densidad de líneas de campo que se dibujan son proporcionales a la intensidad del campo eléctrico. Cuanto mayor es la densidad de líneas de campo en una determinada zona del espacio, mayor será la intensidad del campo eléctrico en esa zona.

Según la definición de campo eléctrico y la elección de la carga de prueba como positiva, las líneas de campo de una carga puntual tendrán una dirección radial y su sentido dependerá del signo de dicha carga. Si ésta es positiva las líneas de campo serán salientes y, en cambio, si es negativa serán entrantes. Puede observarse en la figura 7 las líneas de campo eléctrico para estas dos situaciones.

Suele decirse que las líneas de campo “nacen” en las cargas positivas y “mueren” en las cargas negativas.

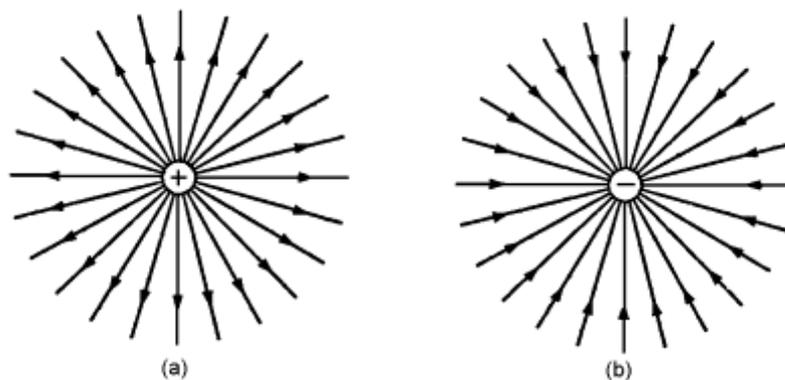


Fig. 7. Campo eléctrico creado por una carga puntual positiva (a) y negativa (b)

6.1 Campos eléctricos no uniformes

Las figuras que siguen muestran las líneas de campo eléctrico de dos configuraciones sencillas. La figura 8 muestra el esquema de líneas que resulta de tener dos cargas de igual signo, mientras que la figura 9 lo hace para dos cargas de signo opuesto. En general los campos eléctricos suelen tener formas muy complejas.

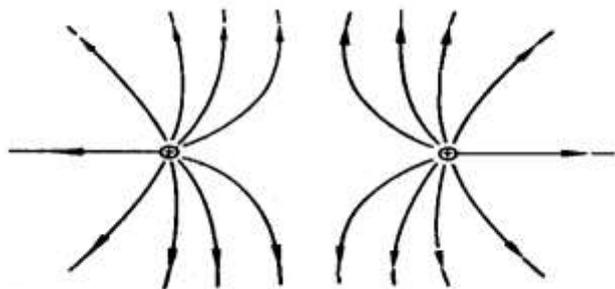


Fig. 8 Campo eléctrico creado por dos cargas iguales

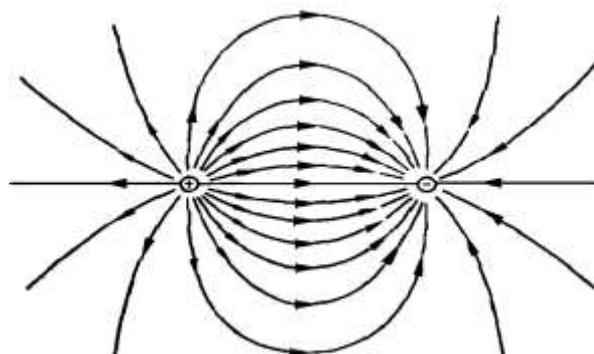


Fig. 9 Campo eléctrico creado por dos cargas de igual magnitud y distinto signo

Si recordamos que las líneas de campo eléctrico nos dan, intuitivamente, información acerca de la intensidad del campo, debemos observar que en estas dos figuras la densidad de líneas de campo no se mantiene constante a lo largo del espacio. Esto indica que la intensidad del campo eléctrico no es constante en el espacio y por lo tanto decimos que el campo eléctrico es **no uniforme**.

6.2 Campo eléctrico uniforme

Cuando la intensidad, la dirección y el sentido del campo eléctrico se mantienen a largo del espacio, estamos en presencia de un campo **uniforme**. Por lo tanto, un campo eléctrico uniforme está representado por un diagrama cuya densidad de líneas es constante, es decir, paralelas tal como muestra la siguiente figura:

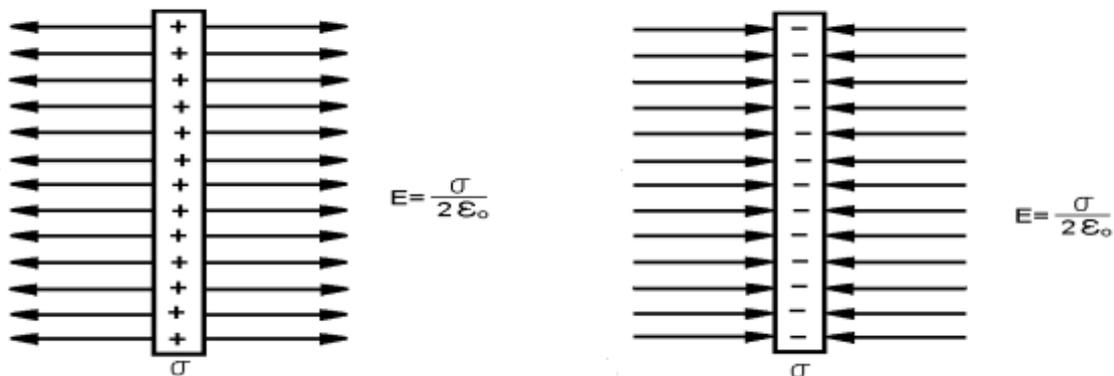


Fig. 10 a y b En la figura se puede observar el campo producido por una placa infinita con carga positiva (a) y carga negativa (b). Desde el punto de vista práctico al no existir placas infinitas se toman placas muy grandes y analiza el campo en sus proximidades.

Cuando se carga una placa plana infinita de modo homogéneo las placas producen un campo eléctrico. Es cierto que las placas infinitas sólo existen idealmente pero se puede obtener un resultado aceptable cuando se observa el campo eléctrico en las inmediaciones de una placa grande. Aunque no lo vamos a demostrar aquí en el caso de una placa infinita cargada de modo homogéneo el valor de la intensidad del campo es:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Donde σ es la densidad de carga almacenada en la placa, por unidad de área de la superficie:

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

Desde el punto de vista práctico el modo de producir un campo eléctrico uniforme es cargando dos placas de metal paralelas con cargas iguales y opuestas, separadas por una distancia pequeña en comparación con las dimensiones de las placas. La simetría indica que el campo eléctrico en la región entre las placas es uniforme y su intensidad puede calcularse aplicando el principio de superposición como la suma del efecto de cada una de las placas por separado, obteniéndose como resultado:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

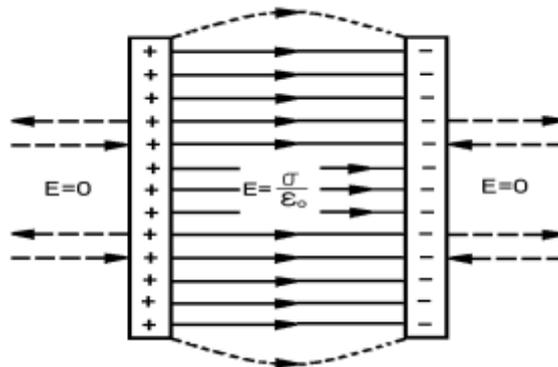


Fig. 10 c En la figura se puede observar el campo producido por dos placas planas paralelas tanto en el interior como en el exterior de las placas el campo es la suma de los campos de cada una por lo que es cero en el exterior y el doble en el interior

Valer notar que la intensidad del campo E es independiente de la distancia entre las placas, aunque esta expresión es válida cuando la superficie de las placas es grande³ comparada con la distancia de separación entre ellas y se pueden desprestigiar los efectos de bordes.

³ Decimos que una magnitud es grande comparada con otra cuando la primera es, de al menos, un orden de magnitud más grande que la segunda.



7. Trabajo de la Fuerza Eléctrica y Energía Potencial Eléctrica

Cuando se estudió la fuerza de la gravedad demostramos que la misma era conservativa. Es decir el trabajo que ésta realiza sobre un objeto por cualquier trayectoria depende sólo de la posición inicial y final, y no de la trayectoria elegida para efectuar dicho movimiento. Al ser esta fuerza conservativa hemos podido definir una energía potencial gravitatoria.

La energía potencial gravitatoria es una **propiedad del sistema**. El trabajo realizado para separar el cuerpo de la tierra aumenta la energía potencial gravitatoria del sistema y cuando las dos partes se juntan, su energía potencial gravitatoria se convierte en otras formas de energía (cinética, interna, etc.). **ver de sacar energía interna**

Esto simplificó muchas veces la resolución de problemas debido a que éstas magnitudes son escalares, en lugar de tener que resolverlos mediante el uso de fuerzas que son vectoriales.

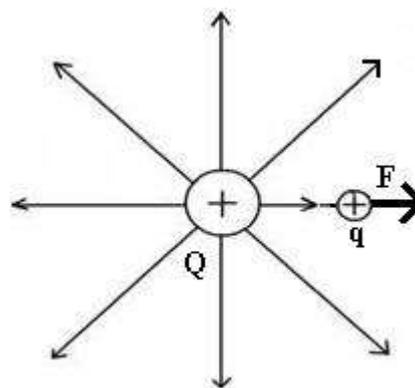
La fuerza eléctrica, a simple vista, parece tener una expresión similar a la de la fuerza gravitatoria, es por eso que nos encargaremos de calcular el trabajo que ésta realiza y, si la fuerza resultara ser conservativa, podremos definir una nueva energía potencial, la **energía potencial eléctrica** la cual también será una propiedad del sistema y tendrá las mismas características que la potencial gravitatoria.

Consideremos una carga Q la cual genera un campo eléctrico en el espacio que la rodea. La intensidad de este campo eléctrico, a una distancia r , la podemos expresar como:

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

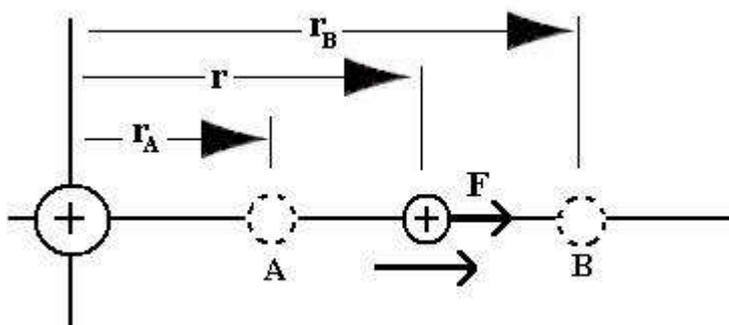
Si a una distancia r de Q , colocamos una carga q , la primera le ejercerá a la segunda una fuerza eléctrica, a través del campo eléctrico que origina, que en modulo será:

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



Vale observar aquí que esta fuerza **es variable** y que dependerá del valor que tome r en el espacio.

Calculemos ahora el trabajo que realiza la fuerza eléctrica en mover a la carga q desde una distancia r_A hasta una distancia r_B , tal como se muestra en la siguiente figura.



La expresión que nos permite calcular el trabajo de la fuerza eléctrica resulta ser:

$$W_{AB} = F \cdot d \cdot \cos \theta$$

Donde d es la distancia recorrida y θ el ángulo que forma la fuerza con el desplazamiento. En nuestro caso tenemos:

$$d = |r_B - r_A|$$

$$\cos \theta = 1$$

Es aquí cuando nos presentamos con un problema: la fuerza eléctrica **no es constante**. Esto quiere decir que no será fácil calcular dicho trabajo ya que a medida que la partícula cargada se aleja de A y llega a B la fuerza eléctrica cambia su valor punto a punto. Es decir, ¿Qué valor de F tomamos para colocar en la expresión del trabajo si cambia durante el movimiento?

Una de las formas más tradicionales en física de resolver este tipo de problemas es pensar que la distancia d puede ser dividida por pequeños intervalitos de distancia llamados Δd . Es decir:

$$d = \sum_A^B \Delta d$$

Estos intervalitos pueden ser tan pequeños como uno quiera hacerlos, o bien como uno pueda hacerlos.⁴

Ahora bien, podría surgir la siguiente pregunta: ¿de qué nos sirve esta división?

Y es que si los intervalos son pequeños uno puede pensar que la fuerza eléctrica **se mantiene constante** durante ese pequeño paso y que la velocidad de la partícula se mantiene constante. Esto nos permitirá calcular el trabajo que se hizo en ese pequeño intervalo pensando a la fuerza eléctrica constante. Luego el trabajo total que realiza la fuerza eléctrica será la suma de los trabajos que se hicieron en cada pequeño intervalo.

Es decir el trabajo podremos calcularlo como:

⁴ Un ejemplo práctico de esto es cuando uno camina: imagínese que tiene que recorrer una cuadra cuya distancia $d=100\text{m}$. Cada paso que uno da es un pequeño intervalito, los cuales sumados, le permitieron recorrer toda la cuadra.



$$W_{AB} = \sum_A^B W$$

Donde W representa el trabajo que se hace en un Δd , el cual puede ser calculado como

$$W = F \cdot \Delta d \cdot \cos \theta$$

Con lo cual el trabajo total resulta ser:

$$W_{AB} = \sum_A^B F \cdot \Delta d \cdot \cos \theta$$

Además si en cada intervalo el W resultara ser independiente de la trayectoria, o bien dicho de otra manera, si en cada intervalo el trabajo que se realiza depende sólo del punto inicial y final; esto querrá decir que en todos los intervalos pasará lo mismo y por lo tanto el trabajo total también dependerá del punto inicial y final, por lo que la fuerza eléctrica será conservativa. Veamos si esto es así.

Supongamos que la carga q se mueve en ese pequeño intervalito dentro del intervalo total. Este pequeño intervalo comienza a una distancia r_i y termina a una distancia r_f de la carga Q . Esto es:

$$\Delta d = |r_f - r_i|$$

Por lo que el trabajo en ese pequeño intervalo será:

$$W_{if} = F \cdot (r_f - r_i) \cdot \cos \theta$$

$$W_{if} = F \cdot (r_f - r_i) \cdot \cos 0^\circ$$

Ahora bien como expresamos anteriormente podemos pensar que la fuerza eléctrica F se mantiene constante en el intervalo y nos debemos preguntar ¿Cuál es su valor?

Entre r_i y r_f actúa una fuerza eléctrica media geométrica (es decir un promedio geométrico) la cual podemos expresar como:

$$F_m = \sqrt{F_i \cdot F_f}$$

Donde la fuerza eléctrica F_i es la fuerza que se le ejerce a q al iniciar ese pequeño desplazamiento y la podemos expresar como:

$$F_i = k \frac{Q \cdot q}{r_i^2}$$

Y la fuerza eléctrica F_f la fuerza que se le ejerce a q en el punto final de ese pequeño desplazamiento, expresada como:

$$F_f = k \frac{Q \cdot q}{r_f^2}$$

De esta manera la fuerza eléctrica media en ese intervalo será:

$$F_m = \sqrt{k \frac{Qq}{r_i^2} \cdot k \frac{Qq}{r_f^2}} = \sqrt{\frac{k^2 Q^2 q^2}{r_i^2 \cdot r_f^2}}$$

$$F_m = k \frac{Qq}{r_i r_f}$$

Ahora podemos ver que es constante durante ese pequeño desplazamiento.

Volviendo al cálculo del trabajo

$$W_{if} = F_m \cdot (r_f - r_i) \cos 0^\circ$$

$$W_{if} = F_m \cdot (r_f - r_i)$$

$$W_{if} = k \frac{Qq}{r_i \cdot r_f} \cdot (r_f - r_i)$$

$$W_{if} = k \cdot Q \cdot q \cdot \frac{(r_f - r_i)}{r_i \cdot r_f}$$

$$W_{if} = k \cdot Q \cdot q \cdot \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_f} \right)$$

Podemos ver que el trabajo realizado por la fuerza eléctrica en un intervalito de la trayectoria depende solamente de la distancia inicial y final de la carga q , por lo que se deduce que la fuerza eléctrica es conservativa en ese intervalito.

Este cálculo se puede repetir para todos los intervalitos que entran en la distancia que uno debe recorrer y llegaríamos a la misma conclusión: que el trabajo sólo depende de los puntos inicial y final, entonces generalizando podemos decir que la fuerza eléctrica es conservativa, y el trabajo que ésta realiza desde A hasta B no depende de la trayectoria que se tome para calcularlo. Su expresión resulta ser:

$$W_{AB}^{F_{elec}} = kQq \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

Hemos visto que la fuerza eléctrica es conservativa, esto que nos permite justificar la definición de energía potencial eléctrica.

Definimos **Energía Potencial Eléctrica** del sistema de cargas Q y q , cuando están separadas una distancia r :

$$E_p(r) = k \frac{Qq}{r}$$

Entonces, retomando el trabajo realizado por la fuerza eléctrica:



$$W_{AB}^{F_{elec}} = -kQq \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) = -(E_p(B) - E_p(A))$$
$$W_{AB}^{F_{elec}} = -\Delta E_p$$

Cuestiones:

1. Mover una carga desde infinito hasta r

7.1 El Agente Externo

Cuando la carga se mueve debido a la acción única de la fuerza eléctrica, la misma comenzará a acelerarse, lo cual incrementará su energía cinética. Esto sucede porque, al ser la fuerza eléctrica conservativa, se tiene que $\Delta E_M = 0 = \Delta E_C + \Delta E_p$ lo que se traduce en $\Delta E_C = -\Delta E_p$. Es decir, la energía potencial del sistema se convierte en energía cinética.

Pero podría ser necesaria la acción de un agente externo, que ejerza una fuerza externa sobre la carga, que modifique el movimiento de ésta dentro del campo eléctrico. El carácter del agente externo nos indica que es una fuerza no conservativa, por lo que podremos plantear en cualquier problema que necesitemos la acción de un agente externo:

$$W_{FNC} = W_{F_{ext}} = \Delta E_M = \Delta E_p + \Delta E_C$$

Si se requiere que el movimiento sea cuasi-estático, es decir, que la carga se mueva con velocidad constante en el sentido del campo o en contra del mismo. Para esto es necesario que un agente externo haga una fuerza externa igual y opuesta a la fuerza eléctrica. En este caso el agente externo extrae o entrega energía al sistema respectivamente, para que no se produzca aceleración, es decir, $\Delta E_C = 0$ y

$$W_{FNC} = W_{F_{ext}} = \Delta E_p .$$

7.2 Potencial Eléctrico

Imaginemos nuevamente una carga Q fija en el origen de coordenadas y tomamos una carga de prueba q la cual queremos trasladar desde un punto A (a una distancia r_A de Q) hasta un punto B (a una distancia r_B de Q). La variación de energía potencial que sufrirá este sistema de cargas será:

$$\Delta E_{pAB} = kQq \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

Si quisiéramos mover una carga de prueba dos veces más grande, obtendríamos el doble en el cambio de la energía potencial:

$$\Delta E'_{pAB} = kQ(2q) \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

Y si la carga de prueba fuese tres veces mayor tendríamos el triple de la variación de energía potencial eléctrica inicial.

$$\Delta E''_{pAB} = kQ(3q) \left(\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right)$$

Esto indica que la variación de energía potencial eléctrica es directamente proporcional a la carga de prueba, o bien, el cociente entre la variación de energía potencial eléctrica y la carga que queremos mover siempre es constante y por lo tanto dependerá exclusivamente de las alteraciones en el espacio que produce Q.

$$\frac{\Delta E_{pAB}}{q} = \frac{\Delta E'_{pAB}}{2q} = \frac{\Delta E''_{pAB}}{3q} = cte$$

Este cociente se define como *diferencia de potencial eléctrico*, o simplemente **diferencia de potencial** (ΔV), de este modo:

$$\Delta V_{AB} = \frac{\Delta E_{pAB}}{q}$$

O bien,

$$V_B - V_A = \frac{E_{pB} - E_{pA}}{q}$$

La unidad del SI para el potencial la podemos deducir de ésta última ecuación:

$$[\Delta V] = \frac{[\Delta E_p]}{[q]} = \frac{J}{C} = V \text{ (Volt)}$$

Usando la relación entre el trabajo de la fuerza eléctrica y la variación de energía potencial eléctrico podemos escribir la diferencia de potencial como:

$$\Delta V_{AB} = \frac{-W_{AB}^{F_{elec}}}{q}$$

Aquí puede observarse como la diferencia de potencial es una magnitud que depende exclusivamente de la partícula generadora del campo eléctrico, ya que a esta magnitud se la puede pensar como el trabajo por unidad de carga que hace la fuerza eléctrica cuando a q se la traslada desde A hasta B.

Si el punto A se encuentra a una distancia infinitamente grande, tendremos:

$$\Delta V_{\infty B} = -\frac{W_{\infty B}^{F_{elec}}}{q}$$



A $V_{\infty B}$ se lo denomina potencial eléctrico en el punto B respecto al infinito y lo escribimos simplemente V_B (esto es el potencial absoluto en el punto B).

A cada punto del campo eléctrico le podemos hacer corresponder un valor del potencial eléctrico. La diferencia de potencial ΔV_{AB} también puede expresarse:

$$\Delta V_{AB} = \frac{E_{PB} - E_{PA}}{q} = \frac{\frac{kQq}{r_B} - \frac{kQq}{r_A}}{q}$$

$$V_B - V_A = k \frac{Q}{r_B} - k \frac{Q}{r_A}$$

Por lo que:

$$V_B = k \frac{Q}{r_B} \text{ y } V_A = k \frac{Q}{r_A}$$

En general a una distancia r genérica y en el caso de una carga puntual Q el potencial lo podemos expresar como:

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

7.3 Trabajo, Energía Potencial Eléctrica y Potencial en campos uniformes

Cuando el **campo eléctrico es uniforme** el cálculo del trabajo resulta ser sencillo. Si trasladamos una carga de prueba desde un punto A hasta un punto B tal como se muestra en la figura, la fuerza eléctrica se mantiene constante durante toda la trayectoria y el trabajo simplemente lo podemos calcular como:

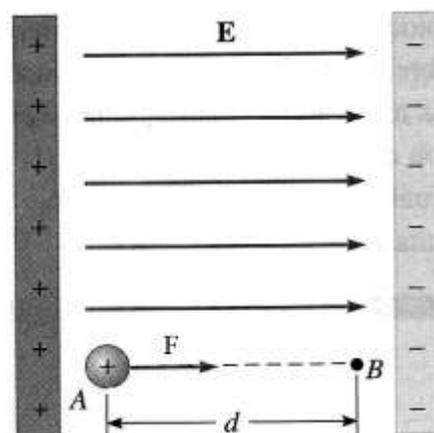
$$W_{AB}^{F_{elec}} = F \cdot d \cdot \cos \theta$$

Recordemos que la fuerza eléctrica la podemos escribir como $F=q \cdot E$, entonces:

$$W_{AB}^{F_{elec}} = qEd$$

Luego la variación de energía potencial simplemente es:

$$\Delta E_{pAB} = -W_{AB}^{F_{elec}} = -qEd$$



Y por último la diferencia de potencial que existe entre las placas será:

$$\Delta V_{AB} = \frac{\Delta E_{pAB}}{q} = -Ed$$

O bien

$$\Delta V_{BA} = -\Delta V_{AB} = Ed$$

Si se conoce la diferencia de potencial y la distancia entre las placas podemos calcular la intensidad del campo eléctrico como:

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

Esto demuestra la equivalencia entre las unidades:

$$\frac{V}{m} = \frac{N}{C}$$

7.4 Superficies equipotenciales

Consideremos una carga puntual q generadora de un campo eléctrico. Calculemos el trabajo que efectúa la fuerza eléctrica en mover una carga de prueba q' desde el punto A hasta B tal cual se muestra en la figura.

$$W_{AB}^{F_{elec}} = -(E_{PB} - E_{PA})$$

$$W_{AB}^{F_{elec}} = -\left(\frac{kqq'}{r_B} - \frac{kqq'}{r_A}\right)$$

Como $r_A = r_B$ entonces:

$$W_{AB}^{F_{elec}} = 0$$

Esto quiere decir que la fuerza eléctrica no efectúa ningún trabajo al mover una carga de prueba desde A hasta B, o bien, podemos concluir que la fuerza eléctrica no efectuará trabajo sobre ninguna carga que se mueva sobre una superficie que mantenga constante la distancia que hay desde q' hasta q . Estas superficies son esferas centradas en q , las cuales podemos sólo dibujarlas en el plano.

Podemos ver como las superficies equipotenciales y las líneas de campo eléctrico son perpendiculares entre si.

Recordemos que

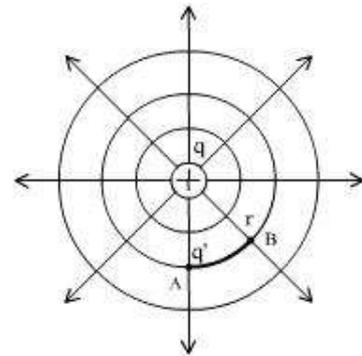
$$\Delta V_{AB} = -\frac{W_{AB}^{F_{elec}}}{q}$$

Como se moverá a la partícula sin efectuar trabajo tenemos que:

$$\Delta V_{AB} = 0$$

O bien lo que es lo mismo:

$$V_A = V_B$$





Es decir este tipo de superficies tienen algo que las caracteriza: el potencial en todos sus puntos se mantiene constante, y se las denomina **superficies equipotenciales**, aunque, en general, suele dibujárselas en el plano.

Cuando se mueve una carga de prueba sobre una superficie equipotencial la fuerza eléctrica *no efectúa ningún trabajo*, es decir, *no hay ninguna variación en la energía potencial eléctrica del sistema*.

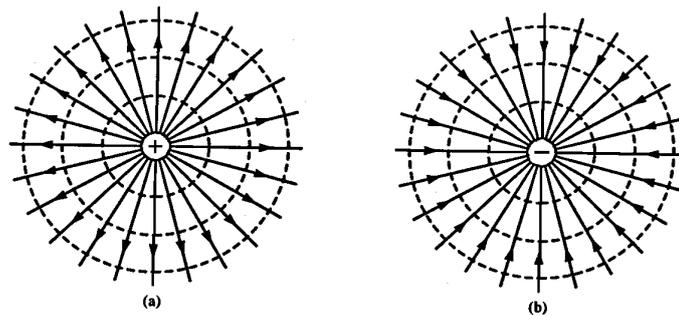


Fig. 16 Representación del campo eléctrico y del potencial para el caso de una carga puntual positiva (a) y negativa (b). Obsérvese que las líneas de campo y de potencial son siempre perpendiculares entre sí.

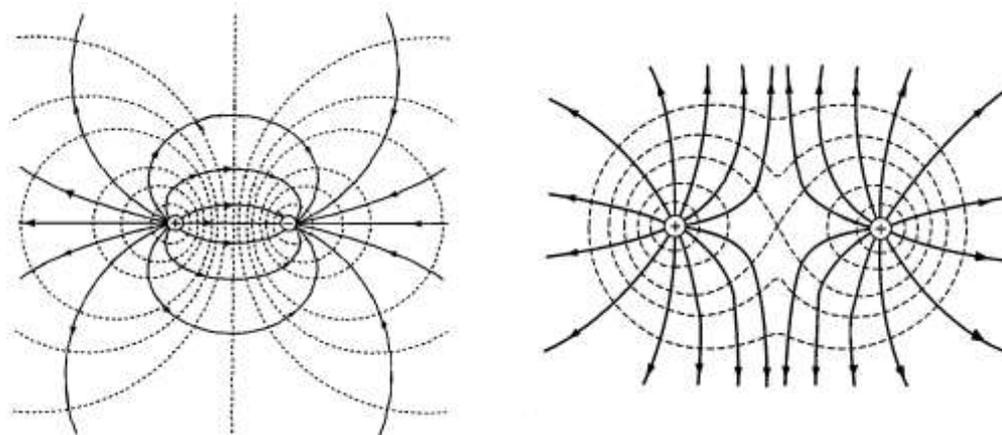


Fig.17 Representación del campo eléctrico y del potencial para el caso de dos cargas puntuales de distinto signo y de igual signo. Obsérvese que las líneas de campo y de potencial son siempre perpendiculares entre sí.

8. Campo Eléctrico y Potencial de un conductor esférico cargado

Consideremos un cuerpo conductor esférico cargado como se indica en la figura 18.

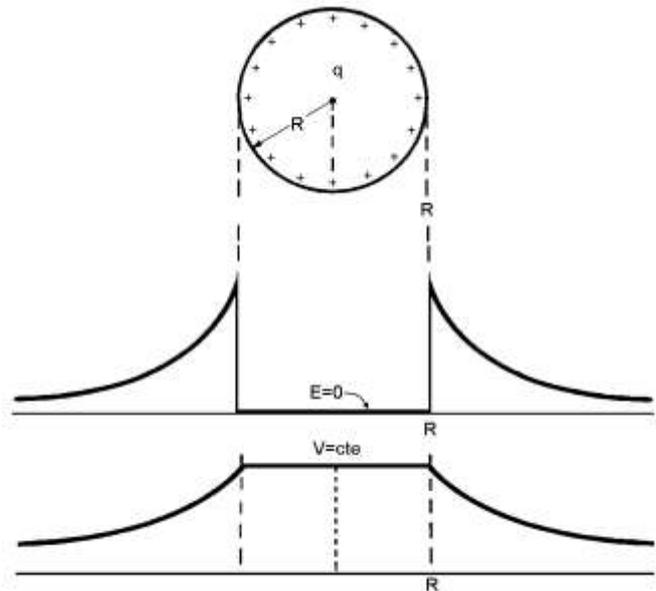
El campo eléctrico resultante en puntos interiores es nulo, porque de no ser así actuarían fuerzas sobre los electrones libres que provocarían un movimiento ordenado de cargas eléctricas, contrario a la hipótesis de equilibrio electrostático.

En el interior $E = 0$, o sea si $r < R$

En la superficie, toma el valor $E = \frac{k \cdot q}{R^2}$

En puntos exteriores podemos pensar al conductor como una carga puntual con un valor de carga total q , por lo que el campo eléctrico para los puntos a una distancia r genérica, donde $R < r < \infty$, será:

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



De acuerdo a estas dos últimas expresiones el conductor esférico se comporta como si toda la carga eléctrica estuviese concentrada en el centro de la esfera.

Para la determinación del potencial, en puntos interiores, teniendo en cuenta que $E = 0$; la diferencia de potencial entre los puntos interiores es nula y en consecuencia el interior de la esfera puede considerarse como un volumen equipotencial; o sea:

$V = \text{constante}$; por lo tanto $V_A = V_B$

Calculándose: $V = \frac{k \cdot q}{R}$

Y en puntos exteriores, donde $R < r < \infty$: $V = \frac{k \cdot q}{r}$



9 Capacitores

9.1 Capacidad de un conductor

Como vimos anteriormente si a un conductor aislado lo cargamos con una carga eléctrica de valor q , éste adquiere un potencial eléctrico (con respecto a una referencia dada) cuyo valor llamaremos V . La experiencia muestra que si al mismo conductor se le transfiere una cantidad de carga $2q$, $3q$, o una cantidad Nq ; éste adquiere un potencial eléctrico $2V$, $3V$ o bien NV .

Esto sugiere que la relación entre la carga y el potencial es constante, es decir:

$$\frac{q}{V} = \frac{2q}{2V} = \frac{Nq}{NV} = cte$$

Ésta relación mide, de alguna forma, la “capacidad” que tiene un conductor de almacenar una determinada cantidad de carga a una cierta diferencia de potencial y por eso se la denomina **capacidad**. Esto es:

$$C = \frac{q}{V}$$

Estudiemos las unidades de la capacidad en el SI:

$$[C] = \frac{[q]}{[V]} = \frac{C}{V} = F \text{ (Farad)}$$

en el SIMELA la unidad es reconocida como Faradio.

La unidad de la capacidad se la denomina faradio en honor a Michael Faraday, gran físico experimental inglés.

El Faradio es una unidad relativamente grande y es por eso que se utilizan prefijos de unidades métricas, para poder trabajar en órdenes de magnitud más acordes. Los órdenes de magnitud más generales son: μF (microfaradios), nF (nanofaradios) y pF (picofaradios).

Ejemplo: ¿Cuál será la capacidad de un conductor esférico de radio R ?

El potencial es $V = k \frac{q}{R}$

En consecuencia la capacidad : $C = \frac{q}{V} = \frac{q}{k \cdot \frac{q}{R}} = \frac{R}{k}$ y como: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

Tendremos finalmente: $C = 4\pi\epsilon_0 R$

La capacidad de un conductor esférico resulta ser directamente proporcional a su radio.

9.2 Capacitores

Un sistema formado por dos conductores que tienen cargas iguales (en módulo) y opuestas (en signo) constituye lo que se denomina un **capacitor**. En general los conductores están separados por un dieléctrico (aislante) que suelen ser: aire, mica, poliestireno o papel.

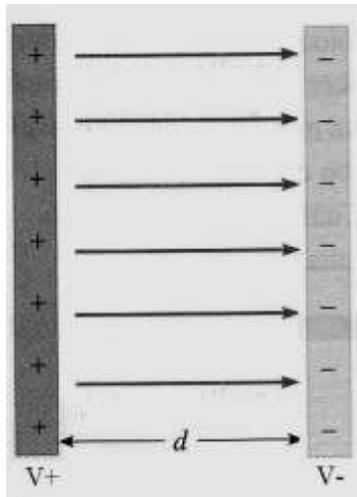
Los capacitores son dispositivos que almacenan energía⁵ a través de un campo eléctrico generado en su interior por cargas eléctricas

Se define la capacidad de un capacitor como la razón entre la carga q de **cualquiera de los conductores**⁶ y la diferencia de potencial V_{AB} entre ellos:

$$C = \frac{q}{V_{AB}}$$

9.3 Capacitor de láminas paralelas

El capacitor más común que podemos encontrar o podemos construir es el de láminas conductoras paralelas, o también denominado capacitor plano, y se compone de dos láminas conductoras paralelas, separadas por una distancia que es pequeña comparada con las dimensiones lineales de las láminas tal como se muestra en la siguiente figura. Cuando proponemos este dimensionamiento estamos proponiendo un capacitor ideal de láminas infinitas y, en consecuencia, sin efectos de bordes.



Recordando las expresiones del campo eléctrico y de la diferencia de potencial entre dos placas planas paralelas que ya han sido estudiadas:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

$$\Delta V = Ed$$

⁵ Si bien el término “almacenada” no está correctamente utilizado, se lo usa ampliamente en la bibliografía tradicional para indicar que el sistema adquiere una propiedad energética.

⁶ Cuando hablamos de la carga de un capacitor, nos referimos a la carga en cualquiera de los conductores.



Donde σ representa la densidad de carga por unidad de superficie en cada placa, es decir:

$$\sigma = \frac{q}{A}$$

La capacidad del sistema será:

$$C = \frac{q}{\Delta V} = \frac{\sigma \cdot A}{\left(\frac{\sigma}{\epsilon_0}\right) \cdot d} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \text{ (capacitor de placas planas paralelas)}$$

Vale observar que la capacidad que tiene un sistema en almacenar cargas, a una cierta diferencia de potencial, depende **solamente** de los factores geométricos (área de las placas y distancia entre ellas) y de la permitividad del medio que existe entre ellas (vacío en este caso).

Así también queda demostrado que la capacidad del sistema se mantiene constante y que es una propiedad que resulta de la construcción de un capacitor propiamente dicho.

10. Conexión de Capacitores

Cuando uno desea comprar un capacitor de un determinado valor para un fin específico nos encontramos con un inconveniente importante: que no se fabrican capacitores de todos los valores. Muchas veces conviene, entonces, conectar varios capacitores de valores fabricados a fines de lograr un capacitor de un valor no fabricado.

En otras ocasiones al analizar circuitos eléctricos conviene conocer de un “arreglo” de capacitores cual es la **capacidad equivalente** y tratarlos al conjunto como si fuera uno sólo. Con capacidad equivalente se entiende a la capacidad de un solo capacitor que se comporta como la combinación, sin modificar el comportamiento del circuito. A esto se le suele llamar *equivalente externo*.

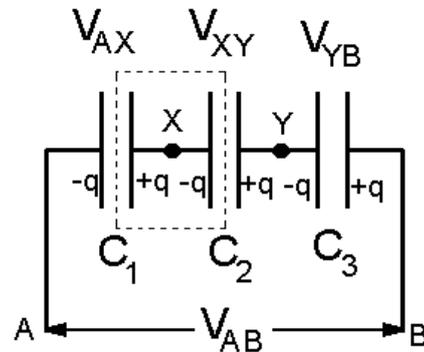
Así existen varias formas de conectar los capacitores, pero estudiaremos dos: en serie o en paralelo.

Si los elementos están conectados se forma tal que la corriente que los atraviesan es igual en cada uno de ellos decimos que están en serie; en cambio si la diferencia de potencial en cada uno de ellos es la misma decimos que están en paralelo.

10.1 Conexión en serie

La figura muestra a tres capacitores conectados en serie: C_1 , C_2 y C_3 . Se desea calcular la capacidad equivalente de esta combinación.

La magnitud de la carga q para capacitores conectados en serie, debe ser igual en cada una de las placas. Esto es así porque la carga neta, en aquella parte del circuito encerrada por la línea de trazos debe ser cero, esto es, la carga presente inicialmente en las placas es cero y al conectar la batería entre A y B sólo producirá una separación de cargas, permaneciendo la carga neta igual a cero.



De la figura tenemos:

$$V_{AB} = V_{AX} + V_{XY} + V_{YB}$$

aplicando la relación $V = q / C$ a cada uno de los capacitores se obtiene:

$$V_{AB} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

dividiendo ambos miembros por q

$$\frac{V_{AB}}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

El primer miembro es la inversa de la capacidad equivalente

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Esto significa que la conexión en serie puede ser reemplazada por un único capacitor de capacitancia C_{eq} , a la cual se le aplica la diferencia de potencial V_{AB} y sus placas adquieren la misma carga q que tenían los capacitores conectados en serie.

En general para muchos capacitores conectados en serie podremos calcular la capacidad equivalente como:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

Dos particularidades que podemos observar de este tipo de conexión:

1. La capacidad equivalente de la conexión en serie es siempre menor que la menor de las capacidades de los capacitores asociados.



2. Cuando hay **sólo dos** capacitores (C_1 y C_2) en serie, el equivalente lo podemos calcular como:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

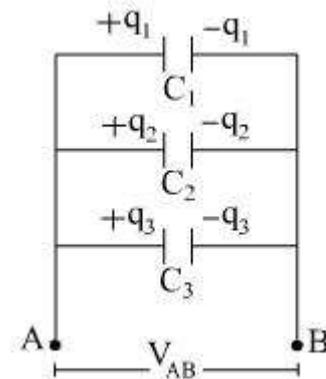
10.2 Conexión en paralelo

La figura muestra a tres capacitores conectados en paralelo: C_1 , C_2 y C_3 . Se desea calcular la capacidad equivalente de esta combinación.

Las cargas que almacenan las placas cuando se aplica la diferencia de potencial V_{AB} , son respectivamente q_1 , q_2 y q_3 .

La carga total q sobre la red en paralelo es:

$$q = q_1 + q_2 + q_3$$



Aplicando la relación $q = C \cdot V$ a cada uno de los capacitores, se obtiene:

$$q = C_1 V_{AB} + C_2 V_{AB} + C_3 V_{AB} = V_{AB} (C_1 + C_2 + C_3)$$

dividiendo ambos miembros por V_{AB}

$$\frac{q}{V_{AB}} = C_1 + C_2 + C_3$$

El primer miembro es la capacitancia equivalente, por lo tanto: $C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3$

Esto significa que la conexión en paralelo puede ser reemplazada por un único capacitor de capacitancia C , al cual se le aplica la diferencia de potencial V_{AB} , y sus placas adquieren la carga total q .

En general para muchos capacitores conectados en paralelos podremos calcular la capacidad equivalente como:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i$$

Observar que la capacidad equivalente de la combinación en paralelo siempre será mayor que la mayor capacitancia de los capacitores asociados.

11. Energía de un capacitor cargado

Se puede cargar un capacitor mediante la transferencia de cargas de una placa a otra. En este proceso se aumenta el potencial de la carga transferida. Así pues, debe realizarse un trabajo para cargar un capacitor; este trabajo aumenta la energía potencial eléctrica que puede recuperarse cuando el capacitor se descarga.

Ahora consideremos el proceso de carga de un capacitor de láminas paralelas. Puesto que sólo tiene importancia la diferencia de potencial entre las placas, elegimos que el potencial de la placa negativa sea cero. Al comenzar el proceso de carga, ninguna de las dos placas posee carga. No existe campo eléctrico y ambas placas están al mismo potencial. Una vez que se halla transferido una carga q de una placa a la otra, la diferencia de potencial:

$V = \frac{q}{C}$; entonces tendremos una carga negativa $-q$ en la placa que se ha elegido inicialmente con potencial cero y $+q$ sobre la otra placa que ha adquirido un potencial V .

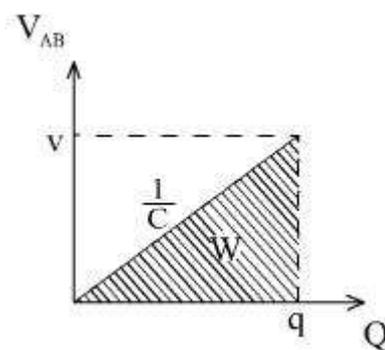
La diferencia de potencial entre las láminas aumenta desde un valor inicial cero hasta un **valor final V** establecido por la fuente.

El valor medio de la diferencia de potencial durante el proceso de carga es:

$$V = \frac{0+V}{2} = \frac{V}{2}$$

Y el trabajo necesario es: $W = \frac{q.V}{2}$

Que es equivalente al área rayada en la figura



Por lo tanto la **energía almacenada en el capacitor** durante este proceso será:

$$U = \frac{1}{2} \cdot q \cdot V$$

Teniendo en cuenta que $V = \frac{q}{C}$, podemos expresar la energía como:

$$U = \frac{1}{2} q \frac{q}{C} = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$$

O bien

$$U = \frac{1}{2} (CV)V = \frac{1}{2} CV^2$$

12. Dieléctricos

En general, los capacitores tienen colocados entre sus láminas una sustancia no conductora, denominada dieléctrico. El dieléctrico se incluye entre las láminas por varios propósitos:

- resuelve el problema mecánico de mantener dos láminas metálicas a una distancia muy pequeña sin ningún contacto real, lo que neutralizaría las cargas



- b. como la rigidez dieléctrica es mayor que la del aire, aumenta la diferencia máxima de potencial que el capacitor es capaz de resistir sin romperse.
- c. la capacidad de un capacitor determinado es varias veces mayor si se le incluye un dieléctrico que separe sus láminas, que si entre éstas hubiese nada (vacío).

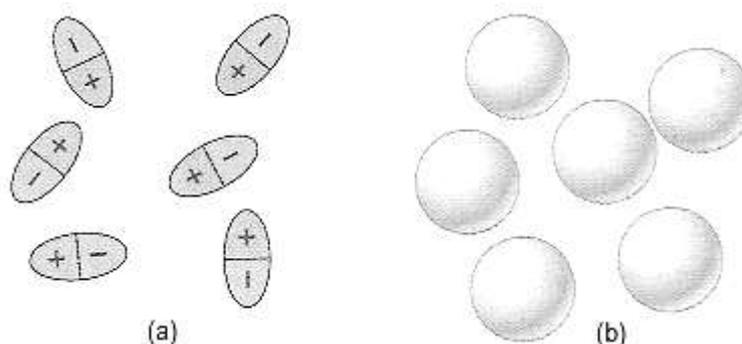
Por ejemplo el capacitor de hojas y papel, tiene sus láminas formadas por bandas de hojas metálicas y el dieléctrico es una capa de papel impregnado en cera. Arrollando este capacitor puede obtenerse una capacidad de varios microfaradios en un volumen pequeño.

Otro caso es el de los capacitores electrolíticos que utilizan como dieléctrico una capa muy delgada de óxido no conductor entre la lámina metálica y solución conductora. Sus dimensiones son relativamente pequeñas.

12.1 Polarización de un dieléctrico

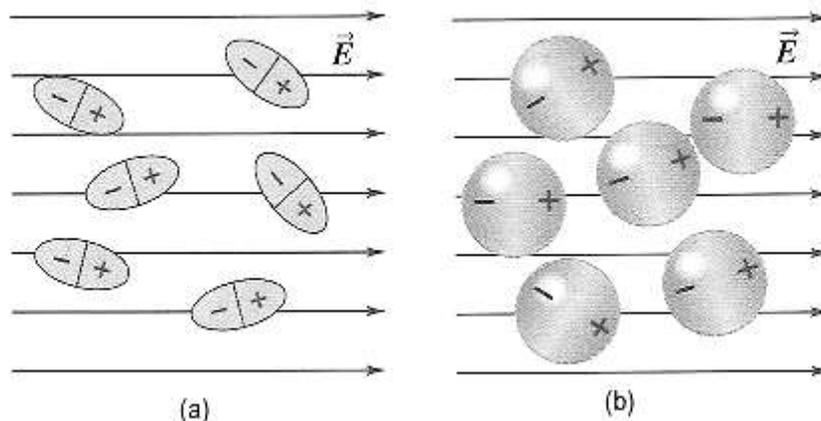
Los conductores tienen la característica de contener cargas libres que pueden moverse libremente en el volumen, y esto hace que en presencia de un campo eléctrico externo, las mismas se redistribuyan en la superficie de forma tal que no hay campo eléctrico en el interior del conductor. Ahora bien ¿Qué es lo que sucede en el interior de un dieléctrico?

Algunos dieléctricos pueden estar formados por moléculas polares que tienen cantidades iguales de cargas positivas y negativas pero cuya distribución no es uniforme, es decir hay, un exceso de carga positiva en uno de sus extremos de la molécula y carga negativa en el otro. O bien podría estar formado por moléculas apolares, aquellas donde no existe la distribución antes descrita. Estas moléculas están orientadas al azar en cualquier dieléctrico.



En ausencia de un campo eléctrico las moléculas polares se encuentran orientadas al azar (figura a) siendo dipolos eléctricos mientras que en las moléculas apolares no lo son (figura b).

Al colocarse un campo eléctrico externo las moléculas se orienten según éste originando en el caso de tratarse de moléculas polares una alineación de las mismas en él, y en el caso de moléculas apolares, la presencia del campo eléctrico, ocasiona que las cargas positivas y negativas de las moléculas se separen ligeramente, convirtiéndola en una molécula polar como puede verse en la siguiente figura.

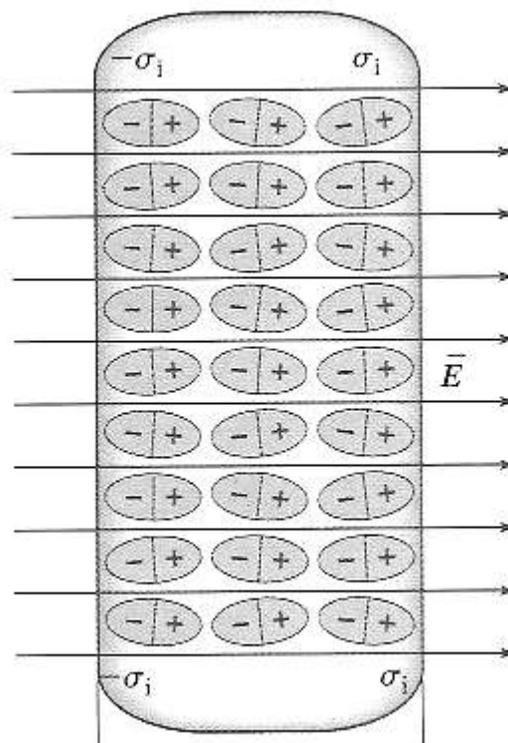


La presencia de un campo eléctrico hace que las moléculas polares (figura a) tiendan a alinearse con él, y cuando las moléculas son apolares (figura b), la presencia de éste, ocasiona que las cargas positivas y negativas de las moléculas se separen ligeramente, lo que en efecto convierte la molécula en polar.

Esta redistribución de carga dentro de las moléculas se conoce como *dipolos inducidos*, y decimos que el dieléctrico se *polariza*. Vale observar que la alineación de las moléculas en el campo eléctrico no es perfecta debido a la agitación térmica que puede, eventualmente, tener el material. En efecto si la agitación térmica es elevada podría perderse ésta característica de *polarización*.

La consecuencia de este proceso de redistribución de la carga causada por el campo eléctrico, origina inducción de una capa de carga en cada superficie de los extremos del material, llamadas **cargas inducidas**. Estas cargas inducidas pueden pensarse como una densidad de carga superficial denotada como σ_i tal como se muestra en la figura.

Nótese como esta densidad de carga inducida genera un campo inducido que se opone al campo eléctrico original pero que no es tan grande como para anularlo por completo, ya que las cargas en el dieléctrico no tienen libertad de moverse indefinidamente (como para en un conductor).



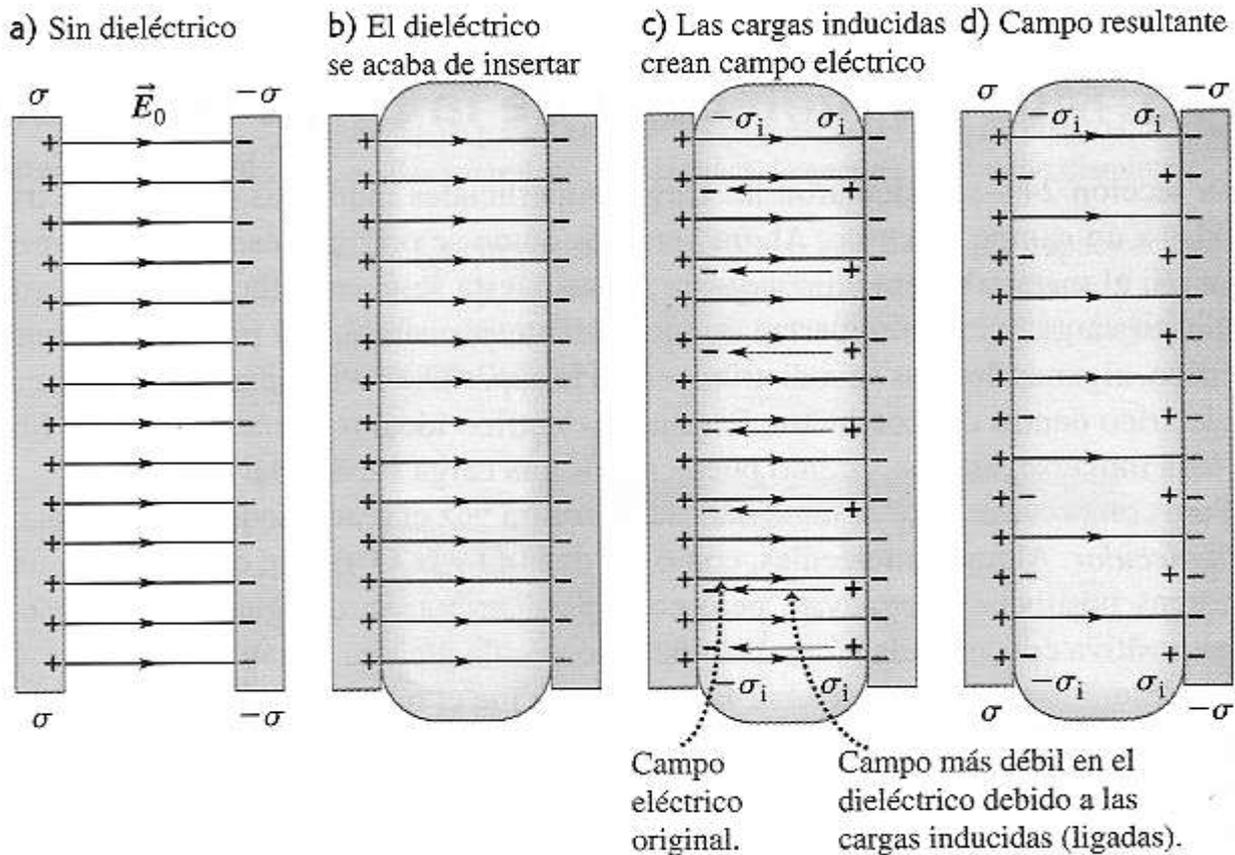
Esto da como resultado, dentro del dieléctrico, un campo eléctrico resultante un tanto menor en intensidad dependiendo de cuanta carga de induzca en el dieléctrico.



12.1 Capacitores con dieléctricos

A continuación se muestra el comportamiento de un trozo de dieléctrico al ser ingresado a un capacitor cargado. La figura:

- Ilustra la situación inicial: un capacitor cargado donde existe un campo eléctrico inicial
- Representa la situación luego de haberse insertado el dieléctrico, pero antes de que ocurra la inducción de las cargas
- Se observa el proceso de polarización y se genera un campo eléctrico inducido que se establece en el dieléctrico debido a la densidad de carga inducida. Este campo es opuesto al original.
- El campo eléctrico resultante disminuyó su magnitud.



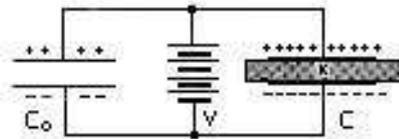
En 1837, Faraday investigó por primera vez el efecto de llenar el espacio vacío que había entre las placas de un capacitor con un dieléctrico y se encontró con dos formas de hacerlo.

- Una vez que el capacitor ha sido cargado se mantiene conectada la fuente y se introduce el dieléctrico. En esta experiencia la diferencia de potencial aplicada al capacitor se mantiene constante.

- b. Una vez que el capacitor ha sido cargado se desconecta la fuente y se introduce el dieléctrico. Aquí al desconectar el capacitor del circuito las cargas no pueden recorrer ningún camino por lo que ésta magnitud permanece constante.

12.2.1 A potencial constante

En el circuito de la figura, la batería suministra la misma diferencia de potencial a cada uno de los capacitores y siendo ambos capacitores iguales en dimensiones se observa que el de la derecha tiene mayor carga.



Capacitor de la izquierda:

$$C_0 = \frac{q_0}{\Delta V}$$

Capacitor de la derecha:

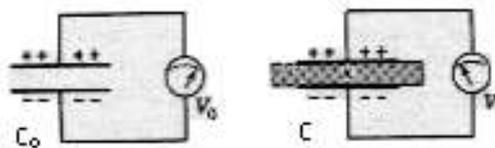
$$C = \frac{q}{\Delta V}$$

Como experimentalmente Faraday observó que $q > q_0$, entonces $C > C_0$.

Nos surge una pregunta: ¿Por qué aumenta la carga? Si ambos capacitores tienen las mismas dimensiones quiere decir que la distancia de separación entre las placas son iguales. Entonces cuando una diferencia de potencial se aplica entre ellos se establecerá un campo eléctrico $E = \Delta V / d$. Como este campo eléctrico debe ser igual en ambos capacitores el capacitor con dieléctrico necesita más cargas libres en sus placas conductoras debido a polarización del dieléctrico.

12.2.2 A carga constante

En lugar de mantener a los dos capacitores con la misma diferencia de potencial inicial, pueden suministrárseles las mismas cargas y comparar el efecto de ingresar un dieléctrico una vez cargados. Se observa que el capacitor de la derecha tiene menor diferencia de potencial que el de la izquierda, como lo indica el voltímetro.



Capacitor de la izquierda:

$$C_0 = \frac{q}{\Delta V_0}$$



Capacitor de la derecha:

$$C = \frac{q}{\Delta V}$$

La relación entre C y C_0 se denomina *permitividad dieléctrica relativa*⁷ (o *constante dieléctrica*), y se nota con la letra K_e y es distinta para cada dieléctrico.

$$K_e = \frac{C}{C_0} \text{ (Permitividad relativa)}$$

Como $C > C_0$, resulta que k_e es siempre mayor que la unidad.

Sabiendo además que:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

Entonces la capacidad de un capacitor cuando se le ingresa un dieléctrico será:

$$C = k_e \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

El producto $K_e \epsilon_0$ se denomina **permitividad del dieléctrico** y se lo nota con:

$$\epsilon = K_e \epsilon_0$$

La siguiente tabla muestra valores de permitividad relativa para algunos materiales:

Dieléctrico	K_e
Vacío	1
Aire (a presión atmosférica)	1,00059
Vidrio	5 a 10
Mica	3 a 6
Polietileno	2.3
Poliestireno (telgopor)	2.6
Petróleo	2
Agua	81

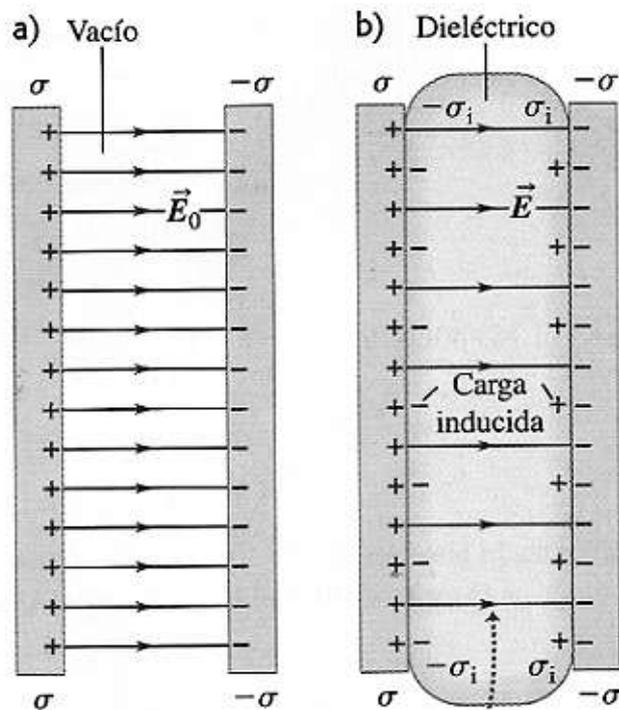
⁷ Relativa a la del vacío, el cual tiene a un valor de $8.85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

Analizaremos ahora, que ocurre con el campo eléctrico entre las placas, cuando se coloca el dieléctrico.

Con vacío (o aire), el campo eléctrico en el espacio comprendido entre las láminas de un capacitor plano es:

$$E_0 = \frac{\Delta V_0}{d} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

La disminución de la diferencia de potencial, cuando se coloca un dieléctrico entre las láminas, implica una disminución del campo eléctrico, lo que significa una reducción de la carga por unidad de área. Como ninguna carga ha abandonado las láminas, esta reducción se debe a cargas de signo opuesto que aparecen sobre las dos superficies del dieléctrico como se indica en la figura.



Para una densidad de carga dada σ , las cargas inducidas en las superficies del dieléctrico reducen el campo eléctrico entre las placas.

Donde:

σ : Carga por unidad de área en las láminas

σ_i : Carga inducida por unidad de área sobre las superficies del dieléctrico

Luego la intensidad del campo eléctrico en el dieléctrico será:

$$E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_0}$$

Teniendo en cuenta el capacitor sin dieléctrico y el capacitor con dieléctrico, podemos comparar y deducir:

Sin dieléctrico	Con dieléctrico
$C_0 = \frac{q}{V_0}$	$C = \frac{q}{V}$
$E_0 = \frac{V_0}{d}$	$E = \frac{V}{d}$



$E_o = \frac{\sigma}{\epsilon_o}$	$E = \frac{\sigma - \sigma_i}{\epsilon_o} = \frac{\sigma}{\epsilon}$
-----------------------------------	--

reemplazando: $K_e = \frac{C}{C_o} = \frac{q/V}{q/V_o} = \frac{V_o}{V} = \frac{E_o \cdot d}{E \cdot d} = \frac{E_o}{E} = \frac{\sigma / \epsilon_o}{\sigma - \sigma_i / \epsilon_o} = \frac{\sigma}{\sigma - \sigma_i} = \frac{\epsilon}{\epsilon_o}$

12.3 Rigidez Dieléctrica

Cuando un material se somete a un campo eléctrico muy intenso puede dar lugar a la ruptura del dieléctrico y entonces el dieléctrico se convierte en conductor. Microscópicamente sucede que el campo eléctrico resulta ser tan intenso que arranca los electrones de sus moléculas y colisionan con otras moléculas provocando la liberación de más electrones. Este efecto se conoce como *avalancha* y puede observarse (muchas veces) en forma de chispa o una descarga en forma de arco. Cuando sucede esto se dice que ocurrió la **ruptura del dieléctrico**.

Estos campos eléctricos intensos son provocados por una diferencia de potencial muy grande entre los extremos del dieléctrico. Es por eso que a los dieléctricos siempre se le tiene que aplicar una diferencia de potencial menor a un valor conocido como **tensión máximo nominal**, que si se la supera se lo puede quemar o perforar (deteriorar).

La magnitud máxima de campo eléctrico a la cual puede someterse un material sin que ocurra la ruptura se denomina *rigidez dieléctrica*⁸. Por ejemplo la rigidez dieléctrica del aire es del orden de $3 \cdot 10^6$ V/m y cuando se lo supera las moléculas de aire se ionizan y ocurre un rayo eléctrico. Estos relámpagos son ejemplos de ruptura dieléctrica (en este caso aire) entre nubes cargadas eléctricamente y el rayo ocurre cuando se rompe el dieléctrico entre una nube cargada y la tierra.

En general, si E_m representa el límite superior del campo eléctrico, el máximo potencial al que puede llevarse un conductor esférico, teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores es:

$$V_m = E_m \cdot R$$

Otro efecto problemático es el producido por las puntas agudas, entendiendo por puntas, una superficie de radio de curvatura muy pequeño. Dado que el potencial máximo es proporcional al radio, incluso potenciales relativamente pequeños aplicados a puntas agudas en el aire producen justamente fuera de ellas campos lo bastante elevados para ocasionar la ionización del aire que las rodea.

13. Aplicaciones técnicas de los capacitores

1) Pantallas Táctiles

En una computadora, una pantalla táctil actúa simultáneamente como un elemento de salida (visual) y de entrada de datos (HID: Human Interface Device). Este tipo de pantallas consta de una estructura transparente colocada encima de la pantalla convencional del equipo. La estructura está formada por dos capas, una de ellas

⁸ Este valor puede variar debido a la temperatura, impurezas, irregularidades, etc del dieléctrico.

flexible, en las que se han grabado tiras transparentes conductoras. Las capas están aisladas entre sí por una matriz rectangular de puntos aislantes y se disponen de tal forma que las tiras son perpendiculares entre sí, formando una matriz de filas y columnas. Estas tiras están conectadas a su vez a un controlador electrónico de filas y de columnas del dispositivo. Cuando el dedo se apoya sobre la pantalla cambia la capacidad de cada fila y de cada columna, permitiendo al controlador (el cual mide la capacidad de cada una de ellas para detectar donde se produce dicha variación) conocer la fila y la columna del punto de contacto.

La pantalla táctil capacitiva se basa en la creación de un campo eléctrico uniforme en el plano de la pantalla mediante electrodos dispuestos según dos ejes perpendiculares en ese plano. Al tocar la pantalla, el campo deja de ser uniforme y el controlador detecta las coordenadas (x,y) del punto de contacto.

2) Micrófonos

Algunos tipos de micrófonos están formados por un capacitor con una de sus láminas (de un espesor aproximado de 0,01 mm) dispuesta de tal forma que vibra cuando una onda sonora incide sobre la misma. Al vibrar la lámina, la distancia entre las placas (del orden de las centésimas de mm) varía, variando la capacidad del condensador.

3) Teclado de computadoras

Algunos teclados de computadoras utilizan teclas que varían la capacidad de un capacitor colocado debajo de la tecla. Al oprimir la tecla varía la distancia entre las placas, variando la capacidad del capacitor. Esta variación dispara el circuito electrónico necesario para codificar la información de la tecla correspondiente.

4) Otros Usos

Los capacitores son muy utilizados en los circuitos eléctricos. Por ejemplo se emplean para eliminar la chispa que se produce al interrumpir la corriente que recorre un circuito con autoinducción, como lo llevan los motores de los automóviles en su sistema de encendido. Los capacitores variables se usan en los circuitos de sintonía de los receptores de radio y televisión, y los fijos para muchísimos circuitos electrónicos, como filtros de frecuencia, amplificadores, etc.

Grandes capacitores son empleados para corregir el factor de potencia de la corriente alterna que alimenta a los motores eléctricos. También mediante capacitores convenientes, se corrige el retraso de propagación de los sonidos de distintas frecuencias en las líneas telefónicas que recorren largas distancias, evitando que se altere la fidelidad de la conversación.

Para los físicos el interés sobre los capacitores está basado en que con los mismos se puede:

- a- establecer las configuraciones de campos eléctricos que se requieren para diversos propósitos.
- b- Concentrar campos eléctricos intensos en pequeños volúmenes pudiendo utilizarse como dispositivos útiles para el almacenamiento de la energía.



Problemas aplicativos

Cuestiones

1. Si se aproximan dos cuerpos, uno cargado y el otro descargado ¿Existirá una fuerza de origen eléctrico entre ellos? ¿Por qué?
2. Explique detalladamente como es el proceso de carga por inducción cuando se acerca una barra cargada positivamente a una esfera conductora.
3. Explique detalladamente cómo es que una regla de plástico cargada por frotamiento puede levantar pequeños trozos de papel si estos no están cargados.
4. Una esfera metálica sin carga cuelga de un hilo de nylon. Cuando se acerca a la esfera metálica una barra de vidrio con carga positiva, la esfera es atraída hacia la barra. Pero si la esfera toca la barra, de pronto se aleja violentamente de ella. Explique por qué la esfera es atraída primero y luego repelida.
5. Algunos de los electrones libres de un buen conductor (como un trozo de cobre, por ejemplo) se desplazan con una rapidez de 10^6 m/s o más. ¿Por qué estos electrones no escapan volando del conductor?
6. Los buenos conductores eléctricos, como los metales, son típicamente buenos conductores del calor; los aisladores eléctricos, como la madera, son típicamente malos conductores del calor. Explique por qué tendría que haber una relación entre la conducción eléctrica y la conducción térmica en estos materiales.
7. Se puede cubrir un recipiente con película de plástico para alimentos estirando el material sobre la parte superior y presionar el material colgante contra los costados. ¿Qué es lo que hace que se adhiera? (Sugerencia: La respuesta tiene que ver con la fuerza eléctrica.) ¿Se adhiere la película de plástico a sí misma con la misma tenacidad? ¿Por qué? ¿Se obtiene el mismo resultado con recipientes metálicos? Nuevamente, ¿por qué?
8. Dos cargas puntuales iguales ejercen fuerzas iguales una sobre la otra. Pero si una carga es el doble de la otra, ¿siguen ejerciendo fuerzas iguales una sobre la otra, o una ejerce dos veces más fuerza que la otra?
9. Se coloca un protón en un campo eléctrico uniforme y luego se libera. Después se coloca un electrón en el mismo punto y se libera. ¿Experimentan estas dos partículas la misma fuerza? ¿Y la misma aceleración? ¿Se desplazan en la misma dirección al ser liberadas?
10. ¿Qué semejanzas presentan las fuerzas eléctricas con las fuerzas gravitatorias? ¿Cuáles son las diferencias más significativas?
11. Los núcleos atómicos se componen de protones y neutrones. Esto demuestra que debe existir otro tipo de interacción además de las fuerzas gravitatorias y eléctricas. Explique este hecho.
12. Un conductor esférico pequeño, neutro, se coloca entre las placas de un capacitor de placas paralelas grande, cargado. Describa el campo eléctrico y las equipotenciales en el espacio intermedio

13. ¿Qué sucede con la carga de un condensador si se duplica el potencial entre sus placas?
14. Un condensador cargado tiene una carga neta cero en sus armaduras ¿Qué almacena entonces?

Problemas de Ley de Coulomb

1-La fuerza electrostática entre dos iones semejantes que se encuentran separados a una distancia de $5 \cdot 10^{-10} \text{m}$ es de $3,7 \cdot 10^{-9} \text{N}$.

a-¿Cuál es la carga de cada uno de los iones?

b-¿Cuál es el defecto de electrones en cada uno de los iones?

R: a) $3,2 \cdot 10^{-19} \text{C}$ b) 2

2-La distancia de separación entre el electrón y el protón en el átomo de hidrógeno es de aproximadamente $5,3 \cdot 10^{-11} \text{m}$. ¿Cuáles son las magnitudes de:

a-la fuerza eléctrica.

b-la fuerza gravitacional entre estas dos partículas. ($G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$)

R: a) $8,1 \cdot 10^{-8} \text{N}$ b) $3,7 \cdot 10^{-47} \text{N}$

3-Las cargas y las coordenadas de dos partículas cargadas localizadas en el plano xy son:

$q_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{C}$; $x = 3,5 \text{ cm}$; $y = 0,5 \text{ cm}$; $q_2 = -4 \cdot 10^{-6} \text{C}$; $x = -2 \text{ cm}$; $y = 1,5 \text{ cm}$.

a-Encuentre la magnitud y la dirección de la fuerza sobre q_2 .

b-En dónde se debería colocar una tercera carga $q_3 = 4 \cdot 10^{-6} \text{C}$, para que la fuerza total sobre q_2 fuera cero.

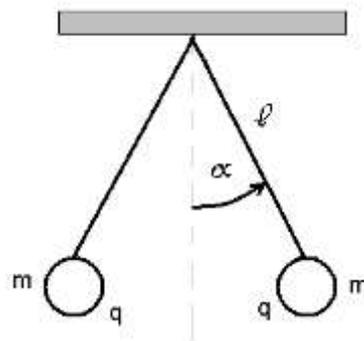
R: a) $34,56 \text{N}$ b) $0,064 \text{m}$

4-Dos esferas muy pequeñas cada una de las cuales pesa $3 \cdot 10^{-5} \text{N}$, están sujetas a hilos de seda de $5 \cdot 10^{-2} \text{m}$ de longitud y cuelgan en un punto común. Cuando se suministra a las esferas una cantidad igual de carga negativa, cada hilo forma un ángulo de 30° con la vertical.

a) Calcule el valor de las cargas de las esferas.

b) ¿Cómo se redistribuye la configuración si luego a una de las carga se le duplica la cantidad de carga negativa?

R: $2,19 \cdot 10^{-9} \text{C}$.



5-Dos partículas con igual carga y separadas $3,2 \cdot 10^{-3} \text{m}$ se dejan en libertad estando en reposo. En el instante cuando se las suelta se observa en la primera partícula una



aceleración de 7m/s^2 y en la segunda una de 9m/s^2 . Si la masa de la primera partícula es de $6,3 \cdot 10^{-7}\text{ kg}$, cuales son:

a-la masa de la segunda partícula.

b-la carga de la segunda partícula

R: a) $4,9 \cdot 10^{-7}\text{kg}$. b) $7 \cdot 10^{-11}\text{C}$.

Problema de Campo eléctrico

6-Un pequeño objeto que tiene una carga de $-5 \cdot 10^{-19}\text{C}$, experimenta una fuerza hacia debajo de $20 \cdot 10^{-9}\text{N}$ cuando se coloca en un cierto punto en un campo eléctrico.

a-¿Cuál es la intensidad del campo en dicho punto? (Ignore los efectos gravitatorios)

b-¿Cuál sería la magnitud y sentido de la fuerza que actuaría sobre una partícula α colocada en dicho punto? Datos de α $q= 2 \cdot e$ $m=6,68 \cdot 10^{-27}\text{kg}$.

R: a) $4 \cdot 10^{10}\text{ N/C}$ b) $12,8 \cdot 10^{-9}\text{N}$ (para arriba)

7-Una carga de $16 \cdot 10^{-9}\text{C}$ está fija en el origen de coordenadas, una segunda carga de valor desconocido está en $x=3\text{m}$; $y= 0$ y una tercera carga de $12 \cdot 10^{-9}\text{C}$ está en $x=6\text{m}$, $y=0$. ¿Cuál es el valor de la carga desconocida si el campo resultante en $x=8\text{m}$, $y=0$ es $E=(20,25 ; 0)\text{N/C}$?

R: $-25 \cdot 10^{-9}\text{C}$

8-En cada uno de los vértices de un triángulo equilátero de 20cm de lado se coloca un electrón.

a-¿Cuál es el campo eléctrico en el punto medio de uno de los lados?

b-¿Qué fuerza experimentaría otro electrón colocado en ese punto?

R: a) $0,048 \cdot 10^{-6}\text{ N/C}$ b) $7,68 \cdot 10^{-27}\text{N}$. (hacia afuera).

9-Dos cargas, $q_1=2,1 \cdot 10^{-8}\text{C}$ y $q_2= -4q_1$ se encuentran separadas una distancia de 50cm . Determinar en que punto, a lo largo de la línea que los une el campo eléctrico es cero.

R: $0,5\text{m}$ (a la izquierda de q_1).

10-Dos láminas paralelas separadas 2cm , se conectan a una batería obteniéndose un campo eléctrico en el espacio comprendido entre las láminas de $1 \cdot 10^4\text{ N/C}$ de intensidad y dirigido verticalmente hacia arriba.

a-¿Qué velocidad adquirirá un electrón partiendo del reposo cuando haya recorrido 1cm ?

b-¿Cuál será su energía cinética?

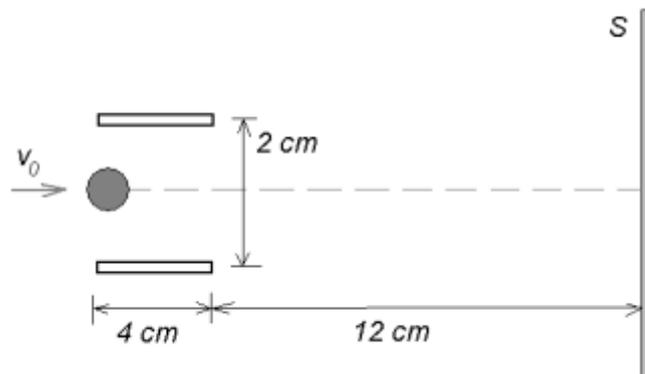
c-¿Cuánto tiempo necesita para recorrer esa distancia?

R: a) $6 \cdot 10^6\text{m/s}$ b) $1,6 \cdot 10^{-17}\text{J}$ c) $3,3 \cdot 10^{-9}\text{s}$

11- En la figura un electrón es lanzado en la dirección del eje central, entre las láminas de un tubo de rayos catódicos, con una velocidad inicial de $2 \cdot 10^7\text{m/s}$. El campo eléctrico uniforme entre las láminas tiene una intensidad de 20000 N/C dirigido hacia arriba.

- a- ¿Cuánto habrá descendido el electrón por debajo del eje, cuando alcance el borde de las láminas?
 b- ¿Qué ángulo formará la velocidad del electrón con el eje cuando abandone las láminas?
 c- ¿A qué distancia por debajo del eje alcanzará la pantalla S?

R: a) 0,703 cm b) 19,36° c) 4,92cm



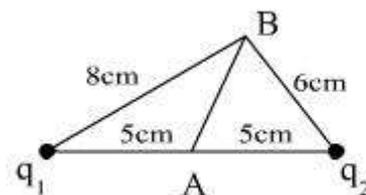
- 12- En el espacio comprendido entre dos láminas planas paralelas, cargadas con cargas iguales y opuestas, existe un campo eléctrico uniforme. Un electrón es abandonado en reposo sobre la lámina cargada negativamente y llega a la superficie de la lámina opuesta, situada a 2 cm de distancia de la primera, al cabo de $1,5 \cdot 10^{-8}$ s. Calcula:

- a) la intensidad del campo eléctrico.
 b) la velocidad del electrón cuando llega a la segunda lámina.
 R: a) 1010 N/C b) $2,67 \cdot 10^6$ m/s

Problemas de Potencial Eléctrico

- 13- Dos cargas puntuales $q_1 = 40 \cdot 10^{-9}$ C y $q_2 = -30 \cdot 10^{-9}$ C se encuentran ubicadas como indica la figura. Calcula:

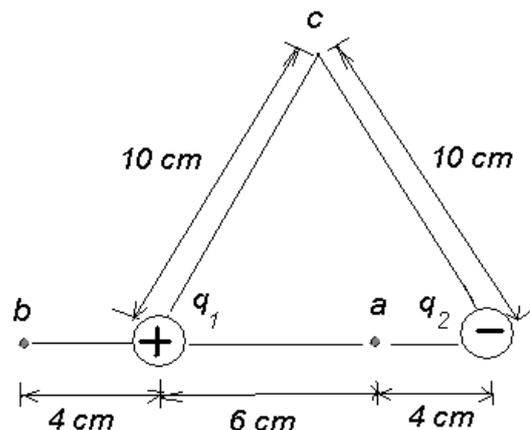
- a) el potencial en el punto A.
 b) el potencial en el punto B.
 c) el trabajo necesario para transportar una carga de $25 \cdot 10^{-9}$ C desde el punto B hasta el A.



- 14- ¿Qué trabajo será necesario para traer una carga positiva de $1 \cdot 10^{-9}$ C desde el infinito a cada uno de los puntos A; B y C de la figura?
 ¿Qué interpretación tiene el signo del trabajo?

$q_1 = 12 \cdot 10^{-9}$ C $q_2 = -12 \cdot 10^{-9}$ C

R: $-9 \cdot 10^{-7}$ J ; $19,3 \cdot 10^{-7}$ J ; 0





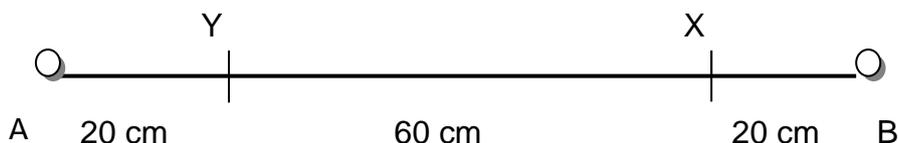
15- Los dos electrodos planos, paralelos y horizontales de una válvula de vacío distan 2 cm y están conectados a 120 V. Halla:

- la intensidad del campo eléctrico en el espacio comprendido entre las dos placas.
- la fuerza constante que actúa sobre un electrón situado entre los electrodos.
- la energía adquirida por un electrón que sale del cátodo y se dirige al ánodo a 2 cm de aquél.
- la relación entre la fuerza eléctrica y la gravitatoria para un electrón situado en el campo existente entre los electrodos.

R: a) 6000 V/m b) $9,600 \cdot 10^{-16}$ N c) $192 \cdot 10^{-19}$ J d) $107,65 \cdot 10^{12}$

16- En los puntos A y B se colocan cargas eléctricas de $200 \mu\text{C}$ y $-100 \mu\text{C}$ respectivamente, siendo la distancia entre ambas de 100 cm y el medio existente, aire.

- calcula el trabajo necesario para trasladar una carga de 5 nC desde el punto X hasta el punto Y.
- determina cuál de los dos puntos está a mayor potencial.



R: a) $50625 \cdot 10^{-7}$ J b) $V_y > V_x$

17- Dos láminas paralelas separadas 4 cm mantienen una diferencia de potencial de 1600 V. Se abandona un electrón desde la lámina negativa en el mismo instante en que se abandona un protón desde la lámina positiva.

- ¿A qué distancia de la lámina positiva se cruzarán?
- ¿Qué relación habrá entre sus velocidades cuando alcancen las láminas opuestas?

R: a) $2,18 \cdot 10^{-3}$ cm b) 42,7

18- Un campo eléctrico está generado en el vacío por una carga eléctrica puntual $q = -6 \cdot 10^{-5}$ C. Dos puntos A y B pertenecen a la misma línea de fuerza y distan respectivamente 2m y 6m de la carga generadora. Una partícula de masa 1 g se desplaza sobre esa línea de fuerza desde A hacia B. Calcula con qué velocidad pasa por B, si la velocidad en A era de 2 m/s. La carga de la partícula es $q' = 1 \cdot 10^{-8}$ C.

R: 0,63 m/s

19- Una esfera conductora de 40 cm de radio, en equilibrio electrostático; posee una carga eléctrica de $8 \cdot 10^{-9}$ C. Determina el campo eléctrico y el potencial en puntos ubicados a: 2m; 0,4 m; 0,2 m del centro de la esfera.

R. 18 N/C, 36 V ; 450 N/C, 180V; 0; 180 V

Problemas de Capacitores

20-Dos láminas de un capacitor plano están separadas 1mm y tienen 1m^2 de área. Las láminas se encuentran en el vacío. Se aplica al capacitor una diferencia de potencial de 12000 V. Calcula:

a-la capacidad.

b-la carga de cada lámina.

c-la intensidad del campo eléctrico.

R: a) $8,85 \cdot 10^{-9}\text{F}$ b) $106,2 \cdot 10^{-6}\text{C}$ c) $12 \cdot 10^6 \text{ N/C}$

21-Un capacitor de $6\mu\text{F}$ se conecta en serie con otro de $4\mu\text{F}$ y entre ellos se aplica a diferencia de potencial de 200V.

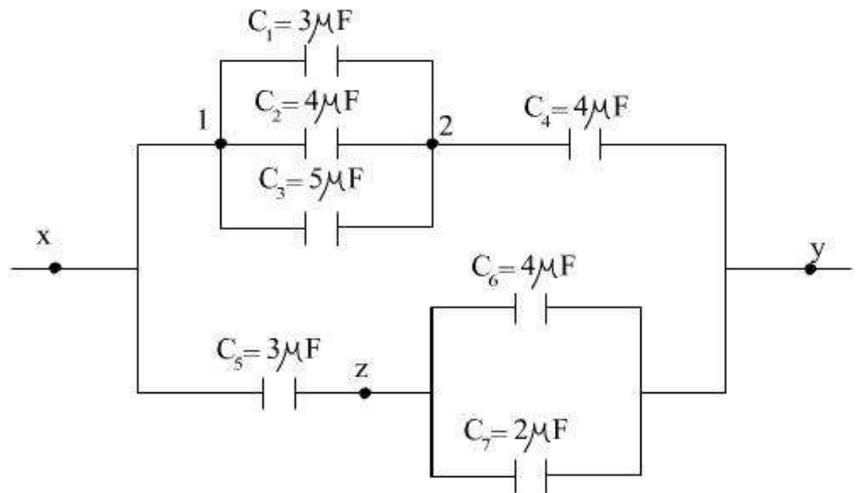
a- ¿Cuál es la carga sobre cada capacitor?

b- ¿Cuál es la diferencia de potencial entre cada capacitor?

R: a) $4,8 \cdot 10^{-4}\text{C}$ b) 80V 120V

22- a- Determina la capacidad equivalente entre x e y.

b- Si la carga sobre el capacitor de $5\mu\text{F}$ es de $120\mu\text{C}$, cuál es la diferencia de potencial entre x y z.



R: a) $5 \cdot 10^{-6}\text{F}$ b) 64V

23-Un capacitor de $1\mu\text{F}$ y otro de $2\mu\text{F}$ se conectan en serie a fuente 1200V.

a-Calcula la carga de cada capacitor y su ddp.

b-Los capacitores cargados se desconectan de la red y ellos entre sí, y se vuelven a conectar en paralelo, con las armaduras del mismo signo unidas. Calcula la carga y el voltaje de cada uno.

R: a) $8 \cdot 10^{-4}\text{C}$, 800V 400V b) $5,33 \cdot 10^{-4}\text{C}$ $10,66 \cdot 10^{-4}\text{C}$ 533V

24-Un capacitor de $1\mu\text{F}$ y otro de $2\mu\text{F}$ se conectan en paralelo en una línea de 1200V.

a-Calcula la carga de cada capacitor y su ddp.

b-Los capacitores cargados se desconectan de la red y ellos entre sí, y se vuelven a conectar en paralelo, con las armaduras de distinto signo juntas. Calcula la carga final de cada uno y su ddp.

R: a) $1,2 \cdot 10^{-3}\text{C}$ y $2,4 \cdot 10^{-3}\text{C}$ 1200V b) $4 \cdot 10^{-4}\text{C}$ $8 \cdot 10^{-4}\text{C}$ 400 V



25-Un capacitor de $20\mu\text{F}$ está cargado a una diferencia de potencial de 1000V . Las armaduras de dicho capacitor se conectan en paralelo a uno descargado de $5\mu\text{F}$.

Determina:

a-la carga inicial del sistema.

b-la diferencia de potencial final entre las armaduras de cada capacitor.

c-la disminución de energía cuando se conectan los capacitores.

R: a) $2 \cdot 10^{-2}\text{C}$ b) 800V c) 2 J

26-Un capacitor se compone de dos láminas paralelas de 25 cm^2 de superficie, separadas una distancia de $0,2\text{cm}$. La sustancia interpuesta entre las láminas tiene un coeficiente dieléctrico de 5. Las láminas del capacitor están conectadas a una fuente de 300V .

a-¿Cuál es la capacidad del capacitor?

b-¿Cuál es la carga de cada lámina?

c-¿Cuál es la energía del capacitor cargado?

R: a) $5,53 \cdot 10^{-11}\text{F}$ b) $1,659 \cdot 10^{-8}\text{C}$ c) $2,5 \cdot 10^{-6}\text{J}$

27-Dos láminas paralelas de 100 cm^2 de superficie tienen cargas iguales y opuestas de $1 \cdot 10^{-7}\text{C}$.

El espacio comprendido entre las láminas está ocupado por un dieléctrico y la intensidad del campo dentro del mismo es $3,3 \cdot 10^5 \text{ V/m}$.

a-¿Cuál es el coeficiente dieléctrico del dieléctrico?

b-¿Cuál es la carga inducida total sobre cada cara del mismo?

R: a) 3,424 b) $7,079 \cdot 10^{-6} \text{ C/m}^2$

28-Dos láminas conductoras, cargadas con cargas contrarias, que tienen numéricamente igual cantidad de carga por unidad de área, están separadas por un dieléctrico de 5 mm de espesor, y coeficiente dieléctrico 3. El campo eléctrico resultante es $1 \cdot 10^6 \text{ V/m}$. Calcula:

a-La carga libre por unidad de superficie en las láminas.

b-la carga inducida por unidad de superficie en el dieléctrico.

R: a) $2,66 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$ b) $1,77 \cdot 10^{-5} \text{ C/m}^2$

29-El papel dieléctrico, en un capacitor de hoja metálica, tiene $0,005 \text{ cm}$ de espesor. Su coeficiente dieléctrico es 2,5 y su rigidez dieléctrica $50 \cdot 10^6 \text{ V/m}$.

a-¿Qué superficie de papel, y de hoja de estaño, se necesita para construir un capacitor de $0,1\mu\text{F}$?

b-Si la intensidad del campo eléctrico en el papel no excede de la mitad de la rigidez dieléctrica, ¿cuál es la máxima diferencia de potencial que puede aplicarse al capacitor?

R: a) $0,226 \text{ m}^2$ b) 1250V

Trabajo Práctico

Título: Fenómenos Electroestáticos

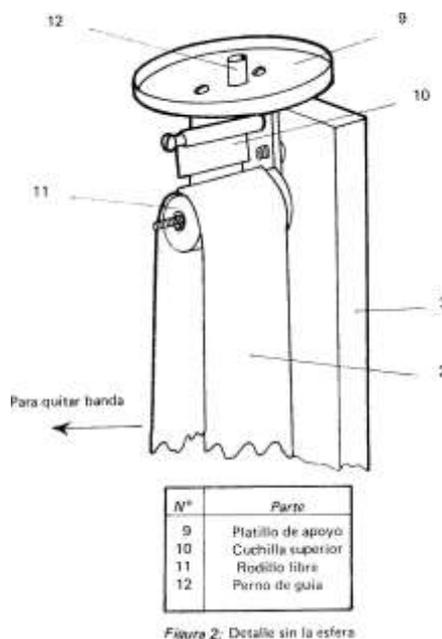
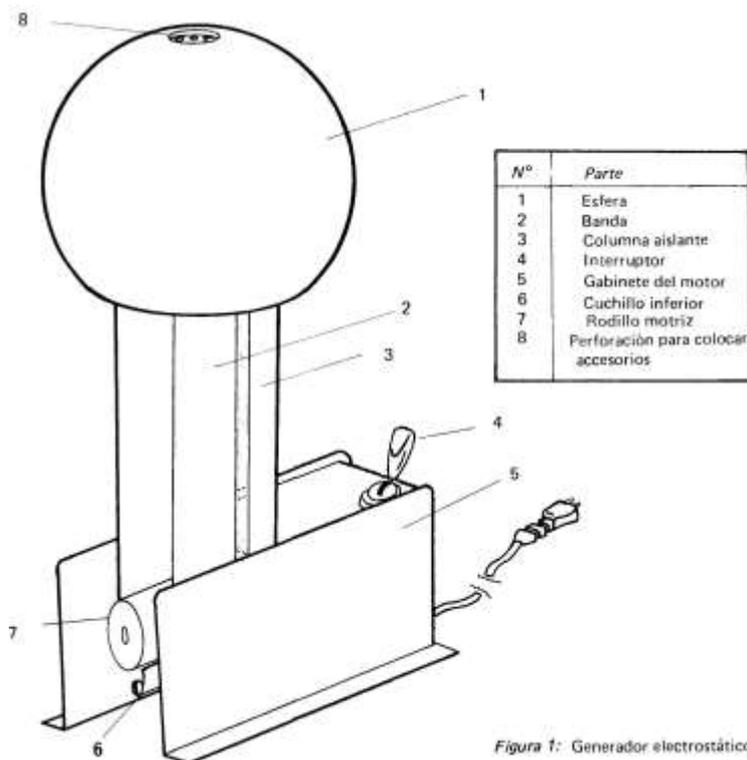
Objetivos:

- Comprender el funcionamiento del generador de Van de Graaff.
- Observar fenómenos de atracción y repulsión eléctrica.
- Visualizar efectos de punta.
- Analizar el funcionamiento de distintos dispositivos.
- Vincular los fenómenos electrostáticos observados en el laboratorio, con fenómenos cotidianos.

Introducción teórica

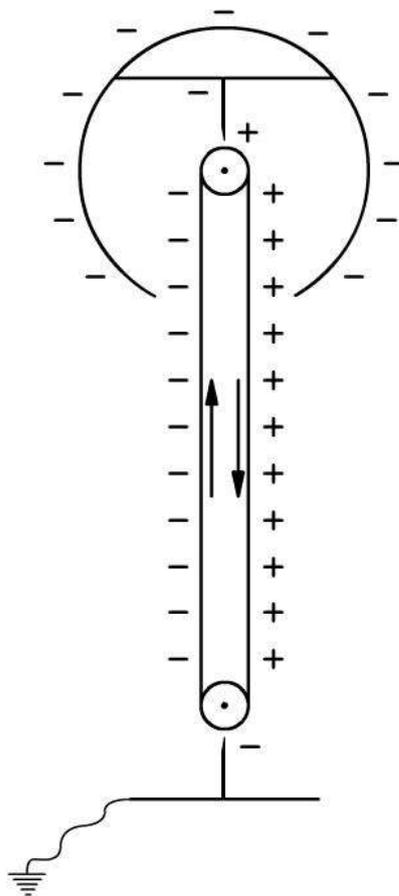
El generador electrostático fue ideado por Lord Kelvin en 1890 y fue llevado a la práctica por: R. J. Van de Graaff en 1931. Es un dispositivo que puede producir diferencias de potencial eléctrico del orden de varios millones de voltios. Su aplicación principal en la física es el uso de esas diferencias de potencial para acelerar partículas cargadas hasta energías muy altas. Los haces de partículas energéticas producidas de esta manera, pueden utilizarse en una gran variedad de experimentos de colisiones atómicas.

Funcionamiento:





El generador de Van de Graaff está representado en las figuras 1 y 2. Consta de un conductor esférico hueco (1) soportado por una columna aisladora (3). Una banda de transmisión (2) pasa por los rodillos, el superior (11) o rodillo libre (de grilón) y el inferior (7) o rodillo motriz (de acrílico).



Al friccionar el rodillo inferior con la banda hace que ésta adquiera cargas negativas, las cuales son transportadas hacia arriba hasta la cuchilla superior (10) en donde se inducen cargas positivas y las cargas negativas se distribuyen sobre el conductor esférico hueco.

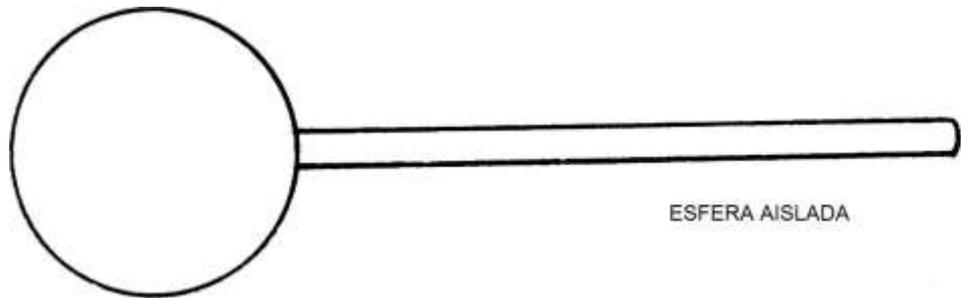
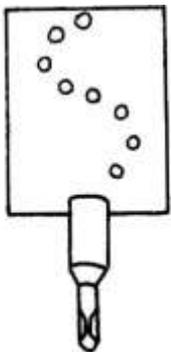
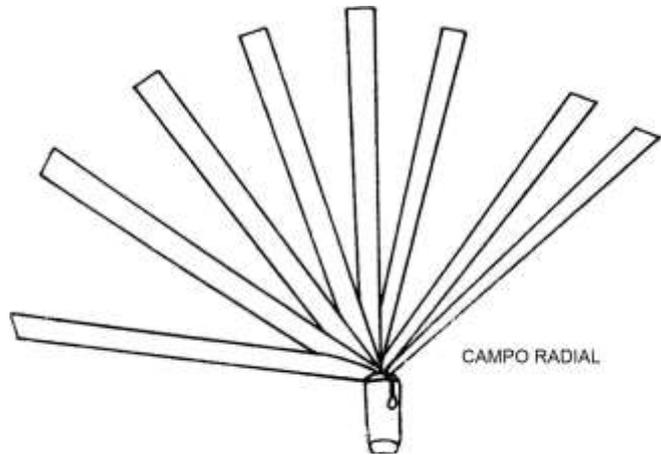
Alrededor de la cuchilla superior, que adquiere un potencial muy alto, el aire se ioniza y saltan electrones desde la banda hacia la misma.

La carga en la superficie de la esfera crece hasta cierto límite, determinado por pérdidas a través de chispas y fugas a través del aire, puesto que el campo eléctrico de ruptura es aproximadamente: $3 \cdot 10^6$ V/m y para este campo el aire se transforma en conductor.

La cuchilla inferior (6) está construida análogamente a la superior y se mantiene a un potencial negativo por medio de una conexión a tierra que sirve para aumentar la cantidad de cargas negativas inducidas; alrededor de ésta el aire se ioniza y saltan a la banda, electrones provenientes de tierra. Estos electrones se suman a los obtenidos por la fricción del rodillo con la banda, cerrándose de esta manera el ciclo.

Materiales

- Generador de Van de Graaff
- Jaula de Faraday
- Electroscopio de láminas
- Electroscopio de aguja
- Descargador esférico con lamparita de neón.
- Campo radial
- Esfera aislada
- Camino eléctrico
- Transporte de carga.
- Molinete eléctrico
- Tubo fluorescente
- Accesorios de conexión.

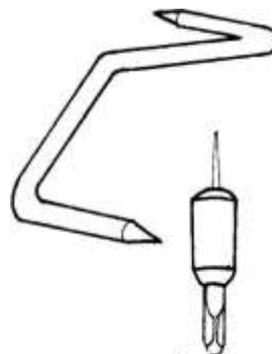


CAMINO ELÉCTRICO

ESFERA AISLADA



TRANSPORTE DE CARGAS



MOLINETE ELÉCTRICO



Procedimiento

-El docente del laboratorio mostrará el generador de Van de Graaff, describiendo las distintas partes que lo componen y luego explicará su funcionamiento.

-Pondrá en marcha el generador y utilizando los distintos accesorios analizará y discutirá con los alumnos los fenómenos observados:

*acercará el descargador esférico con la lamparita de neón, la esfera aislada, el electroscopio de hojas y luego sobre el mismo se colocará la jaula de Faraday; el tubo fluorescente.

*colocará sobre la esfera del generador el accesorio de campo radial, el molinete eléctrico, el camino eléctrico y el transporte de carga.

Los alumnos participarán en la generación de los distintos fenómenos.

Cuestionario

1-¿Por qué los rodillos del generador de Van de Graaff son de distinto material?

2-Explica el fenómeno denominado “efecto de puntas”

3-Describe una experiencia en la cual se pueda determinar el signo de la carga del generador.

4-¿Tiene influencia el tamaño del colector en la acumulación de cargas? Justifica.

5-¿Qué es un electroscopio?

6-¿Para qué se utiliza la jaula de Faraday?

7-¿Puede existir un campo eléctrico sin carga eléctrica?

8-En el interior de la esfera conductora del generador, cómo son el campo eléctrico y el potencial eléctrico?

9-El potencial que puede alcanzar un cuerpo cargado, depende de que su superficie sea lisa? ¿Por qué? Justifica.

10-Cuando utilizamos el accesorio trayecto eléctrico, es arbitrario el trayecto seguido por las descargas eléctricas?

11-¿Las cargas eléctricas pueden realizar trabajo? Si piensa que sí, ¿cómo y qué energía dá origen a este trabajo? Cita un ejemplo realizado en el laboratorio.

12-Explica el funcionamiento del molinete eléctrico.

El informe deberá contener

- Descripción del generador y su funcionamiento
- Descripción de los fenómenos observados, con los materiales utilizados en cada uno de ellos.
- Cuestionario

Anexo 1: Unidades, Constantes, Múltiplos y Prefijos de unidades métricas.

Los prefijos se utilizan cuando la unidad de medida es muy grande o muy chica en comparación con los órdenes de magnitud con lo que se suele trabajar. Los prefijos que son múltiplos de 3 (tanto negativos como positivos) se denominan ingenieriles y pueden obtenerse fácilmente con el botón **ENG** de cualquier calculadora científica.

Múltiplo	Prefijo y abreviatura
10^{24}	Y – yota
10^{21}	Z – zeta
10^{18}	E – exa
10^{15}	P – peta
10^{12}	T – tera
10^9	G – giga
10^6	M – mega
10^3	k– kilo
10^2	h – hecto
10	da – deca
$10^0 = 1$	Unidad Patrón
10^{-1}	d – deci
10^{-2}	c – centi
10^{-3}	m – mili
10^{-6}	μ – micro
10^{-9}	n – nano
10^{-12}	p – pico
10^{-15}	f – femto
10^{-18}	a – ato
10^{-21}	z – zepto
10^{-24}	y – yocto

Algunas constantes física de interés en electrostática

Cantidad	Valor
Permitividad del vacío	$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$
Constante de gravitación universal	$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$
Constante eléctrica	$k = 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$

Unidades útiles del capítulo

Magnitud	Unidad	Simbolo
Fuerza	Newton	N
Carga Eléctrica	Coulomb	C
Trabajo y Energía	Joule	J
Potencia	Vatios o Watts	$W = \text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
Diferencia de potencial	Voltio	$V = \text{J} \cdot \text{C}^{-1}$
Campo Eléctrico		$\text{V} \cdot \text{m}^{-1} = \text{N} \cdot \text{C}^{-1}$
Capacidad	Faradio	$F = \text{C} \cdot \text{V}^{-1}$