

CAPÍTULO XI

ELECTROSTÁTICA

ATRACCIONES Y REPULSIONES ELÉCTRICAS - INDUCCIÓN ELECTROSTÁTICA - MÁQUINAS ELÉCTRICAS

§ 205.—Electricidad por frotamiento.—Se atribuye a Tales de Mileto (640 a 548 a. C.) el haber descubierto que un trozo de *ámbar* frotado con un paño o una piel adquiere la propiedad de atraer cuerpos livianos. Sólo desde una época relativamente reciente (W. Gilbert, 1540 - 1603) se comprobó

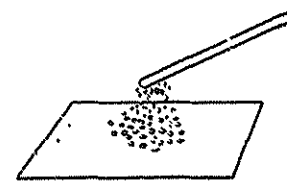


Fig. 321.—Una barra de lacre frotada, atrae pequeños trozos de papel.

que no sólo el *ámbar*, sino muchos otros cuerpos, como el vidrio y la resina, la ebonita, el lacre, el azufre, etc., presentan la citada propiedad de atraer cuerpos livianos después de ser frotados.

Se dice entonces que han sido *electrizados por frotamiento*.

Se acepta que ha aparecido en ellos una *cantidad de electricidad* o una cierta *carga eléctrica*, que es la causa de las atracciones.

El nombre electricidad proviene del nombre griego del *ámbar*: *electrón*.

Una barra de lacre frotada con un paño de lana (fig. 321) atrae trocitos de papel, de cerda u otros objetos livianos, los que se elevan desde la mesa en que están, para adherirse a la parte sometida a la fricción, en la que parece estar distribuida la *electricidad*.

§ 206.—Péndulo eléctrico - Atracciones y repulsiones.—Un trocito de médula de saúco cortado dándole forma aproximadamente esférica, suspendido mediante un hilo de seda de

un soporte de vidrio (fig. 322), constituye un *péndulo eléctrico*. Con él puede comprobarse que los cuerpos electrizados por frotamiento, además de las atracciones mencionadas, producen también repulsiones.

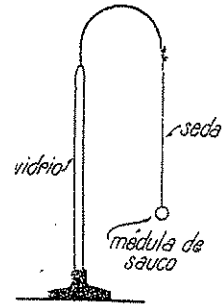


Fig. 322.—Péndulo eléctrico para reconocer el estado de electrización.

Si aproximamos la barra de lacre frotada de la (fig. 321) a la esferita de médula de saúco del péndulo, éste se moverá hasta adherirse a la parte frotada (atracción); pero, después de un corto intervalo de contacto, será repelida. Se acepta para explicar el hecho que la esferita ha tomado parte de la electricidad que tenía la barra frotada y que ambas cargas eléctricas se repelen.

§ 207.—Electricidad positiva y negativa.—Si se frota una barra de vidrio bien seca con una piel de gato o un paño de lana y se la acerca a la esferita de médula de saúco de un péndulo eléctrico, se observará, después de la atracción inicial, la repulsión producida al cargarse la esferita con la electricidad del vidrio frotado. Aproximando a la esferita así cargada, una barra de resina frotada, se comprobará que es atraída.

Para explicar estos hechos hay que admitir que existen dos clases de electricidad y que cuerpos con cargas eléctricas de igual especie se repelen, mientras que los que tienen cargas de distinta clase se atraen.

A la electricidad que adquiere el vidrio frotado se la llama *electricidad vítrea* o *electricidad positiva*, atribuyéndole el signo + al representarla.

La electricidad de la resina frotada se llama *electricidad negativa*, representándosela con el signo —.

La fig. 323 describe gráficamente la experiencia con indicación de los signos atribuidos a las dos electricidades.

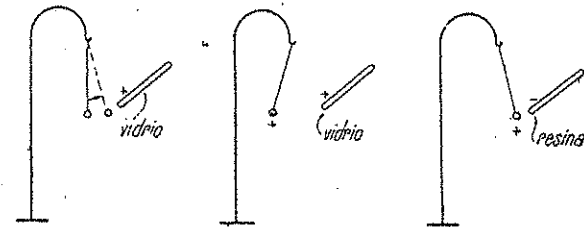


Fig. 323.—Las dos electricidades: a) el vidrio frotado atrae al péndulo; b) después de tocarlo lo rechaza; c) la resina frotada lo atrae.

§ 208.—Electroscopio de hojas metálicas - *Electrómetro*.—Este aparato consta esencialmente de una varilla metálica, con

dos livianas hojuelas también metálicas (de oro o de aluminio, por lo general) colocadas en su parte inferior (fig. 324).

La varilla termina superiormente por una pequeña esfera, y está colocada dentro de un recipiente de vidrio que le sirve de soporte y que tiene una abertura en su parte superior por donde pasa la varilla del electroscopio.

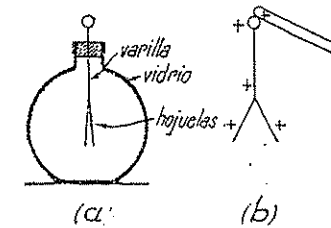


Fig. 324.—Electroscopio de hojuelas para estudiar la electrización.

Al tocar con un cuerpo electrizado la esferita, las hojuelas se cargan con electricidad del mismo nombre (positiva en el caso de la fig. 324), y se repelen, abriéndose. Agregando una escala graduada puede medirse la separación de las hojas; el aparato se denomina entonces *electrómetro*.

En este caso la caja que contiene las hojuelas se hace metálica, para que las indicaciones no se encuentren afectadas por los fenómenos de influencia (§ 215) y puedan compararse. Las hojas se aíslan con un tapón de ámbar. La fig. 325 muestra un modelo de *electrómetro* con una hoja rígida y otra móvil.

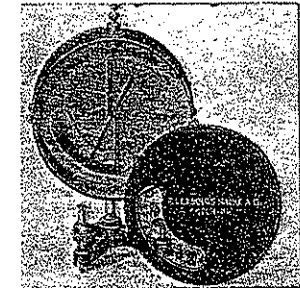


Fig. 325.—Electrómetro para mediciones electrostáticas.

§ 209.—Conductores y aisladores.—Hay cuerpos que transmiten fácilmente la electrización; son los *conductores* o *buenos conductores*.

Uniéndolo un extremo de una varilla o de un alambre de cobre a un electroscopio y tocando el otro con un cuerpo electrizado (fig. 326 a), las hojuelas divergen indicando que la electrización ha pasado a través del cobre. Empleando una varilla de vidrio bien seca se ve que no transmite la electrización (fig. 326 b), pues las hojas no divergen.

Humedeciendo la varilla, las hojas revelan el paso de una carga; algo parecido ocurriría con un hilo de lino, comprobándose así que estos cuerpos pueden pasar de la calidad de malos a la de buenos conductores.

El cobre, la plata, los metales en general, son buenos *conductores*. El vidrio seco, el ámbar, la seda, la parafina, la resina, el azufre, la porcelana, figuran entre los cuerpos llamados *malos conductores* o *aisladores*.

El aire seco es mal conductor, pues a través de él no pasa

hasta el electroscopio la carga de la varilla frotada. El cuerpo humano es buen conductor.

Uniendo a la tierra un electroscopio cargado, mediante un buen conductor, las hojas se cierran, pues la electricidad que tenía se reparte entre él y la tierra, reduciéndose prácticamente a cero la que le queda.

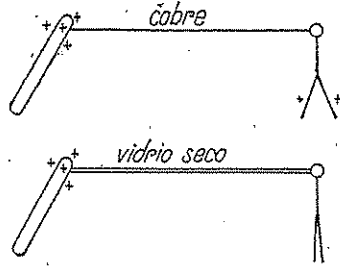


Fig. 326.—Cuerpos buenos y malos conductores.

Por eso se dice que un conductor conectado o puesto a tierra se descarga.

Los aisladores se denominan también dieléctricos, por razones que veremos más adelante.

La esferita del péndulo eléctrico (fig. 322) está aislada del suelo por el soporte de vidrio y el hilo de seda; las hojuelas del electroscopio lo es-

tan por el soporte de vidrio o el tapón de ámbar.

Los soportes de vidrio tienen el inconveniente de que cuando se humedecen se hacen conductores. Puede obtenerse un buen soporte aislador sumergiendo en azufre fundido una varilla de madera; al retirarla, la capa de azufre que la reviste la hace mala conductora. Fundiendo azufre y parafina se pueden moldear excelentes aisladores. Colocando una tabla sobre 4 de estos aisladores se construye un buen *banquillo aislador* ⁽¹⁾ un experimentador subido en él puede ser cargado de electricidad viéndose entonces que sus cabellos se separan como las hojas de un electroscopio, poniéndose de punta si son largos.

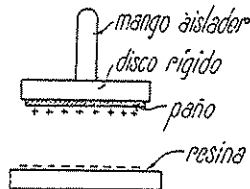


Fig. 327.—En el frotamiento se producen simultáneamente ambas electrificaciones.

§ 210.—Producción simultánea de las dos electricidades - Neutralización de cargas.—Los cuerpos que adquieren cargas por frotamiento, en las condiciones corrientes, son aisladores o malos conductores. Esto se explica por el hecho de que si fueran conductores, siendo tomados por la mano del experimentador, no podrían conservar su carga.

Puede comprobarse que el paño o la piel empleada para frotar, también se carga de electricidad de signo contrario a la del cuerpo frotado. Para ello se frota un disco de resina, con

(1) Es corriente el empleo de banquetillos aisladores con patas de vidrio que hay que calentar para secarlas antes de cada experiencia.

otro de paño colocado sobre madera o latón, tomado por un mango aislador, se comprobará, con el péndulo eléctrico, que el paño presenta carga positiva, mientras la resina se carga negativamente.

Puestos en contacto ambos discos después de cargados, las dos cargas desaparecen; se dice que ambas se han neutralizado.

En general, se acepta que si dos cargas puestas en contacto se neutralizan o anulan, son iguales y de signo contrario.

Todo pasa como si se tratara de una suma algebraica de cantidades de distinto signo.

§ 211.—Masa eléctrica o cantidad de electricidad.—Para precisar el concepto de *masa eléctrica* o *cantidad de electricidad* y establecer la manera de medirla, recurriremos a la comparación de las fuerzas de atracción y repulsión entre cuerpos electrificados (acciones ponderomotrices).

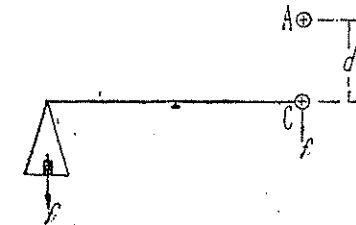


Fig. 328.—Experiencia básica para definir la masa eléctrica.

Si dos pequeñas esferas metálicas cargadas con electricidad de igual signo, colocadas sucesivamente en A, a la misma distancia *d* de una esferita C, cargada también con electricidad del mismo signo (fig. 328), producen fuerzas de repulsión iguales, diremos que sus masas eléctricas son iguales.

Si dos pequeñas esferas metálicas cargadas con electricidad de igual signo, colocadas sucesivamente en A, a la misma distancia *d* de una esferita C, cargada también con electricidad del mismo signo (fig. 328), producen fuerzas de repulsión iguales, diremos que sus masas eléctricas son iguales.

Comprobaremos que dos cargas eléctricas colocadas en A producen una fuerza igual a la suma de las que cada una produciría sola.

Si una carga produce una fuerza igual a la suma de las que producen otras dos en igualdad de condiciones, diremos que tiene una masa eléctrica igual a la suma de las de aquéllas.

Queda así definida la magnitud *masa eléctrica*, carga o cantidad de electricidad, por la definición de la igualdad y la suma.

La masa eléctrica es así una magnitud *proporcional a la fuerza* con que actúa sobre otra tomada como término de comparación.

§ 212.—Ley de Coulomb - Unidad c.g.s. electrostática y unidad práctica de carga.—Coulomb estableció experimentalmente que la fuerza con que actúan dos cargas eléctricas es inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. Como por la definición de *masa* o cantidad de electricidad, la fuerza

es proporcional a la misma, resulta, llamando a y a' a las masas y d a la distancia,

$$f = C \frac{q \cdot q'}{d^2} \quad [1]$$

La fuerza atractiva o repulsiva entre dos cargas eléctricas puntuales es proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia. (Ley de Coulomb).

La constante C , característica del medio, depende del sistema de unidades.

(A signos iguales corresponde repulsión, de acuerdo a la definición de cargas positivas y negativas).

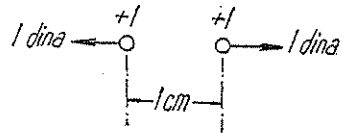


Fig. 329.—Definición de unidad electrostática c.g.s. de cantidad de electricidad.

Suponiendo los cuerpos colocados en el aire o en el vacío, puede hacerse igual a 1 la constante C utilizando la *unidad c.g.s. electrostática de carga eléctrica* ⁽¹⁾ definida así: es la carga que rechaza con fuerza de 1 dina a otra carga igual colocada a 1 cm de distancia.

Midiendo q y q' en estas unidades y la distancia d en centímetros, la fuerza queda expresada en dinas, de acuerdo a la fórmula:

$$f = \frac{q \cdot q'}{d^2} \quad (\text{en vacío o aire}) \quad [2]$$

Corrientemente se emplea como *unidad práctica* el Coulomb o Culombio que vale 3×10^9 unidades c.g.s. electrostáticas (3 000 000 000); como hay otra unidad c.g.s. electromagnética ⁽²⁾, designaremos a la unidad electrostática antes definida con el símbolo: u.e.s. (q).

Por lo tanto:

$$1 \text{ Coulomb} = 3 \times 10^9 \text{ u.e.s. } (q)$$

La dimensión de la unidad c.g.s. de carga se obtiene aplicando a la fórmula [2] la condición de homogeneidad.

Resultado:

⁽¹⁾ Se ha propuesto para esta unidad el nombre de Franklin.
⁽²⁾ Para esta unidad c.g.s. de carga, usaremos el símbolo: u.e.m. (q). Vale 19 Coulomb, y por lo tanto: 1 u.e.m. (q) = 3×10^{10} u.e.s. (q).

$$dina = \frac{[q]^2}{cm^2}$$

de donde:

$$\frac{g \text{ cm}}{seg^2} \cdot cm^2 = [q]^2$$

y

$$[q] = \sqrt{\frac{g \text{ cm}^3}{seg^2}} = g^{\frac{1}{2}} \text{ cm}^{\frac{3}{2}} \text{ seg}^{-1}$$

§ 213.—Verificación de la ley de Coulomb.—La verificación directa de la ley de Coulomb puede hacerse con la balanza de torsión o balanza de Coulomb; se la utiliza en forma análoga que para verificar la ley referente al magnetismo (véase § 177).

Del hilo de torsión se cuelga una varilla de vidrio en cuyo extremo hay una esferita A de bronce, que se carga. Otra esferita B cargada, con mango aislador de vidrio, se introduce por la abertura de la tapa, colocándola frente a la primera a distancia inicial d , medida sobre la escala pegada en el vidrio de la caja cilíndrica (fig. 330).

Siendo las cargas del mismo signo, la esferita A es rechazada y para llevarla a la posición de partida hay que torcer el hilo de sostén en un ángulo α .

A esta torsión α corresponde un momento M que se calcula en base a las características del hilo de sostén. Siendo AO (fig. 331) la distancia del centro de la esferita A al eje del hilo y f la fuerza a medir, se tiene:

$$f = \frac{M}{OA} \quad [3]$$

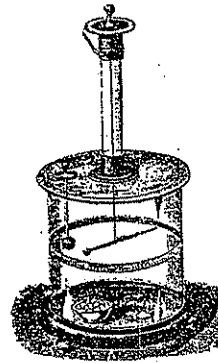


Fig. 330.—Balanza de Coulomb para medir las acciones entre cargas eléctricas.

Duplicando la distancia inicial d se comprueba que la fuerza se reduce a la cuarta parte, y así se sigue para establecer que es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia en todos los casos.

Se trata de una verificación muy engorrosa en la práctica; por eso se prefiere la verificación indirecta comprobando que son ciertas las consecuencias establecidas en base a la ley del cuadrado de las distancias.

Aplicaciones:

1 - Dos conductores con cargas $q = + 5000$ c.g.s. y $q' = - 4000$ c.g.s. están situados en el aire a 20 cm de distancia. ¿Con qué fuerza se atraen?

Respuesta:

$$f = \frac{qq'}{d^2} = \frac{5000 \times 4000}{20^2} = \frac{20000000}{20^2}$$

$$= 50000 \text{ dinas}$$

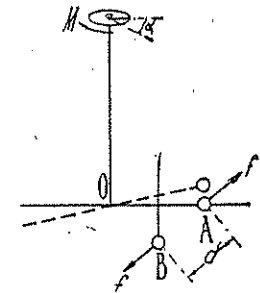


Fig. 331.—Esquema de la balanza de Coulomb.

2. ¿Con qué fuerza se rechazarán dos cargas positivas de 1 Coulomb colocadas a 1 km de distancia en el aire?

Respuesta:

$$f = \frac{3 \times 10^9 \times 3 \times 10^9}{100\,000^2} = 9 \times 10^8 \text{ dinas} = 920 \text{ kgr}$$

3. ¿Qué carga hay que proporcionar a una esferita de peso $p = 2$ gr. para mantenerla en el aire por la atracción de una carga $q = 800$ u.e.s. colocada a distancia $d = 20$ cm?

Respuesta:

$$f = \frac{q a'}{d^2}$$

$$q' = \frac{f d^2}{q} = \frac{2 \times 981 \times 20^2}{800} = 981 \text{ u.e.s. } (q)$$

§ 214.—La electricidad se distribuye en la superficie exterior de los conductores.—Diversas experiencias nos permiten comprobar que en el interior de los conductores no pueden existir cargas eléctricas en equilibrio.

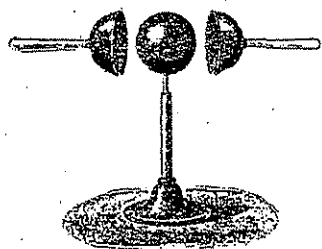


Fig. 332.—Al apoyar los hemisferios sobre la esfera cargada, la electricidad pasa a su superficie exterior.

1) Tomemos una esfera metálica cargada de electricidad. Si adosamos sobre su superficie dos semiesferas metálicas, sostenidas con mangos aisladores, de modo que cubran totalmente a la esfera y entren en contacto con ella, comprobaremos que la carga de la esfera pasa íntegramente a las semiesferas que la cubren. En efecto, si se separan ambas semiesferas se observa, con ayuda del electroscopio, que están cargadas, mientras que la esfera queda descargada (Experiencia de Cavendish).

2) Con un cilindro metálico, hueco, aislado, que lleva péndulos eléctricos en su interior y en el exterior se comprueba que, al ser cargado, sólo se separan, indicando la existencia de cargas eléctricas, los que están colocados en el exterior.

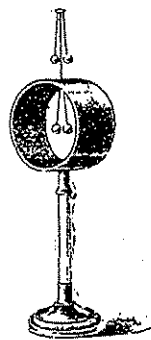


Fig. 333.—En el cilindro hueco cargado, sólo divergen los péndulos exteriores.

Los del interior no se separarán cualquiera que sea la carga del cuerpo.

3) Cargando una malla metálica aislada mientras está extendida (fig. 334 a) se observa la repartición de la electri-

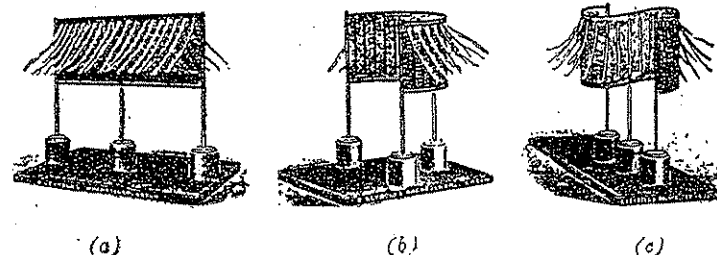


Fig. 334.—Malla metálica deformable para comprobar que la electrización se manifiesta en la superficie convexa.

cidad en ambas caras mediante pequeñas tirillas de papel que se levantan al ser repelidas por las cargas.

Doblando la malla en la forma indicada en las figuras 334 b y c, se comprueba que la electricidad se distribuye siempre en las caras convexas (exteriores) del cuerpo cargado.

4) La experiencia de Franklin consiste en tomar un conductor hueco aislado, de cuyo interior se extrae una cadena metálica mediante un hilo de seda (aislador).

Estando el conductor cargado se observará lo siguiente: si la cadena es corta de modo que interrumpa su contacto con el cuerpo cuando aun se encuentra toda en el interior, sale descargada (fig. 335 a). Por el contrario, si la cadenita es suficientemente larga como para que, habiendo salido un extremo, todavía esté el otro en contacto con el interior del cuerpo hueco, llevará una parte de su carga, lo cual puede comprobarse con un electroscopio.

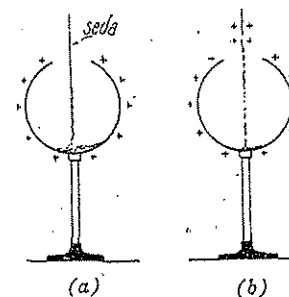


Fig. 335.—Experiencia de Franklin para comprobar la ausencia de cargas en el interior de los conductores.

Eso es debido a que, en la posición indicada en la figura 335 b, parte de la cadena constituye una porción de la superficie exterior del cuerpo.

§ 215.—Inducción electrostática o influencia eléctrica.—Hemos visto que las cargas eléctricas se caracterizan por las acciones ponderomotrices (atracciones y repulsiones), que ejercen sobre los cuerpos colocados en sus proximidades.

Ahora vamos a analizar otro efecto de fundamental importancia: la creación de cargas en esos cuerpos, por efectos de inducción.

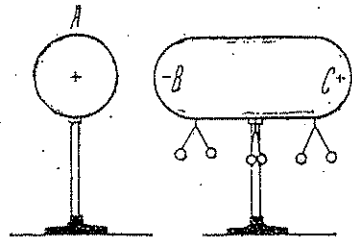


Fig. 336.—El cuerpo cargado A, origina por inducción cargas iguales y de signo contrario en el conductor BC.

Consideremos un conductor esférico cargado, A y en sus proximidades otro BC, provisto de pequeños pendulitos eléctricos (fig. 336).

Al aproximar el conductor A, que llamaremos inductor al inducido BC, notaremos que los péndulos de los extremos divergen mientras que los del centro permanecen caídos.

Se comprueba además:

a) Que alejando el inductor, desaparecen las cargas reveladas por la divergencia de los pendulitos.

b) Que en el inducido aparecen ambas electricidades: en el extremo B, próximo al inductor, una carga de signo contrario a la de éste y en el extremo más alejado una carga del mismo signo.

En la parte media denominada zona neutra no existen cargas.

c) Que si durante la inducción se toca con un dedo (o pone a tierra) cualquier punto del inducido, desaparece la electricidad de igual signo que la del inductor. La electricidad de signo contrario es retenida y al retirar el inductor, después de haber interrumpido el contacto con tierra, se distribuye por todo el inducido.

d) Si el inducido está formado por dos partes adosadas B y C y si las separamos mientras está el inductor cerca, ambas quedan cargadas en forma permanente. La parte más próxima, B con electricidad de signo contrario a la del inductor (— en el caso de la figura) mientras que la más alejada C tiene carga de igual signo que el inductor. La figura 337 muestra un par de conductores con electros copios para realizar esta experiencia.

Se explica la inducción en la hipótesis de los flúidos admitiendo que el conductor inducido está inicialmente en estado

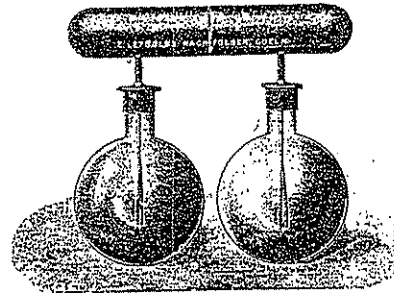


Fig. 337.—Conductores separables con electros copios, para comprobar que las cargas inducidas son iguales y de signo contrario.

neutro, teniendo cargas positivas y negativas que mutuamente se neutralizan. La proximidad del inductor cargado descompone el estado neutro del inducido, atrayendo las cargas de nombre contrario que se le acercan y rechazando las del mismo nombre, que se colocan en la parte más lejana, o van a tierra si el conductor se pone en contacto con ella.

§ 216.—Carga del electros copio por contacto y por inducción - Distinción del signo de las cargas.—Aproximando una

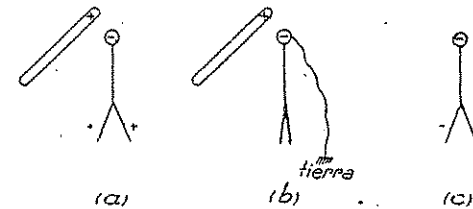


Fig. 338.—Carga de un electros copio por influencia.

barra de vidrio frotado (con carga positiva), a la esfera de un electros copio, se producirá el fenómeno de inducción, cargándose las hojas positivamente y negativamente la esferita próxima al cuerpo inductor (fig. 338 a).

Si entonces se ponen en contacto la barra con la esferita, se neutralizan las cargas de los puntos del cuerpo que tocan a la esfera, con las de signo contrario que hay en ella. Al alejar la barra, el electros copio quedará con cargas de igual signo que las del cuerpo puesto en contacto con él.

Por este método se consigue llevar pocas cargas al electros copio, pues, como el cuerpo cargado es generalmente aislador, sólo queda una carga igual a la que había en los puntos que tocan a la esfera.

Para llevar más cargas se procede del siguiente modo: imaginemos la barra electrizada próxima al electros copio en el cual aparecen, por inducción, cargas de signo contrario.

Tocando la esferita del electros copio con un dedo, pasará a tierra la carga positiva, cayendo las hojuelas (fig. 338 b).

Retirando el dedo de la esferita y alejando la barra inductora, el electros copio quedará con carga negativa (fig. 338 c).

Así preparado el electros copio permite distinguir los signos de las cargas de cuerpos que se le aproximan. La proximidad de un cuerpo cargado con electricidad de igual signo (negativa en este caso), da lugar a un aumento de la divergencia

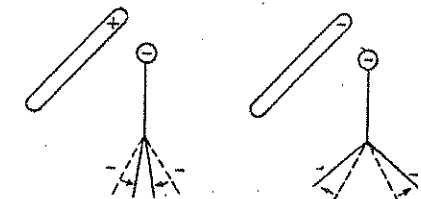


Fig. 339.—Determinación del signo de una carga con un electros copio cargado.

de las hojas. Si tiene carga de signo contrario (positiva) la divergencia disminuye (fig. 339).

Usando inicialmente como inductor una barra de resina, lacre o ebonita, frotada (carga negativa), el electroscopio quedaría cargado positivamente.

§ 217. Teorema de Faraday.—En general, las cargas eléctricas inducidas en experiencias como las descritas en los párrafos anteriores son menores que la carga del inductor.

Sólo en el caso de que el cuerpo inducido rodee completamente al inductor, se verifica que *las cargas inducidas son de igual masa eléctrica que la carga inductora* (Teorema de Faraday).

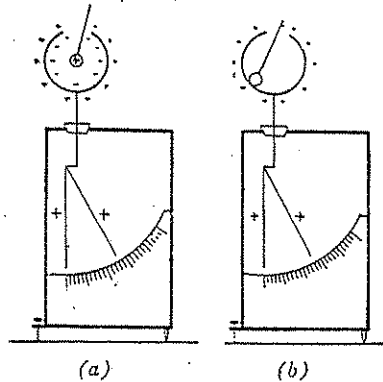


Fig. 340.—Experiencia para demostrar experimentalmente el teorema de Faraday.

darán lugar a una separación de las hojas del electroscopio.

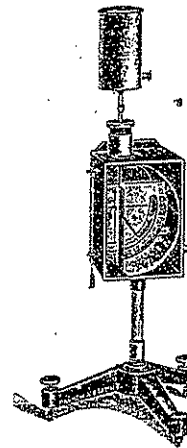
En la fig. 340 se supone que la carga inductora es positiva; el electroscopio en que se apoya el cuerpo hueco quedará cargado con electricidad también positiva. Si ahora hacemos que la esferita inductora toque el interior del cuerpo hueco, observaremos que la indicación del electroscopio sigue siendo la misma (1).

Retirando la esferita se comprobará con otro electroscopio (o electroscopio), que se ha descargado completamente.

Hemos comprobado así que la carga inducida en el interior del cuerpo hueco era igual y de signo contrario que la carga inductora, pues ambas se han neutralizado al ponerse en contacto.

(1) No es forzoso realizar la experiencia con electroscopio, pues aun tratándose de un electroscopio será fácil notar que la divergencia de las hojuelas no se modifica al producirse el contacto interior.

§ 218.—Caja o cilindro de Faraday.—Con la experiencia del párrafo anterior hemos pasado íntegramente a la esfera hueca y al electroscopio una carga igual en masa y signo a la de la esferita inductora.



341.—Electrómetro con caja de Faraday.

Un cuerpo hueco que llena esta función se denomina caja o cilindro de Faraday.

En los electrómetros se la utiliza para poder medir así las cargas eléctricas, pues si nos limitáramos a poner el cuerpo cargado en contacto con el electrómetro, sólo una parte de la carga eléctrica pasaría a este último, mientras con la caja de Faraday toda la carga pasa al sistema formado por la caja y el electrómetro. Llevando sucesivas cargas a la caja se podrá construir una curva de calibración que vincule la separación de las hojas del electrómetro con la carga que se ha llevado al sistema. Con esta curva se podría luego medir las cargas eléctricas en base a la medida de la separación de las hojas.

§ 219.—Cámara protectora de Faraday - Pantallas eléctricas.—Sabemos que las cargas eléctricas en equilibrio se distribuyen en la superficie exterior de los conductores cargados, o sea, que en el interior no existen cargas eléctricas a menos que estén aisladas, como en el caso de la fig. 340 a), en el cual colocábamos una esfera cargada en el interior de otra hueca.

Podemos comprobar además que en el interior de un conductor hueco no se manifiestan fenómenos de inducción por efecto de cargas colocadas en el exterior.

Para ello no es necesario que el conductor sea continuo. Si tomamos una caja construída con malla metálica y colocamos dos electroscopios, uno en el interior y otro en el exterior, observaremos que al acercar un cuerpo cargado, las hojas del electroscopio exterior se separarán, mientras las del interior permanecen unidas en cualquier posición del cuerpo exterior.

El fenómeno no se modifica tanto cuando la caja se carga por inducción como por contacto. Es indiferente también que

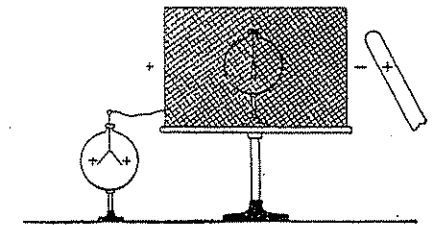


Fig. 342.—En el interior de una caja protectora de Faraday no se manifiestan acciones eléctricas.

la caja esté aislada o unida a tierra y que el electroscopio interior esté aislado o unido a la caja.

En estas condiciones la caja ha actuado como una pantalla eléctrica protegiendo a los cuerpos interiores de las acciones eléctricas. Se la llama cámara protectora de Faraday.

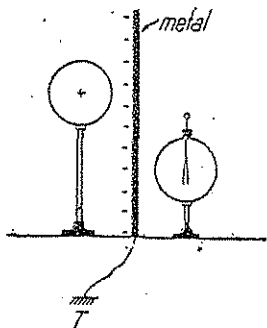


Fig. 343.—Una placa metálica unida a tierra actúa como pantalla eléctrica.

El efecto de pantalla eléctrica puede también obtenerse con un conductor cualquiera unido a tierra.

Si acercamos un conductor cargado a un electroscopio, sus hojas divergen por efecto de la inducción.

Interponiendo un plano conductor unido a tierra, observaremos que el fenómeno de inducción ya no se manifiesta y el electroscopio permanece descargado (fig. 343).

Decimos que se ha producido un efecto de pantalla debido al conductor unido a tierra.

Es claro que si el conductor no está unido a tierra se cargarán, por inducción, ambas caras y la que está próxima al electroscopio influirá sobre él. La unión a tierra hace que esa carga desaparezca y la placa metálica impide la acción de la que se encuentra en la cara opuesta.

Observamos que el comportamiento de los conductores es muy particular y difiere del de los aisladores o dieléctricos, pues a través de ellos se ejercen las acciones eléctricas.

§ 220.—Caja metálica en los electrómetros.—Se ha visto que la separación de las hojas de un electroscopio depende de su carga. Es evidente que también dependerá de la acción de otras cargas colocadas en cuerpos próximos. Para evitar esta influencia se colocan las hojuelas dentro de una caja metálica que se une a tierra. La observación se realiza a través de ventanas de vidrio.

En este caso, al cargar las hojas se genera, por inducción, una carga de signo contrario en la caja. La separación dependerá de la repulsión de las cargas en las hojuelas y la atracción de las cargas de la caja. Sólo en estas condiciones se evita comple-

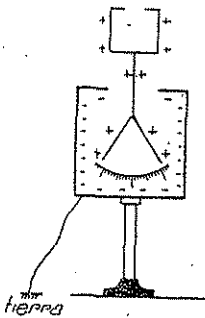


Fig. 344.—La caja metálica de los electrómetros aumenta la desviación de las hojas y evita las perturbaciones que producirían las cargas exteriores.

tamente la acción de las cargas exteriores y podrá compararse la medida de la separación en distintas experiencias.

§ 221.—Distribución de la electricidad en la superficie de los conductores.—a) En un conductor esférico la electricidad se distribuye homogéneamente en su superficie.

Puede comprobarse empleando un electrómetro y un plano de prueba formado por una pequeña superficie plana metálica, con mango aislador (1) (fig. 345).

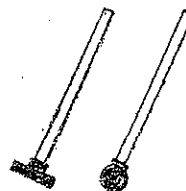


Fig. 345.—Plano y esferilla de prueba para tomar cargas eléctricas.

Tocando una región cualquiera del conductor cargado, el plano toma una carga proporcional a la que existe sobre un área igual a la de su superficie en esa zona del cuerpo.

Llevado al electroscopio con caja de Faraday produce una divergencia que nos permite medir la carga tomada.

Tocando en diversos puntos (cuidando de descargar el plano de prueba y el electroscopio después de cada observación), se comprueba que siempre se tiene la misma divergencia de las hojas.

En consecuencia, se acepta que en cada unidad de superficie del conductor esférico existe la misma carga eléctrica.

Densidad eléctrica es la masa eléctrica que hay en cada unidad de superficie.

En una esfera de radio R y carga q , cargada uniformemente, la densidad eléctrica es:

$$\sigma = \frac{q}{4\pi R^2} \quad [4]$$

b) En un conductor de forma cualquiera la distribución es irregular, aumentando la densidad eléctrica en las partes que presentan filos o puntas.

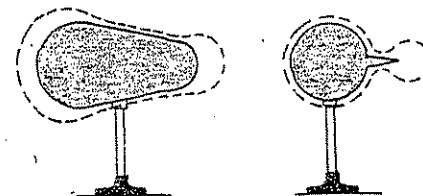


Fig. 346.—Distribución de las cargas eléctricas según la curvatura de cada zona en un conductor cargado.

Repetiendo con el plano de prueba la experiencia anterior,

(1) Suele utilizarse también una esfera pequeña, con mango aislador (esfera de prueba).

para un conductor cualquiera, se obtienen diferentes divergencias de las hojas para cada punto.

Llevando sobre normales a la superficie, en cada punto, valores proporcionales a estas divergencias, o sea, a las densidades respectivas, se han obtenido los gráficos de la figura 346.

Siendo Δs el área tocada por el plano de prueba y Δq la carga existente en ella, la densidad en el punto es:

$$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta s} \quad [5]$$

Se comprueba que la densidad aumenta en las zonas de mayor curvatura (menor radio de curvatura).

§ 222.—Presión electrostática - Poder de las puntas.—Las cargas eléctricas distribuidas en la superficie del conductor están sometidas a fuerzas de repulsión y tratan de alejarse mutuamente, pues cada carga está sometida a la acción de las restantes colocadas sobre el cuerpo. Si el conductor es deformable, sufre el efecto de estas fuerzas; tal es el caso de una pompa de jabón aislada y cargada de electricidad, que aumenta de volumen por tal causa.

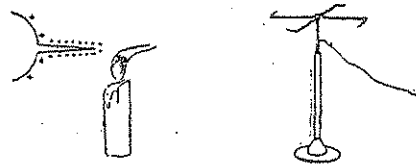


Fig. 347.—El viento eléctrico se aprecia acercando una bujía encendida. También pone en movimiento, por reacción, al molinete eléctrico.

Se llama presión electrostática a la fuerza aplicada a las cargas eléctricas situadas en 1 cm² de conductor por las acciones de repulsión del resto de las mismas.

Se demuestra que esta presión es proporcional al cuadrado de la densidad σ (1).

En las puntas donde σ es máximo, se tiene máxima presión; allí siempre se produce un escape de electricidad, debido en gran parte a la electrización de partículas de aire que son luego repelidas produciendo un verdadero viento eléctrico. Colocando un fósforo encendido frente a una punta aguda cargada es posible apagarlo por el viento eléctrico. La fig. 347 muestra el efecto sobre una bujía y en el molinete eléctrico.

Demás está decir que un conductor con puntas se descarga al poco tiempo, en virtud de lo que se ha dicho.

A esta propiedad se la designa: poder de las puntas.

§ 223.—Máquinas eléctricas de frotamiento y de inducción.—Las máquinas eléctricas o máquinas electrostáticas son aparatos que producen cargas eléctricas con relativa facilidad y en cantidad suficiente para producir, en forma fácilmente observable, los fenómenos hasta ahora estudiados y otros que se indicarán más adelante.

(1) Su valor es: $p = 2 \pi \sigma^2$.

Si bien en todas ellas intervienen los fenómenos de inducción, se las clasifica como de frotamiento cuando permanentemente se está electrizando por frote alguna de sus partes, reservando el nombre de inducción para las que multiplican por este fenómeno una carga inicial, originada a menudo por un frotamiento previo.

De las primeras sólo estudiaremos la de Ramsdem, de las segundas veremos el *electróforo de Volta* y la *máquina de Wimshurst*. De todas ellas la más utilizada es esta última, pues con ella se obtienen, con relativa facilidad, efectos más notables.

§ 224.—Máquina de Ramsdem.—Consta de un disco de vidrio que gira, frotando con dos pares de almohadillas de crin revestidas de cuero, colocadas en los extremos de un diámetro vertical. Según un diámetro horizontal del disco están los peines P, P' , formados por dos conductores rectos provistos de una serie de puntas; ambos peines están conectados a un conductor aislado, llamado colector.

Se llama presión electrostática a la fuerza aplicada a las cargas eléctricas situadas en 1 cm² de conductor por las acciones de repulsión del resto de las mismas.

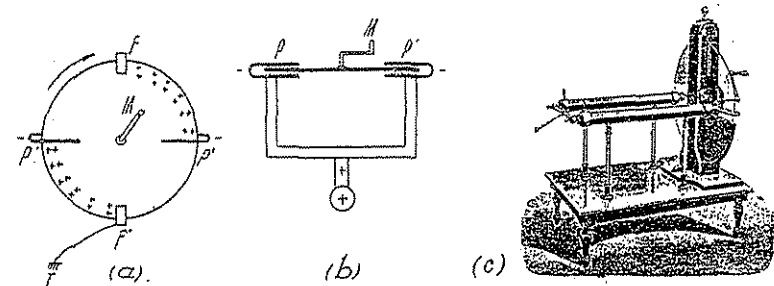


Fig. 348.—Máquina de Ramsdem a) y b) Esquema de funcionamiento, c) Modelo de máquina.

La fig. 348 a), muestra el disco de frente con las almohadillas F, F' y los peines P, P' . La fig. 348 b), muestra un esquema en planta de la máquina.

Si accionando la manivela M , se hace girar el disco en el sentido que indica la flecha, las partes frotadas se cargan de electricidad positiva (las almohadillas F, F' están puestas a tierra, pudiendo usarse para ello una cadenita).

Al llegar frente a los peines P, P' las cargas positivas producen inducción atrayendo la electricidad negativa hacia las puntas y enviando la positiva al colector.

La electricidad negativa escapa de las puntas y va a neutralizar la carga del disco; en éste quedan descargados los sectores que han pasado frente a los peines, como indica la figura 348 a).

La figura 348 e) muestra una vista de conjunto de la máquina. Del colector se obtienen chispas de cerca de 1 cm aproximando un dedo o un conductor puesto a tierra; en días húmedos debe secarse el vidrio previamente.

§ 225.—**Electróforo de Volta.**—Consta de una torta de resina o ebonita apoyada sobre una chapa metálica unida a tierra y un disco metálico con mango aislador, que se apoya sobre la resina.

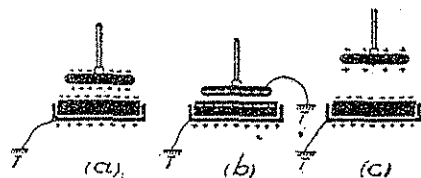


Fig. 349.—Electróforo de Volta.

Se comienza frotando la resina, con lo cual se carga de electricidad negativa y por inducción la placa metálica unida a tierra se carga positivamente, mejorando la carga de la misma.

Aproximando el disco metálico aislado, aparecen sobre él cargas iguales y en signo contrario (fig. 349 a). Si entonces se lo toca con la mano, pasan a tierra las cargas negativas mientras las positivas quedan retenidas por la carga inductora (fig. 349 b). Suprimiendo el contacto con tierra y retirando el disco, sosteniéndolo por el mango aislador, se tendrá una carga positiva en él (fig. 349 c).

Como en esta operación no se ha alterado la carga de la torta de resina, la experiencia puede repetirse un número indefinido de veces, obteniéndose una carga cualquiera que puede acumularse en una caja de Faraday aislada (cilindro colector).

§ 226.—**Máquina de Wimshurst.**—Consta de dos discos aisladores, de vidrio o ebonita, que llevan pegados a su superficie una cantidad de pequeños sectores metálicos aislados entre sí, como puede verse en la fig. 350.

Ambos discos giran rápidamente en sentido contrario durante el funcionamiento de la máquina.

Frente a cada disco se encuentra un colector dispuesto con escobillas en los extremos que apoyan entonces sobre sectores diametralmente opuestos. Estos conductores están colocados según diámetros perpendiculares entre sí e inclinados a 45° con el diámetro horizontal, en cuyos extremos se encuentran dos colectores con peines metálicos p y p'. En la figura se ven las piezas ee' y e₁e₁', unidas a los colectores, que recibirán las cargas de signo contrario producidas en la máquina.

Para explicar el funcionamiento nos referiremos al esquema de la figura 351, en el cual suponemos que en lugar de dos discos son dos cilindros concéntricos, los que giran en sentido contrario.

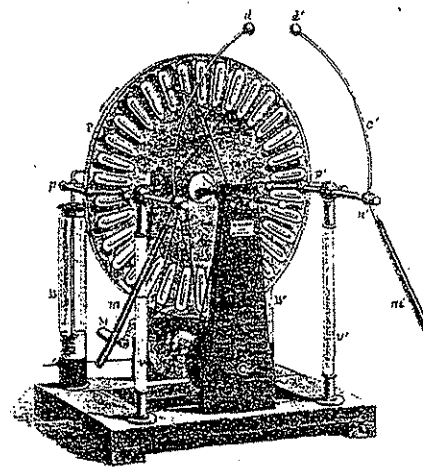


Fig. 350.—Máquina electrostática de Wimshurst.

Ocurre siempre, que por fricción de las escobillas o cualquier otra causa, se genera en algún lugar de uno de los discos una pequeña carga eléctrica.

Basta ésta para que la máquina inicie su funcionamiento multiplicando esta carga inicial y dando lugar a la aparición de otras iguales de signo contrario.

Supongamos que en el sector S₁ aparezca una carga positiva; al presentarse frente a la escobilla e' produce por inducción una carga negativa que pasa al

sector S₁' y otra positiva que va al S₂'.

La carga negativa de S₁' marcha en el sentido indicado por la flecha y produce, por inducción, una carga positiva en la escobilla e₁ y otra negativa en la e₁' que pasa a los respectivos sectores en contacto.

La primera reemplaza a la carga inicial supuesta en el sector de la posición S₁, y la segunda pasa a la posición S₂, produciendo inducción en el conductor ee', que refuerza el efecto de la carga inicial.

Siguiendo la marcha de los sectores puede observarse que continuamente se presentan ante el peine p cargas positivas y ante el p' cargas negativas.

Por inducción los respectivos colectores se cargan positiva y negativamente, mientras que las electricidades de nombre contrario escapan por las puntas de los peines neutralizando los sectores que los enfrentan. De este modo se obtie-

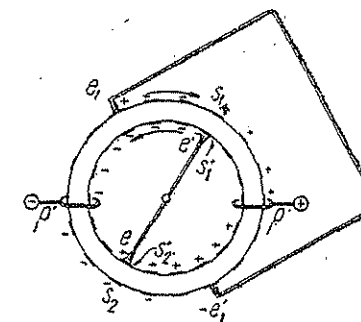


Fig. 351.—Esquema para explicar el funcionamiento de la máquina de Wimshurst.

nen las dos clases de electricidad en ambos colectores de la máquina.

Acercando las dos esferitas terminales de estos colectores, con ayuda de los mangos aisladores (m y m'), se podrán observar chispas eléctricas rectilíneas o arborescentes según la distancia.

En la figura 350 se ven además los condensadores B y B', que pueden conectarse a los colectores obteniéndose chispas más luminosas. Más adelante veremos la explicación de este fenómeno.

§ 227.—Trielectricidad.—(Electricidad por frotamiento). Hemos dichos que en general los cuerpos aisladores frotados se cargan de electricidad; los conductores tomados con mangos aisladores se cargan también por frotamiento.

En cuanto al signo de las electricidades obtenidas hay que tener presente que depende de cuál es el cuerpo empleado para producirla. Así, el vidrio común frotado con una piel de gato o un trapo de lana se electriza positivamente, pero frotado con piel de conejo toma carga negativa.

El ámbar y la resina frotados con piel de gato toman cargas negativas, pero si se lo hace con gutapercha o goma elástica se electrizan positivamente. Friccionando un disco de vidrio pulido con otro despulido, este último se electriza negativamente.

A continuación agregamos una serie triboeléctrica, formada por cuerpos ordenados de modo que cada uno de ellos frotado con uno de los que le preceden se electriza negativamente y haciéndolo con uno de los que le siguen toma carga positiva.

- | | |
|---------------------------|--------------------|
| 1 — Amianto (en láminas) | 14 — Hierro |
| 2 — Piel de conejo (pelo) | 15 — Parafina |
| 3 — Vidrio | 16 — Ébano |
| 4 — Mica | 17 — Ámbar |
| 5 — Lana | 18 — Pizarra |
| 6 — Cuarzo | 19 — Resina |
| 7 — Marfil | 20 — Ebonita |
| 8 — Calcita | 21 — Gutapercha |
| 9 — Piel de gato | 22 — Azufre |
| 10 — Seda | 23 — Pt, Ag, Au |
| 11 — Mano | 24 — Celuloide |
| 12 — Papel de filtro | 25 — Goma elástica |
| 13 — Algodón | |

Debe tenerse presente que el fenómeno depende del estado de las superficies, de la temperatura y otros factores, que pueden alterar algunas posiciones en la serie.

Los líquidos se electrizan por fricción cosa que puede comprobarse con el mercurio al sumergir y retirar en él una varilla de vidrio, rápidamente. La nafta se electriza al moverse en los tanques de los automotores, y por ello los camiones que la transportan llevan una cadenita que cuelga hasta el suelo para descargar las partes metálicas; los gases y vapores también se electrizan por frotamiento; la máquina electrostática de Armstrong envía a un colector un chorro de vapor de agua, electrizado al pasar por tubos de madera.

El azufre en polvo y minio, mezclados se electrizan por roce al pasar por el pico de un pequeño fuelle, y pueden servir para estudiar la distribución de cargas en cuerpos electrizados; (el azufre se deposita en las zonas cargadas positivamente).

Al rallar un cuerpo los fragmentos se electrizan; quebrando azúcar o chocolate tomados con guantes de seda, los trozos se electrizan.

Separando por clivaje dos placas de mica tomadas por trozos aisladores de lacre, muestran tener cargas iguales y contrarias.

§ 228.—Piro y piezoelectricidad. - 1 Piroelectricidad.— Ciertos cristales al ser calentados se cargan de electricidad.

Esta propiedad es notable en la turmalina que colocada en un hogar atrae, al sacarla, las cenizas y otros cuerpos livianos. Siempre aparecen las dos electricidades; al enfriarse cambia el signo de las zonas electrizadas. El topacio, la esmeralda, la boracita y el cuarzo presentan también esta curiosa propiedad.

2 Piezo-electricidad. — Hay cuerpos que sometidos a fuerzas que los comprimen, presentan zonas cargadas de electricidades de distinto signo.

Los hermanos Pierre y Jacques Curie estudiaron esta propiedad en el cuarzo, determinando relaciones entre las cargas producidas y las fuerzas aplicadas.

La figura 352 a) muestra un trozo de cuarzo preparado para estudiar el fenómeno piezo-eléctrico.

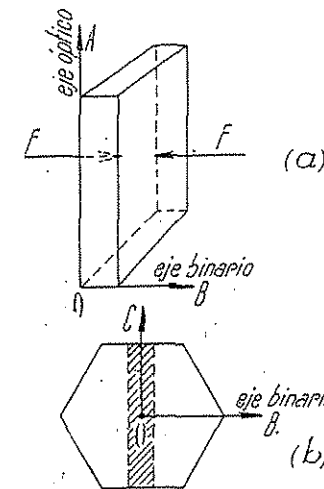


Fig. 352.—Cuarzo piezoeléctrico. Manera de tallar el cristal.

Sea OA la dirección del eje óptico, (eje ternario); las aris-

tas *OB* y *OC* están en un plano perpendicular a dicho eje y son perpendiculares entre sí. La arista *OB* se elige de modo que corresponda a un eje binario. La figura 352 b) muestra un corte del cristal normal al eje óptico, y las direcciones *OB* y *OC*.

Aplicando las dos fuerzas *F* al paralelepípedo cortado en las condiciones dichas, paralelamente al eje binario *OB*, se desarrollan en las caras comprimidas cargas de signo contrario.

El fenómeno es reversible, pues, si se cargan de electricidades contrarias dichas caras, se origina una deformación del cuarzo, equivalente a la que producirían las fuerzas capaces de generar esas cargas.

Pueden realizarse además otros cortes del cuarzo que dan origen a láminas piezoeléctricas.

Esta propiedad del cuarzo piezoeléctrico es muy utilizada actualmente en los *estabilizadores de frecuencia* de los aparatos radioeléctricos.

CAPÍTULO XII

C A M P O E L É C T R I C O

CAMPO - LÍNEAS DE FUERZA - POTENCIAL

§ 229.—*Campo eléctrico - Definiciones.*—Del conjunto de hechos estudiados hasta ahora deducimos que la existencia de una carga eléctrica trae como consecuencia: 1º) la aparición de una fuerza (atracción o repulsión) sobre toda otra masa eléctrica que no se halle protegida por pantallas metálicas, y 2º) la generación de cargas eléctricas por inducción sobre todo conductor en las mismas condiciones. Es decir: toda carga eléctrica origina *acciones ponderomotrices* (fuerzas) y *fenómenos de inducción*.

A todo el espacio en que se manifiestan estas acciones lo designamos **campo eléctrico**.

Este campo se extiende indefinidamente en el espacio vacío o en los dieléctricos, pero está limitado por la superficie de los cuerpos conductores.

Para estudiarlo lo *exploraremos* con una masa eléctrica positiva tan pequeña como para poder suponer que su presencia no altera el campo.

Colocada esta masa eléctrica en un punto del campo, actuará sobre ella una fuerza cuya intensidad, dirección y sentido estarán perfectamente determinados.

Llamamos **campo eléctrico** en un punto a la fuerza que actúa sobre la unidad de masa eléctrica positiva colocada en dicho punto.

La *intensidad, dirección y sentido* de esa fuerza constituyen la *intensidad, dirección y sentido* del campo eléctrico.

Tendremos así definido, para cada punto del campo, un vector que llamaremos \vec{E} .

§ 230.—Cálculo del campo eléctrico.—Se comprende que, si en el punto en que el campo es E , colocamos una carga eléctrica q , actuará sobre ella una fuerza

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad [1]$$

cuya intensidad, dirección y sentido quedan perfectamente determinados una vez conocidos \vec{E} y q en magnitud y signo.

Dada la distribución de las masas eléctricas que producen el campo eléctrico, es evidente que la ley de *Coulomb* nos permitirá deducir su valor en un punto cualquiera; pues bastará suponer colocada la masa unidad en ese punto; calcular la fuerza debida a cada una de las masas puntuales que crean el campo y luego componer todas esas fuerzas. La resultante dará el campo eléctrico buscado.

Hay que tener presente que, como la ley de *Coulomb* se aplica a masas puntuales, para calcular la fuerza debida a una masa distribuida sobre una superficie o volumen extensos, será necesario dividirla en pequeños elementos que puedan suponerse puntuales. A la distancia r de una carga puntual q , el módulo del vector campo será (en el vacío)

$$E = \frac{q}{r^2} \quad [2]$$

fórmula que se deduce aplicando directamente la ley de *Coulomb* para las cargas q y $q' = +1$ a la distancia r

§ 231.—Unidad de intensidad de campo.—En el sistema c.g.s. de unidades, la unidad de campo corresponde al punto en que actúa una fuerza de 1 dina sobre la unidad electrostática c.g.s. de cantidad de electricidad.

Ejemplo:

Calcular el campo eléctrico en el punto medio de un segmento de recta de longitud $l = 8$ cm en cuyos extremos se encuentran masas eléctricas positivas $q_1 = 500$ y $q_2 = 200$ u.e.s. (q).

Solución:

El campo eléctrico debido a q_1 será

$$E_1 = \frac{q_1}{r_1^2}$$

El debido a q_2 será:

$$E_2 = \frac{q_2}{r_2^2}$$

Ambos campos son de sentido contrario y las distancias $r = \frac{l}{2}$.

Por lo tanto el módulo del campo resultante es:

$$E = E_1 - E_2 = \frac{q_1}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} - \frac{q_2}{\left(\frac{l}{2}\right)^2} = \frac{(q_1 - q_2)}{\frac{l^2}{4}} = \frac{4}{l^2} (q_1 - q_2)$$

reemplazando valores:

$$E = \frac{4}{64} \times 300 = 18,75 \frac{\text{dina}}{\text{r. e. s. } (q)}$$

§ 232.—Líneas de fuerza.—Colocada una pequeña masa eléctrica positiva en un punto del campo eléctrico, estará sometida a la acción de una fuerza. Si suponemos que esa masa eléctrica, carece de masa inerte, y por lo tanto de inercia, se moverá bajo la acción del campo, en forma tal que, en todo momento, la dirección y sentido del movimiento coinciden con la dirección y sentido del campo.

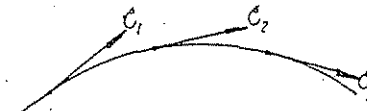


Fig. 353.—Línea de fuerza del campo eléctrico.

La trayectoria descrita, que en cada punto es tangente al vector campo eléctrico, se denomina línea de fuerza del campo eléctrico (fig. 353).

El sentido de la línea de fuerza coincide con el del campo en todos sus puntos.

Es evidente entonces que las líneas de fuerza salen de las masas eléctricas positivas y llegan a las masas eléctricas negativas, pues la masa eléctrica positiva utilizada para estudiar el campo es repelida por las cargas positivas y atraída por las cargas negativas.

En la fig. 354 se ha representado el campo eléctrico debido a dos masas eléctricas de signo contrario.

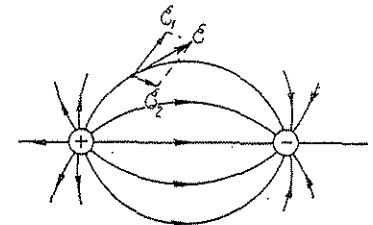


Fig. 354.—Líneas de fuerza en el campo eléctrico de dos cargas puntuales de signo contrario.

§ 233.—Representación cuantitativa del campo - Número de líneas de fuerza.—Hay infinitas líneas de fuerza, pero por cada punto no puede pasar más de una pues si dos líneas se cruzaran, en el punto común a ambas habría dos direcciones para el campo eléctrico, lo cual es absurdo.

Se ha convenido, como en el campo magnético, en representar el campo por un número limitado de líneas de fuerza suponiendo que, por cada centímetro cuadrado perpendicular a su dirección pasa, en cada punto, un número de líneas de fuerza igual al que expresa la intensidad del campo en ese punto.

Este criterio aplicado a la representación del campo, da una imagen cuantitativa del mismo, pues las líneas aparecerán agrupadas en la zona en que el campo es mayor y separadas donde es menor.

Se puede demostrar, como lo hemos hecho en el campo

magnético, que de una masa eléctrica q parte o llega (según su signo) un número de líneas de fuerza

$$\phi = 4 \pi q \quad [3]$$

entendiendo por número de líneas de fuerza lo que se ha convenido. Esta cantidad ϕ se denomina también *flujo de fuerza* en el campo eléctrico. La demostración se hace imaginando una superficie esférica, con centro en la carga y que la rodea totalmente, como en el caso del campo magnético (§ 183).

§ 234.—Intensidad del campo en las proximidades de la superficie de un conductor.—Supongamos que la densidad eléctrica en el punto sea σ (carga por cm^2) y que el conductor esté en el vacío o en el aire.

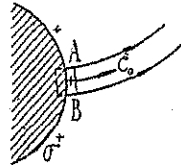


Fig. 355.—Campo eléctrico en las proximidades de un conductor cargado.

De esta carga parten hacia afuera las $4 \pi \sigma$ líneas definidas en la convención del párrafo anterior, pues hacia el interior el conductor actúa como pantalla eléctrica (fig. 355).

En un punto próximo, la sección AB del tubo formado por las líneas de fuerza, será también de 1 cm^2 , y por lo tanto, el vector campo tendrá por valor

$$E_n = 4 \pi \sigma$$

ya que ese es el número de líneas que pasa por cm^2 de sección paralelo al conductor.

La dirección de E_n , es la de la normal al conductor, pues se suponen las cargas en equilibrio.

§ 235.—Espectros eléctricos.—Así como hemos observado la distribución de las líneas de fuerza del campo magnético usando limaduras de hierro, se pueden observar las del campo eléctrico con polvillo de yeso o pequeños trozos de cerda que se agrupan en el campo eléctrico señalando la dirección de las líneas de fuerza.

Puede realizarse la experiencia apoyando una placa de vidrio o ebonita sobre dos esferas aisladas unidas a ambos polos de una máquina electrostática de Wimshurst (fig. 356). Espolvoreando con yeso o cerdillas y dando pequeños golpecitos sobre la placa, se observará que se orientan señalando la dirección de las líneas de fuerza. La fig. 357 muestra un espectro así obtenido.

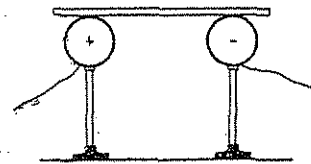


Fig. 356.—Un vidrio plano sobre dos esferas unidas a los polos de una máquina electrostática, permite obtener espectros eléctricos.

§ 236.—Trabajo eléctrico.—Si una masa eléctrica q se

coloca en un punto de un campo, está sometida a la acción de una fuerza.

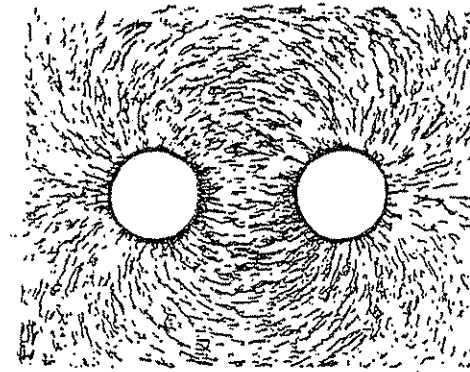


Fig. 357.—Espectro eléctrico entre dos esferas con cargas de signos opuestos.

$$F = E \cdot q \quad [1]$$

En un pequeño desplazamiento e , en que se puede considerar la fuerza constante, ésta realizará un trabajo

$$L = F \times e \times \cos \alpha \quad [4]$$

Siendo α el ángulo que forma e con F .

En un desplazamiento mayor, la fuerza podrá cambiar de intensidad y dirección, de acuerdo con las variaciones del campo.

El trabajo deberá calcularse entonces sumando los trabajos realizados en cada pequeño elemento de trayectoria.

En el desplazamiento desde A hasta B, de la fig. 358, será:

$$L_{AB} = F_1 e_1 \cos \alpha_1 + F_2 e_2 \cos \alpha_2 + \dots \quad [5]$$

que puede expresarse abreviadamente en la siguiente forma:

$$L_{AB} = \sum F \cdot e \cdot \cos \alpha \quad [6]$$

Se demuestra que el trabajo realizado por estas fuerzas al transportar una carga de un punto a otro del campo no depende del camino seguido sino de las posiciones inicial y final en el campo.

Esta propiedad es análoga a la del campo gravitatorio en que sabemos que el trabajo que realiza el peso de un cuerpo, entre dos posiciones cualesquiera, no depende del camino seguido sino de las posiciones inicial y final.

Como consecuencia de esto resulta que en un desplazamiento en que se vuelve al punto de partida, el trabajo total es nulo.

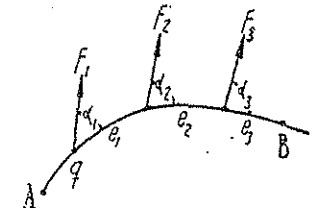


Fig. 358.—Cálculo del trabajo eléctrico en una trayectoria cualquiera.

(1) En el caso en que la carga se moviera siguiendo una línea de fuerza del campo, se tendría: $\cos \alpha = 1$, pero nunca podría calcularse el trabajo en la forma que se hace al levantar una pesa en el campo de gravitación terrestre, ya que F cambia de un punto a otro en dirección e intensidad.

En efecto, si del punto B (fig. 358) se vuelve al punto A siguiendo el mismo camino pero en sentido contrario, el trabajo en cada trozo de trayectoria será igual al de ida pero de signo contrario, pues se ha invertido el sentido del movimiento y no el de las fuerzas.

Por tanto:

$$L_{AB} = - L_{BA}$$

Como este trabajo no depende, por lo ya dicho, del camino seguido, en cualquier trayectoria que partiendo de B lleve a A, el trabajo será igual y de signo contrario al realizado yendo de A hacia B. Por tanto, la suma total en un camino cerrado cualquiera A B C D A será nula (fig. 359).

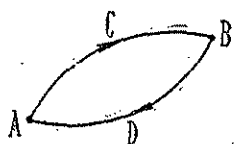


Fig. 359.—El campo eléctrico es conservativo.

Esta propiedad del campo eléctrico se resume diciendo que el campo es conservativo.

Propiedad análoga posee el campo de gravitación terrestre, en que, en un cuerpo que recorriendo cualquier trayectoria,

vuelve al punto de partida, el trabajo total del peso es nulo (la energía potencial del cuerpo es la misma en los estados inicial y final).

§ 237.—Cálculo del trabajo eléctrico en el campo de una carga puntual.—Sea + q_1 una carga eléctrica puntual e imaginemos otra carga + q_2 que se desplace desde A hasta B (fig. 360).

Calcularemos el trabajo eléctrico dividiendo la trayectoria en pequeños trozos que pueden suponerse rectilíneos, y en ellos el campo constante.

Veamos cuál es el trabajo en el trozo AM_1 .

La fuerza aplicada en A será, de acuerdo con la ley de Coulomb.

$$F_A = \frac{q_1 q_2}{r_A^2} \quad [7]$$

y en M_1 :

$$F_1 = \frac{q_1 q_2}{r_1^2} \quad [8]$$

Podemos calcular con el valor medio (media geométrica).

$$F' = \sqrt{F_A \cdot F_1} = \frac{q_1 q_2}{r_A r_1} \quad [9]$$

el trabajo será:

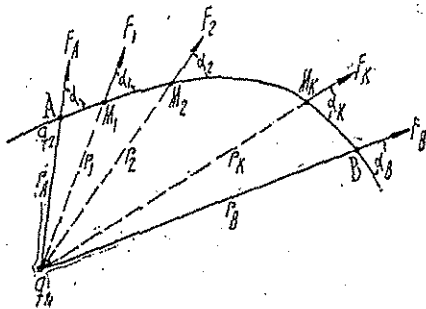


Fig. 360.

$$L_{AM_1} = F' \times AM_1 \cos \alpha \quad [10]$$

Pero,

$$AM_1 \cos \alpha = AN \quad (\text{fig. 361})$$

y siendo AM_1 pequeño, puede admitirse:

$$AN \approx r_1 - r_A$$

Reemplazando en [10]

$$L_{AM_1} = F' \times (r_1 - r_A) = \frac{q_1 q_2}{r_A r_1} (r_1 - r_A)$$

o sea:

$$L_{AM_1} = q_1 q_2 \frac{r_1 - r_A}{r_A r_1} = q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_1} \right)$$

Del mismo modo, el trabajo entre M_1 y M_2 será:

$$L_{M_1 M_2} = q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [11]$$

y así sucesivamente.

El trabajo total de A hasta B se calculará sumando todos estos trabajos, para lo cual se puede sacar como factor común el producto $q_1 q_2$:

$$L_{AM_1} = q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_1} \right)$$

$$L_{M_1 M_2} = q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

.....

$$L_{M_k B} = q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_k} - \frac{1}{r_B} \right)$$

$$L_{AB} = q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad [12]$$



Fig. 361.

La suma se ha simplificado porque las inversas de todas las distancias intermedias aparecen en dos términos consecutivos con signos opuestos.

Resulta entonces demostrado que el trabajo total sólo depende de las posiciones inicial y final de la carga móvil.

Esta demostración puede extenderse a un sistema cualquiera de cargas productoras del campo, puesto que, siendo el trabajo una magnitud escalar, la suma algebraica de los que corresponden a cada una de las cargas dará el trabajo total.

Operando con unidades c.g.s. el trabajo quedará expresado en erg.

Ejemplo:

Se tiene una carga $q_1 = + 5000$ u.e.s. (q) y en su campo otra carga puntual $q_2 = + 200$ u.e.s. (q) se mueve pasando de un punto situado a $r_A = 5$ cm, hasta otro cuya distancia es $r_B = 60$ cm. Calcular el trabajo eléctrico.

Solución:

$$L_{AB} = q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

$$L_{AB} = 5000 \times 200 \left(\frac{1}{5} - \frac{1}{60} \right)$$

$$L_{AB} = 1,83 \times 10^7 \text{ erg} = 0,0183 \text{ joule}$$

§ 238.—Diferencia de potencial.—Se denomina diferencia de potencial entre dos puntos A y B de un campo, al trabajo que realizan las fuerzas eléctricas, cuando la unidad positiva de masa pasa del punto A al punto B.

Escribiremos:

$$V_{AB} = V_A - V_B \quad [13]$$

Siendo L_{AB} el trabajo realizado en el desplazamiento de la carga q , será:

$$V_{AB} = \frac{L_{AB}}{q} \quad [14]$$

O lo que es lo mismo:

$$L_{AB} = q \cdot V_{AB} \quad [15]$$

§ 239.—Unidades de diferencia de potencial.—En dos puntos del campo habrá una diferencia de potencial igual a la unidad, cuando al pasar la unidad de carga eléctrica de uno al otro, se realiza una unidad de trabajo.

En el sistema *electrostático c.g.s.* (1) se tendrá una unidad electrostática c.g.s. de diferencia de potencial cuando al traslado de la unidad c.g.s. de carga corresponda un trabajo de 1 erg.

$$1 \text{ u.e.s. } (v) \times 1 \text{ u.e.s. } (q) = 1 \text{ erg} \quad [16]$$

En el sistema práctico la unidad de diferencia de potencial es el volt (o voltio). Entre dos puntos del campo eléctrico hay una diferencia de potencial de 1 volt cuando al pasar 1 coulomb de uno al otro, el trabajo eléctrico es de 1 joule:

$$1 \text{ volt} \times 1 \text{ coulomb} = 1 \text{ joule} \quad [17]$$

Podemos relacionar fácilmente estas dos unidades.

De [17]:

$$1 \text{ volt} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}} = \frac{10^7 \text{ erg}}{3 \times 10^9 \text{ u. e. s. } (q)} = \frac{1 \text{ erg}}{300 \text{ u. e. s. } (q)}$$

pero en virtud de la [16]:

$$\frac{1 \text{ erg}}{1 \text{ u. e. s. } (q)} = 1 \text{ u. e. s. } (v)$$

(1) Existe también la unidad electromagnética c.g.s., que corresponde al paso de una u.e.m. (q) con producción de trabajo de 1 erg. Vale 10^9 volt.

MIGUEL FARADAY (1791 - 1867)

Gran físico y químico inglés. De origen modesto, hijo de un pobre herrero, comenzó sus estudios con la lectura de los libros, que le llegaban para encuadernar, a los 13 años de edad, en que empezó a trabajar como aprendiz de encuadernador. A partir de 1813 contó con la ayuda de Davy, a cuyo lado trabajó muchos años, acompañándolo en sus viajes por Europa. Llegó a ocupar su puesto de director del laboratorio de la Real Institución. Genial investigador y habilísimo experimentador, descubrió leyes fundamentales como las de la electrólisis y la inducción electromagnética. Construyó la primera máquina dinamo. Su interpretación de los fenómenos electrostáticos abre el camino a la teoría de Maxwell.

La unidad Farad o Faradio, recuerda su nombre.



JAMES CLERK MAXWELL
(1831 - 1879)

Destacado físico inglés, nacido en Edimburgo (Escocia) fue profesor de filosofía natural en Aberdeen, luego de física y astronomía en Londres y en 1871 profesor de física experimental en la Universidad de Cambridge. Notable físico teórico, contribuyó al adelanto de la teoría mecánica del calor y teoría cinética de los gases. Pero su obra más importante es la que hoy se conoce como "teoría electromagnética de Maxwell", que en el aspecto descriptivo de los fenómenos sigue la orientación iniciada por Faraday y en el aspecto teórico prevé las ondas electromagnéticas posteriormente descubiertas por Hertz (1888). Esta teoría es la base de las teorías de la óptica y de la electricidad modernas.

luego: $1 \text{ volt} = \frac{1}{300} \text{ u.e.s. (v)}$ [18]

§ 240.—Potencial en un punto del campo eléctrico.—Elijamos arbitrariamente un punto B del campo eléctrico y midamos las diferencias de potencial de los demás puntos A_1, A_2, \dots etc., con respecto al punto B (fig. 362).

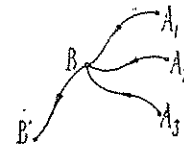


Fig. 362.—Definición de potencial con respecto a un punto.

Podemos asignar, a cada uno de los puntos A_1, A_2, A_3 , un valor igual a esa diferencia, al que llamaremos *potencial con respecto al punto B*.

Si cambiamos de punto de referencia y tomamos, por ejemplo, el B' , todos los valores anteriores quedan aumentados en un valor constante igual a la diferencia de potencial entre B y B' .

En efecto: como la diferencia de potencial entre A_1 y B' es igual al trabajo que realizan las fuerzas eléctricas cuando la unidad positiva de masa pasa del punto A_1 al punto B' , *independientemente del camino seguido*, podemos elegir un camino que pase por B y medir por separado los trabajos.

Tendremos que el trabajo al ir de A_1 a B' es igual a la suma del trabajo al ir de A_1 al punto B, más el trabajo al ir de B hasta B' . Y esto para todos los puntos del campo, cuyo potencial quedará aumentado en la diferencia $V_B - V_{B'}$.

Resulta, en consecuencia, que dado un conjunto de masas eléctricas, crean un campo eléctrico, que por ahora supondremos en el vacío. A cada punto de ese campo corresponderá: *un vector: campo eléctrico*, y *un escalar: potencial eléctrico*; este último definido con aproximación de un valor constante, igual para todos los puntos del campo.

Se suele determinar el potencial con respecto a un punto infinitamente alejado en cuyo caso resulta que el potencial en cada punto del campo es igual al trabajo de las fuerzas eléctricas al transportar la masa eléctrica positiva unidad, desde ese punto hasta el infinito.

§ 241.—Cálculo del potencial en el caso de una carga puntiforme.—Hemos visto que en el campo de una carga q_1 al trasladar entre dos puntos A y B una carga q_2 , el trabajo eléctrico es:

$$L_{12} = q_1 q_2 \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad [19]$$

Si $q_2 = +1$, el trabajo mide la diferencia de potencial entre ambos puntos y es:

$$\frac{L_{AB}}{q_2} = V_{AB} = V_A - V_B = q_1 \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad [20]$$

Suponiendo que el punto B se aleja infinitamente, $r_B = \infty$ y $\frac{1}{r_B} = 0$. El trabajo que mide el potencial A será:

$$V_A = \frac{q_1}{r_A} \quad [21]$$

En general, el potencial en un punto situado a la distancia r de una carga puntiforme q es:

$$V = \frac{q}{r} \quad [22]$$

En caso de tener varias cargas, el potencial en cada punto será igual a la suma de los potenciales debidos a cada una de las cargas, o sea:

$$V = \sum \frac{q_i}{r_i} \quad [23]$$

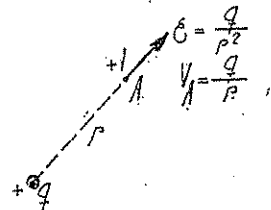


Fig. 363.—Campo y potencial debidos a una carga puntiforme.

Aplicaciones. — 1) Calcular el potencial en un punto situado a distancia $r = 40$ cm de una carga $q = + 2000$ u.e.s. (q), en el vacío.

Solución:

$$V = \frac{q}{r} = \frac{2.000 \text{ u. e. s. } (q)}{40 \text{ cm}} = 50 \text{ u. e. s. } (v)$$

o también, teniendo en cuenta la fórmula [18]:

$$v = 50 \times 300 = 15\,000 \text{ volt.}$$

2) Calcular el potencial en un punto A, situado en el vacío a distancias $r_1 = 20$ cm, $r_2 = 50$ cm y $r_3 = 60$ cm de las tres cargas puntuales $q_1 = + 100$, $q_2 = + 4000$ y $q_3 = - 300$ unidades electrostáticas e.g.s.

Solución:

$$V_A = \sum \frac{q_i}{r_i} = \frac{+ 100}{20} + \frac{2.000}{50} + \frac{- 300}{60}$$

$$V_A = 5 + 40 - 5 = 40 \text{ u.e.s. } (v)$$

o también:

$$V_A = 40 \times 300 = 12\,000 \text{ volt.}$$

Nota.—Los potenciales correspondientes a cargas negativas intervienen con signo contrario, por serlo también los trabajos, ya que las fuerzas cambian de sentido en el campo (atracción en vez de repulsión y vice-versa).

§ 242.—Potencial de un conductor.—Se ha definido el potencial de un punto de un campo eléctrico.

En forma análoga llamaremos potencial en un punto de un conductor, al trabajo de las fuerzas eléctricas al transportar la unidad positiva de masa eléctrica, desde ese punto hasta el infinito.

Podemos demostrar que en todos los puntos de la superficie exterior de un conductor cargado, en equilibrio, el potencial es el mismo.

En efecto: el campo en la superficie debe ser perpendicular a ella, pues si no lo fuera podría descomponerse en una componente normal y otra tangencial. Esta última provocaría el desplazamiento de las cargas eléctricas, contrariamente a lo supuesto. Por tanto, si el campo es perpendicular a la superficie del conductor, en todo desplazamiento imaginado de una carga eléctrica sobre la misma, el trabajo será nu-

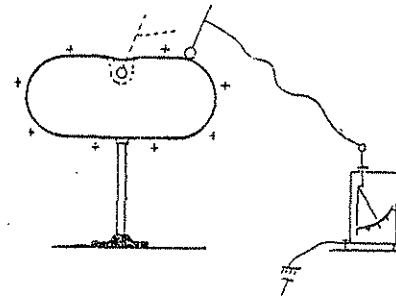


Fig. 364.—El potencial es el mismo en todos los puntos del conductor cargado, en equilibrio.

lo, pues la fuerza es perpendicular al camino, y como consecuencia, no habrá diferencia de potencial.

Además, se comprueba experimentalmente que el potencial es el mismo en todos los puntos de un conductor en equilibrio eléctrico. Para ello, basta tocar diversos puntos del conductor cargado con una esferilla metálica, sostenida por un mango aislador y unida a las hojuelas de un electrómetro, por medio de un largo hilo conductor. La caja del electrómetro debe estar unida a tierra (fig. 364).

Comprobaremos que la indicación del electrómetro es la misma cualquiera que sea el punto tocado del conductor, incluso el interior del mismo si es hueco.

Por otra parte, se comprueba, también experimentalmente, que las indicaciones del electrómetro sólo dependen de la diferencia de potencial entre las hojuelas y la caja del mismo.

Concluimos, en resumen, los dos hechos experimentales siguientes:

1º Las indicaciones del electrómetro dependen de la diferencia de potencial entre las hojuelas y la caja.

2º El potencial eléctrico es el mis-

mo en todos los puntos de un conductor en equilibrio eléctrico.

Del hecho de que en todos los puntos del conductor el potencial sea el mismo, se deduce que no hay campo en su interior, pues el trabajo debe ser igual a cero en todo desplazamiento de una masa eléctrica.

Nota.—La comprobación de que las indicaciones del electrómetro sólo dependen de la diferencia de potencial entre las hojuelas y la caja se realiza uniéndolas a los extremos de las fuentes de potencial constante, que estudiaremos en su oportunidad, y denominamos pilas eléctricas.

Esta conclusión no está reñida con la idea de que, obedeciendo a la ley de Coulomb la separación de las hojas depende de su carga eléctrica, como veremos al estudiar el concepto de capacidad electrostática, pues allí comprobaremos que la carga eléctrica de las hojas del electrómetro es proporcional a dicha diferencia de potencial.

§ 243.—Potencial de la tierra como potencial cero.—El potencial es un valor relativo a dos puntos: aquél en que se calcula y el que se toma como referencia, cuyo potencial se supone nulo.

En el estudio de los campos producidos por masas eléctricas alejadas de todo otro cuerpo se toma como potencial cero el de los puntos infinitamente alejados.

Como la tierra es un gran conductor eléctrico cuyo potencial podemos suponer constante, se ha convenido en tomar como potencial cero el de la tierra al estudiar los campos eléctricos de las cargas eléctricas próximas a ella.

Por lo tanto, al definir el potencial de un punto del campo eléctrico o de un conductor, diremos que es el trabajo que realizan las fuerzas eléctricas cuando la unidad positiva de masa pasa de ese punto o conductor a la tierra.

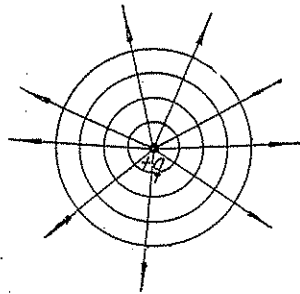


Fig. 366.—Superficies equipotenciales y líneas de fuerza en el campo eléctrico de una carga puntiforme.

§ 244.—Superficies equipotenciales.—El lugar geométrico de los puntos de un campo eléctrico que tienen el mismo potencial constituye una superficie equipotencial. Es decir: existen superficies tales que al desplazarse sobre ellas una masa eléctrica, el trabajo de las fuerzas del campo es nulo.

El fenómeno es análogo al de los planos horizontales en el campo gravitatorio de la tierra, pues sabemos que moviendo un cuerpo sobre uno de dichos planos el trabajo del peso es igual a cero.

mos que moviendo un cuerpo sobre uno de dichos planos el trabajo del peso es igual a cero.

En el campo de una carga eléctrica puntiforme (fig. 365) las superficies equipotenciales son esferas concéntricas.

En un conductor cargado, como el potencial es el mismo en todos sus puntos, la superficie exterior del conductor será una superficie equipotencial.

Es evidente que, para que el trabajo sea igual a cero en todo desplazamiento sobre la superficie equipotencial, será necesario que el campo sea perpendicular a la misma en todos sus puntos.

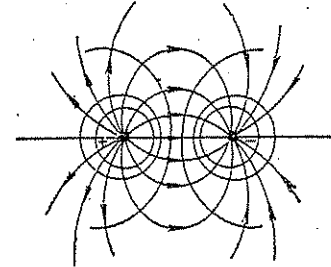


Fig. 366.—Líneas de fuerza y superficies equipotenciales en el campo eléctrico de dos cargas puntiformes de distinto signo.

Será fácil entonces, dada la condición de perpendicularidad y las líneas de fuerza, trazar las superficies equipotenciales, y recíprocamente, dadas las segundas trazar las líneas de fuerza (fig. 366).

§ 245.—Analogías del potencial electrostático.—Se estudian en la física otros campos de fuerzas en los cuales se define el potencial en forma análoga a como lo hemos hecho en el campo eléctrico.

En mecánica se ha estudiado la ley de la gravitación de Newton, que corresponde a la ley de Coulomb en el campo eléctrico.

Una diferencia importante se debe al hecho de que en el campo gravitatorio las fuerzas son siempre de atracción, mientras en el eléctrico pueden ser de atracción o de repulsión.

La tierra, siendo una masa material, crea a su alrededor un campo gravitatorio y definiendo en él la diferencia de potencial entre dos puntos, como el trabajo que realiza el peso, cuando una masa igual a la unidad pasa de un punto al otro, resulta la variación de potencial en el campo gravitatorio, igual a la variación de energía potencial (1). Sabemos que esta energía potencial depende exclusivamente del nivel o altura del cuerpo, pues es la misma en todos los puntos de un plano horizontal. En una porción reducida del campo, los planos horizontales son las superficies equipotenciales. En realidad, son esferas concéntricas, como en el caso de una esfera cargada en el campo eléctrico.

Si en lugar de cuerpos sólidos suponemos un líquido colocado en el campo gravitatorio, su comportamiento será análogo al de la electricidad en el campo eléctrico, pues se moverá, mientras sea posible, hacia las regiones del campo en que la

(1) En rigor con signo cambiado.

energía potencial y el potencial son mínimos. En esta analogía, el líquido corresponde al fluido eléctrico y lo que en el campo eléctrico es la diferencia de potencial entre dos puntos, en el campo de gravitación corresponde también a la diferencia de potencial, la cual a su vez sólo depende de la diferencia de nivel entre esos dos puntos.

Por ello se suele decir que el potencial da la medida del nivel eléctrico de las cargas y el hecho de que dos conductores cargados, a distinto potencial, igualan sus potenciales cuando se los une eléctricamente, pasando cargas del de mayor al de menor potencial, se compara con el caso de dos recipientes con líquidos a distintos niveles, los que se igualan al unirlos con un tubo (vasos comunicantes). El electrómetro funcionaría como un tubo indicador de nivel.

Debe cuidarse de no llevar la analogía más allá de estos hechos sencillos, pues a la electricidad, en caso de considerársela como fluido, deben atribuírsele propiedades muy diferentes a las de los líquidos y un conductor cargado no puede suponerse análogo a un recipiente con líquido, pues las condiciones de ambos son completamente distintas. A este respecto véase especialmente el capítulo siguiente, donde se trata de la capacidad electrostática y condensadores.

El concepto de potencial es muy amplio y se aplica a todo campo de fuerzas. Aunque en este libro no lo hemos tratado, se aplica al campo magnético en la misma forma que a los campos eléctrico y gravitatorio.

CAPÍTULO XIII

CAPACIDAD - CONDENSADORES - ENERGÍA - DIELECTRICOS

§ 246.—Capacidad eléctrica - Definición - Unidades.—Se llama capacidad eléctrica, o electrostática de un conductor, al cociente de su carga por el potencial V .

$$C = \frac{q}{V} \quad [1]$$

Se comprueba experimentalmente que la capacidad es una constante mientras el conductor se encuentra aislado y alejado de todo otro conductor. En general, a cada nueva configuración de un sistema de cuerpos corresponderá un nuevo valor de la capacidad de cada uno de ellos.

La unidad de capacidad corresponderá al conductor que con la unidad de carga adquiere un potencial igual a la unidad.

En el sistema práctico, la unidad es el Farad (o Faradio) que es la capacidad de un conductor cuyo potencial es un volt cuando se le proporciona la carga de un coulomb.

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}} \quad [2]$$

En el sistema de unidades electrostáticas c.g.s., la unidad es la capacidad de un cuerpo cuyo potencial es 1 u.e.s. (V) cuando se lo carga con 1 u.e.s. (q).

$$1 \text{ u. e. s. } (C) = \frac{1 \text{ u. e. s. } (q)}{1 \text{ u. e. s. } (V)} \quad [3]$$

Esta unidad tiene las dimensiones de una longitud y en el sistema c.g.s es el centímetro. Se demuestra que está represen-

tada por la capacidad de una esfera conductora cuyo radio es 1 cm.

La relación entre ambas unidades de capacidad puede hallarse fácilmente:

$$1 \text{ farad} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}} = \frac{3 \times 10^9 \text{ u.e.s. } (q)}{\frac{1}{300} \text{ u.e.s. } (V)} = 9 \times 10^{11} \text{ u.e.s. } (C)$$

$$1 \text{ farad} = 9 \times 10^{11} \text{ cm} \quad [4]$$

Significa esto que una esfera de capacidad igual a 1 farad debe tener un radio de 9 millones de kilómetros (9×10^{11} cm).

La capacidad electrostática de la tierra, considerada como una esfera conductora, es entonces:

$$6\,370 \times 10^8 \text{ cm} = \frac{6\,370 \times 10^8}{9 \times 10^{11}} \text{ farad} = 0,708 \times 10^{-3} \text{ farad}$$

En la práctica se utiliza más corrientemente el microfarad (o microfaradio) que es igual a 1 millonésimo de farad.

$$1 \mu F = 10^{-6} \text{ farad}$$

El μF es igual a 9×10^8 cm ⁽¹⁾. La capacidad de la esfera terrestre es 708 μF .

§ 247.—Capacidad de una esfera.—Se puede demostrar que la capacidad eléctrica de una esfera aislada y alejada de todo otro conductor, se mide por su radio.

Para ello imaginemos una esfera (fig. 367) de radio R cuya carga es Q y calculemos el potencial en su centro aplicando la fórmula [23] § 241.



$$V = \sum \frac{q_i}{r_i}$$

En este caso, como la totalidad de la carga está a la distancia R del centro, el potencial resulta:

$$V = \frac{\sum q}{R} = \frac{Q}{R} \quad [5]$$

Fig. 367.—La capacidad eléctrica de una esfera conductora es igual a su radio.

Este es el potencial de la esfera, pues siendo conductora, el potencial en todos sus puntos es el mismo.

Para calcular la capacidad debemos aplicar la fórmula [1]:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{Q/R} = R \quad [6]$$

Con lo cual queda demostrado que la capacidad electrostática de la esfera es igual a su radio, y resulta, por tanto, que la unidad electrostática c.g.s. de capacidad es el centímetro.

Aplicaciones.—1) Un conductor adquiere un potencial de 4 000 volt con una carga de 0,2 coulomb. ¿Qué capacidad tiene?

(1) Existe también la unidad c.g.s. electromagnética de capacidad que es igual a 10^9 farad igual a 9×10^{20} cm.

Solución: $C = \frac{Q}{V} = \frac{0,2}{4\,000} = 0,000\,05 \text{ farad}$

o también:

$$C = 50 \text{ microfarad } (\mu F)$$

y

$$C = 9 \times 10^8 \times 50 = 45 \times 10^9 \text{ cm}$$

2) Una esfera de radio R = 20 cm, aislada, se pone en contacto con una fuente de electricidad cuyo potencial es V = 3 000 volt. ¿Qué carga toma de la misma?

Solución:

$$Q = C \cdot V$$

En unidades c.g.s., por ser C = R para la esfera:

$$Q = 20 \text{ cm} \times \frac{3\,000}{300} \text{ u.e.s. } (V) = 200 \text{ u.e.s. } (q)$$

o también:

$$\frac{200}{3 \times 10^9} \text{ coulomb} = \frac{2}{3} \times 10^{-7} \text{ coulomb}$$

§ 248.—Principio de los condensadores.—La capacidad eléctrica de los conductores es constante mientras no se modifique la posición de los demás cuerpos colocados en su campo.

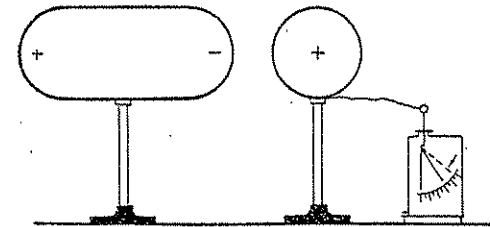


Fig. 368.—La capacidad de un conductor aumenta por la proximidad de otros conductores.

Si a un conductor cargado, unido a un electrómetro, se le aproxima otro conductor descargado, se observa que su potencial disminuye, pues las hojas del electrómetro se acercan (fig. 368).

Como la carga del cuerpo no se ha modificado por la presencia del otro conductor, a la disminución del potencial corresponde un aumento de capacidad, pues el cociente

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

crece al disminuir V si q se mantiene constante. Alejado nuevamente el segundo conductor se observará que la divergencia de las hojas del electrómetro vuelve a su valor primitivo.

La disminución de potencial se explica por la presencia, en el campo, de las cargas eléctricas inducidas en los extremos del conductor aproximado.

Si repetimos la experiencia, pero unimos a tierra el segundo conductor, observaremos una mayor disminución de potencial, o sea, un mayor aumento de capacidad (fig. 369).

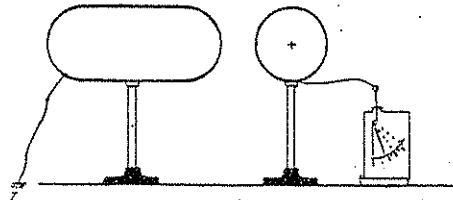


Fig. 369.—El aumento de capacidad electrostática es mayor cuando el cuerpo que se aproxima está unido a tierra.

Concluimos, en resumen, que la capacidad electrostática de un conductor aumenta por la proximidad de otros conductores aislados y aumenta aún más si estos se unen a tierra.

En este hecho se fundan los condensadores, que son aparatos de gran capacidad electrostática con relación a sus dimensiones.

La consecuencia es que, unidos a una fuente de potencial constante, adquieren una carga tanto mayor cuanto mayor es su capacidad.

Hemos visto que una esfera alejada de todo otro conductor, de radio igual al de la tierra, tiene una capacidad aproximadamente igual a $700 \mu F$, en cambio se construyen condensadores de $1 \mu F$ contenidos en una pequeña caja de pocos centímetros de arista.

En las experiencias corrientes la capacidad de los conductores con que se trabaja, se encuentra modificada por las paredes del laboratorio y la proximidad del observador, que forma parte del sistema de cuerpos que intervienen en el fenómeno electrostático. Por eso las experiencias delicadas se realizan dentro de cámaras protectoras de Faraday.

Estos hechos relativos a la modificación de la capacidad electrostática muestran por qué la analogía hidráulica en la explicación de este grupo de fenómenos, no puede llevarse mucho más adelante de lo que hemos señalado al tratar del potencial.

§ 249.—Condensadores.—Todo condensador está formado por dos conductores próximos que se unen a puntos de distinto potencial. Estos conductores se llaman armaduras del condensador. La sustancia aisladora que los separa (puede ser el vacío) se denomina dieléctrico.

Como ambas armaduras se encuentran muy próximas, adquieren cargas iguales y de signo contrario.

Se llama capacidad del condensador al cociente de la carga de una de sus armaduras, por la diferencia de potencial entre ambas:

$$C = \frac{q}{V_1 - V_2} \quad [7]$$

Cuando una de las armaduras está unida a tierra, su potencial es cero a pesar de que su carga es distinta de cero. La diferencia de potencial será igual al potencial de la armadura aislada o colector, y en este caso:

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

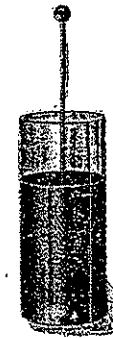


Fig. 370.—Botella de Leyde.

Es clásica la botella o jarra de Leyde, formada por un vaso de vidrio con dos armaduras metálicas, una exterior y otra interior (fig. 370). Para cargarla se une a tierra la armadura exterior y la interior a una máquina electrostática; esta armadura suele llamarse colector.

Para descargar el condensador basta unir metálicamente sus armaduras.

Los condensadores planos (fig. 371 y 372) están formados por dos planos metálicos, aislados, próximos. Se demuestra que, si los planos son muy extensos en comparación con su distancia, la capacidad es proporcional a la superficie de las armaduras e inversamente proporcional a su separación. En el vacío es:

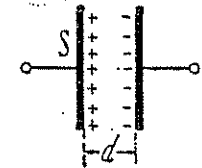


Fig. 371.—Condensador plano.

$$C = \frac{S}{4\pi d}$$

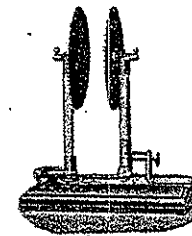


Fig. 372.—Condensador plano.

Los condensadores cilíndricos (fig. 373) están formados por dos cilindros metálicos, de eje común.

Si la longitud es muy grande comparada con la diferencia de los radios r_1 y r_2 , la capacidad del condensador es proporcional a la longitud e inversamente proporcional al logaritmo natural de la relación

$\frac{r_2}{r_1}$, es decir, aumenta al disminuir la separación de las armaduras.

El condensador esférico (fig. 374) está formado por dos esferas concéntricas. La capacidad es proporcional a la superficie de la esfera interior y aumenta al disminuir la separación de las mismas.

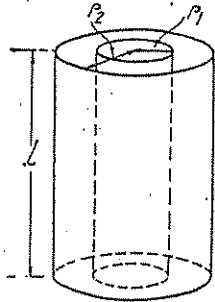


Fig. 373.—Condensador cilíndrico.

En las aplicaciones se utilizan condensadores de gran capacidad formados por dos cintas de papel de estaño separadas con papel parafinado y arrolladas de modo que presentan gran capacidad en muy pequeño volumen (fig. 375).

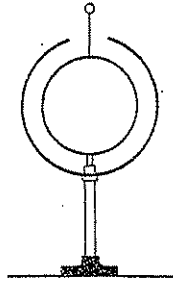


Fig. 374.—Condensador esférico.

En la máquina electrostática de Wimshurst

se colocan dos condensadores destinados a acumular las cargas que se van produciendo, hasta que la diferencia de potencial sea suficiente para producir la chispa. Como estos condensadores se conectan o desconectan a voluntad, se puede observar su efecto, pues cuando están conectados aumenta la luminosidad de la chispa que se obtiene.

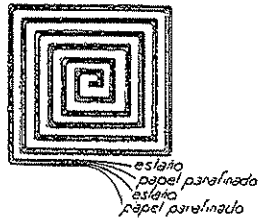


Fig. 375.—Se obtienen condensadores de gran capacidad arrollando dos cintas de papel conductor separadas con papel parafinado.

§ 250.—La constante dieléctrica.—Imaginemos un condensador plano

cargado, con una de sus armaduras unida a tierra y la otra a un electrómetro con su caja unida a tierra.

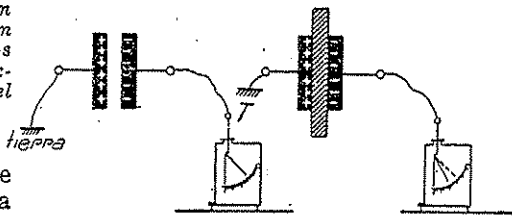


Fig. 376.—La interposición de un dieléctrico entre sus armaduras aumenta la capacidad del condensador.

Si se interpone entre las armaduras una sustancia aisladora cualquiera, observaremos que disminuye la separación de

las hojas del electrómetro (fig. 376). Al retirarla volverá a la indicación primitiva. Esto demuestra que la capacidad del condensador depende del dieléctrico interpuesto entre sus armaduras.

Si hacemos de modo que el dieléctrico llene completamente el espacio entre las armaduras, observaremos que la relación entre la capacidad C_ϵ del condensador con dieléctrico y la capacidad C_0 sin dieléctrico es una constante que lo caracteriza.

$$\epsilon = \frac{C_\epsilon}{C_0} \quad [8]$$

La constante ϵ se denomina constante dieléctrica o poder inductor específico, y es mayor que la unidad. Para el vidrio es $\epsilon = 5,3$ a 7 , para la ebonita $\epsilon = 2,9$ y para el agua, que es una de las sustancias de mayor constante dieléctrica, es igual a 81 unidades.

La tabla V da el valor de la constante dieléctrica de las sustancias más corrientes.

TABLA V
CONSTANTE DIELECTRICA

Dieléctrico	ϵ	Dieléctrico	ϵ
agua	81	hielo	3,1
aire (0° y 760 mm)	1,000576	mica	6 a 8
aire líquido	1,5	papel	6 a 2,5
ámbar	2,8	parafina	2,3
azufre	4	petróleo	4,5
cuarzo	4,5	porcelana	1,9 a 2,3
diamante	5,5	vidrios	5,3 a 7
ebonita	2,9		

Veremos más adelante que la constante dieléctrica tiene un significado importante en el estudio del campo eléctrico.

§ 251.—Cálculo de la capacidad de un condensador plano.—Sea un condensador plano formado por dos placas de superficie S , a la distancia d y cuyos potenciales son V_1 y V_2 (fig. 377).

Consideremos que entre ambas armaduras, cuya carga es q existe el vacío.

Entre ellas habrá un campo uniforme, pues las suponemos muy próximas como para poder despreciar la deformación que se produce en los bordes.

La diferencia de potencial $V_1 - V_2$ es igual al trabajo de la fuerza eléctrica cuando la masa $+ 1$ pasa de una a otra armadura. Siendo E la intensidad de campo es:

$$V_1 - V_2 = E \cdot d,$$

De la carga $+ q$, distribuida sobre la superficie S salen $4\pi q$ líneas

que llegan a la carga $-q$ de la otra armadura. Por cada cm^2 pasará un número de líneas de fuerza igual al campo E .

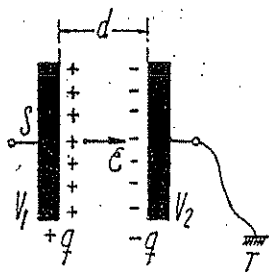


Fig. 377

$$E = \frac{4 \pi q}{S}$$

Reemplazando en la anterior:

$$V_1 - V_2 = \frac{4 \pi q d}{S}$$

La capacidad del condensador será:

$$C = \frac{q}{V_1 - V_2} = \frac{q}{\frac{4 \pi q d}{S}}$$

luego:

$$C = \frac{S}{4 \pi d}$$

Si entre las armaduras se interpone un dieléctrico de constante dieléctrica ϵ la capacidad se multiplica por esta constante:

$$C = \frac{\epsilon S}{4 \pi d}$$

Esta fórmula puede aplicarse, con suficiente aproximación, al cálculo de la capacidad de condensadores cilíndricos o esféricos de muy pequeño espesor.

§ 252.—Asociación de condensadores - Baterías.—Los condensadores se pueden agrupar de dos maneras para formar *baterías de condensadores*.

La agrupación en paralelo o en cantidad consiste en unir de todos los condensadores una armadura a un punto fijo y la otra armadura a otro.

Los condensadores C_1 , C_2 y C_3 de la figura 378 están unidos en paralelo.

Al cargar esta batería, todos los condensadores se cargarán a la diferencia de potencial $V_1 - V_2$. La cantidad total de electricidad será:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 = C_1 (V_1 - V_2) + C_2 (V_1 - V_2) + C_3 (V_1 - V_2) = (C_1 + C_2 + C_3) (V_1 - V_2)$$

La capacidad resultante será:

$$C = \frac{q}{V_1 - V_2} = C_1 + C_2 + C_3 \quad [9]$$

Como se ve, resulta una batería cuya capacidad es igual a la suma de las de los condensadores que la forman.

La figura 379 muestra una batería de cuatro botellas de

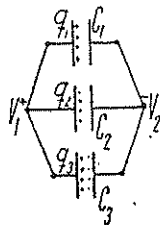


Fig. 378.—Asociación de condensadores en paralelo.

Leyde en paralelo, y en la fig. 378 se ve cómo se representan los condensadores esquemáticamente.

Suelen utilizarse condensadores múltiples, contruídos con hojas metálicas separadas por mica o papel parafinado, que en realidad son baterías en paralelo. Se obtienen así grandes capacidades en pequeño volumen. Cuando la superficie de las armaduras que están colocadas una frente a otra puede modificarse, se obtiene un *condensador variable* (fig. 380).

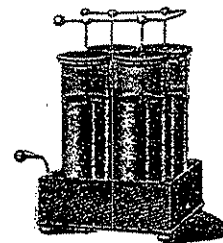
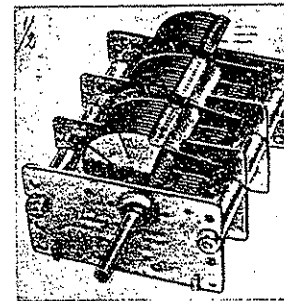


Fig. 379.—Batería de botellas o jarras de Leyde, asociadas en paralelo.



La conexión en serie o en cascada consiste en unir cada armadura de uno de los condensadores a una del siguiente. Las armaduras que quedan libres en los extremos de la serie se unen a la fuente de potenciales V_1 y V_2 (figura 381).

Fig. 380.—Condensador de capacidad variable, por variación de la superficie de las placas que se enfrentan.

Para cada condensador se cumple la relación $V = \frac{q}{C}$

Como en las armaduras no unidas a la fuente sólo hay cargas inducidas, todos los condensadores adquieren la misma carga q .

La diferencia de potencial total es:

$$V_1 - V_2 = (V_1 - V') + (V' - V'') + (V'' - V_2) \quad [10]$$

pero:

$$V_1 - V' = \frac{q}{C_1}; V' - V'' = \frac{q}{C_2}; V'' - V_2 = \frac{q}{C_3}$$

reemplazando en [10]:

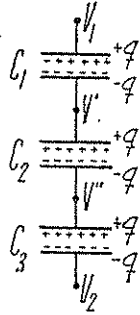
$$V_1 - V_2 = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} = q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

Luego la capacidad del sistema será tal que:

$$\frac{1}{C} = \frac{V_1 - V_2}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad [11]$$

Es decir: la inversa de la capacidad del sistema es igual a la suma de las inversas de las capacidades de los condensadores que lo forman.

En algunos casos se utilizan baterías más complejas, formadas agrupando en paralelo varias series de condensadores (fig. 282).



Ejemplos:

1) Cuatro condensadores de capacidades $C_1 = 0,5 \mu F$, $C_2 = 1 \mu F$, $C_3 = 2 \mu F$ y $C_4 = 5 \mu F$, se asocian sucesivamente en paralelo y en serie.

Calcular la capacidad de la batería formada en cada caso.

Solución:

a) en paralelo:

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

$$C_p = 0,5 + 1 + 2 + 5 = 8,5 \mu F$$

b) en serie:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}$$

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{0,5} + \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{8 + 4 + 2 + 1}{4} = \frac{15}{4}$$

$$C_s = \frac{4}{15} \mu F = 0,266 \mu F$$

2) Tres condensadores iguales de capacidad $C = 1 \mu F$ se asocian sucesivamente en paralelo y en serie. Calcular la capacidad de las baterías formadas.

Solución:

a) paralelo:

$$C_p = 3 C = 3 \mu F$$

b) serie:

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{3}{C}$$

$$C_s = \frac{C}{3} = \frac{1}{3} \mu F$$

En general para n condensadores resultaría:

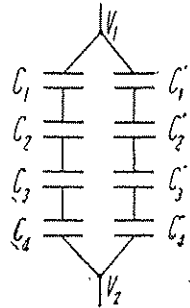


Fig. 382.—Batería de condensadores en conexión mixta.

en paralelo:

$$C_p = n C$$

en serie:

$$C_s = \frac{C}{n}$$

ENERGÍA

§ 253.—Energía de un conductor cargado.—Sea un conductor aislado cuya carga es Q siendo V su potencial.

Esta carga posee energía potencial, pues si se produce la descarga del conductor se realizará un trabajo de las fuerzas eléctricas.

Imaginemos que para descargar el conductor hacemos pasar a tierra pequeñas cargas q cuya suma total sea Q .

A medida que el conductor se descargue, irá disminuyendo su potencial hasta anularse. Para el primer elemento de carga llevado a tierra, el trabajo del campo será:

$$\Delta L = q \cdot V$$

Para el siguiente habrá que multiplicar por el nuevo potencial V_1 , menor que V , y así sucesivamente hasta que, al retirar el último elemento, el potencial del conductor será nulo, pues no quedan cargas en él.

La suma de todos los trabajos será la misma que si se hubiera llevado a tierra la carga total Q del cuerpo a un potencial que hubiera sido el promedio entre el valor inicial y el final, o sea $\frac{V}{2}$.

El trabajo total será:

$$L = Q \frac{V}{2} = W \quad [12]$$

Este trabajo, que puede realizar el cuerpo al descargarse, mide la *energía de la carga eléctrica*, o *energía del conductor cargado*.

Siendo

$$Q = C V$$

puede también escribirse:

$$W = \frac{1}{2} Q V = \frac{1}{2} C V^2$$

Aplicación:

1) Se tiene una esfera de radio $r = 30$ cm cargada con 300 u.e.s. (q). Calcular su energía.

Solución:

$$\text{Como } C = r \text{ y } V = \frac{Q}{C}$$

$$W = \frac{1}{2} Q V = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{r}$$

$$W = \frac{1}{2} \frac{300^2}{30} = 1.500 \text{ erg} = 0,000 15 \text{ joule}$$

2) Un conductor se carga con $Q = 0,2$ coulomb y adquiere un potencial $V = 10\ 000$ volt. Calcular su energía.

Solución:

$$W = \frac{1}{2} Q V = \frac{1}{2} 0,2 \times 10\ 000 = 1\ 000 \text{ joule}$$

§ 254.—Energía de un condensador eléctrico.—Si tenemos un condensador cargado, podemos calcular su energía por el

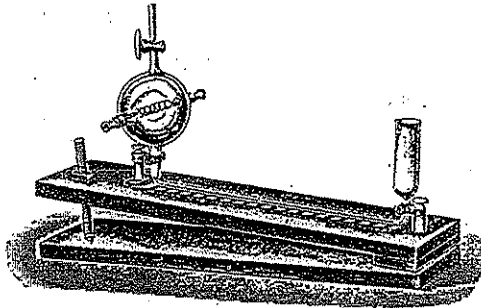


Fig. 383.—Termómetro de Riess para apreciar el efecto térmico de la corriente eléctrica que circula por un pequeño conductor al descargar un condensador.

trabajo del campo al llevar la carga de una de las armaduras a la otra. Repitiendo el razonamiento del párrafo anterior, llegamos a la conclusión de que si V es la diferencia de potencial de las armaduras y Q la carga en una de ellas, la energía está medida por la expresión:

$$W = \frac{1}{2} Q V = \frac{1}{2} C V^2 \quad [14]$$

En el caso de que se tenga una batería de condensadores, el resultado es el mismo, tomando como C el valor correspondiente a la capacidad de la batería.

La prueba de la existencia de esta energía la tenemos en la chispa que se produce al descargar un condensador, en la cual se genera luz y calor.

Si la descarga se produce a través de un conductor muy delgado puede fundirse por efecto del calor desarrollado.

En el termómetro de Riess (fig. 383) se observa el efecto

térmico de la descarga por la dilatación del aire colocado en un pequeño balón, con un indicador sensible de la variación de volumen.

DIELECTRICOS

§ 255.—Campo en el interior de un dieléctrico - Generalización de la ley de Coulomb.—Se ha dicho que al reemplazar el vacío por un dieléctrico cualquiera, en el espacio que separa las armaduras de un condensador, la capacidad queda multiplicada por la constante dieléctrica. Esto significa que, a igualdad de carga la diferencia de potencial será ϵ veces menor.

Pero la diferencia de potencial es igual al trabajo de las fuerzas eléctricas cuando la masa $+1$ pasa de una armadura a otra. El hecho de que dicha diferencia se reduzca, significa que se ha reducido la fuerza, o sea, el campo, pues la longitud de camino no se modifica.

Deducimos entonces que, en cada punto, el campo eléctrico ha quedado dividido por la constante dieléctrica ϵ :

$$E_\epsilon = \frac{E_0}{\epsilon} \quad [15]$$

siendo E_0 el campo que había en el vacío donde $\epsilon_0 = 1$. En el caso del campo debido a una masa puntiforme q habíamos llegado a la expresión, en el vacío:

$$E_0 = \frac{q}{r^2}$$

para un punto situado a la distancia r .

Si la masa se encuentra en un medio dieléctrico indefinido de constante ϵ , resulta:

$$E_\epsilon = \frac{1}{\epsilon} \frac{q}{r^2} \quad [16]$$

Si en el punto en que el campo es E_ϵ , se coloca una carga q' , la fuerza que actúa sobre ella será:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \frac{q q'}{r^2} \quad [17]$$

Esta es la expresión de la *ley de Coulomb* generalizada para dos masas puntiformes colocadas en un dieléctrico cualquiera.

Ejemplo:

Se tienen dos masas eléctricas puntiformes $q_1 = + 900$ u.e.s. (q), $q_2 = + 1620$ u.e.s. (q) colocadas en agua pura, a la distancia $r = 3$ cm. Calcular la fuerza que actúa entre ellas.

Solución:

$$F = \frac{1}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{81} \cdot \frac{900 \times 1620}{9} = 2000 \text{ dina}$$

§ 256.—Inducción eléctrica.—Hemos señalado el hecho de que en todo campo eléctrico se manifiestan acciones ponderomotrices o sea fuerzas sobre las cargas eléctricas que se colocan en él y fenómenos de inducción, es decir, aparecen cargas eléctricas inducidas sobre un conductor que se coloque en dicho punto.

Las acciones ponderomotrices se representan por el vector campo eléctrico que ya hemos estudiado.

Para caracterizar los fenómenos de inducción estudiaremos las propiedades del campo utilizando dos pequeños discos (discos de Faraday) y con ellos mediremos las cargas inducidas por unidad de superficie.

Los discos de Faraday son pequeños, de metal, y llevan mangos aisladores (fig. 384). Colocados en un punto del campo eléctrico se generan, por inducción, cargas eléctricas. Supongamos que se han colocado perpendiculares a la dirección del vector campo eléctrico E . Sobre uno de los discos se genera una carga negativa y sobre el otro una carga positiva. Si se los separa en ese punto y se los lleva a un electrómetro con caja de Faraday se podrá medir la carga inducida. Se comprueba que, si el medio es homogéneo e isotrópico, la carga de cada disco es máxima cuando se han

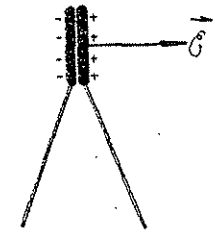


Fig. 384.—Discos de Faraday, con mango aislador, para la determinación experimental del módulo del vector inducción electrostática.

colocado en la posición indicada, es decir, perpendiculares al campo eléctrico.

Si es σ , la carga generada por unidad de superficie, en el disco colocado perpendicular a la dirección del campo, llamaremos vector inducción eléctrica al que tiene por módulo:

$$D = 4 \pi \sigma. \quad [18]$$

por dirección: la de la normal a los discos cuando la carga es máxima, y sentido: el de la normal a la superficie en que se genera la carga positiva.

Este vector coincide en dirección y sentido con el vector campo en los medios dieléctricos isotrópicos homogéneos.

Por tanto podrá escribirse:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad [19]$$

siendo ϵ una constante que caracteriza al medio.

Se comprueba que ésta es precisamente la constante dieléctrica que hemos definido al estudiar los condensadores.

Los vectores E y D determinan entonces las características del campo eléctrico, pues con ellos podemos ahora calcular qué fuerza actúa sobre una carga colocada en el campo o qué carga aparece por inducción sobre una superficie metálica.

Se comprende que, así como hemos definido las líneas de fuerza, podemos definir ahora líneas de inducción en forma totalmente análoga. Estas líneas salen de las masas eléctricas positivas y terminan en las masas negativas.

En el vacío, siendo $\epsilon = 1$, los vectores E y D , son idénticos y por tanto las líneas de fuerza y de inducción no se diferencian.

§ 257.—Acción del dieléctrico - Polarización.—El hecho de que los fenómenos electrostáticos se modifiquen en el interior de los dieléctricos se explica admitiendo

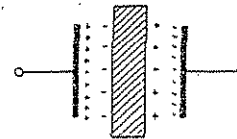


Fig. 385.—El dieléctrico se comporta como si en su superficie aparecieran cargas eléctricas.

que el interior de los mismos el campo eléctrico produce un cierto ordenamiento molecular, algo semejante a la acción que experimentan las sustancias ferromagnéticas en el campo magnético. El dieléctrico se comporta como si en su superficie aparecieran masas eléctricas inducidas proporcionales al campo eléctrico actuante (fig. 385).

Y ello se explica admitiendo que cada pequeño elemento consiste en un dipolo eléctrico, es decir, un par de cargas eléctricas iguales y de signo contrario que se orienta por efecto del campo (fig. 386 a). En el interior del dieléctrico se anulan los efectos

de las cargas opuestas de los dipolos próximos y sólo subsiste el efecto de las cargas en las superficies límites, que se superpone al de las cargas que crean el campo, modificándolo (fig. 386 b).

Este ordenamiento de los dipolos elementales se denomina polarización del dieléctrico.

En algunos casos puede comprobarse que esta polarización subsiste aún suprimido el campo exterior. Es clásica la experiencia del condensador desmontable (fig. 387), que consiste en cargar una botella de Leyde y desmontarla mientras está cargada.

En estas condiciones pueden tocarse ambas armaduras y ponerse en contacto sin que se produzca ninguno de los fenómenos característicos de la descarga eléctrica.

Si ahora se arma nuevamente la botella se comprueba que, al unir las armaduras con un grueso conductor, se produce la descarga.

Esto indica que el dieléctrico, polarizado durante la carga, permaneció en las mismas condiciones durante el proceso de desarmado y vuelta a armar de la botella.

Otro hecho que se atribuye a la polarización del dieléctrico es el que se observa al descargar una botella de Leyde. Se comprueba que, unidas las armaduras de modo que salte una chispa, luego de un instante vuelven a obtenerse otras chispas de descarga sin haber procedido a la recarga. Esto se explica admitiendo que en la primera descarga el dieléctrico no se ha despoliarizado completamente

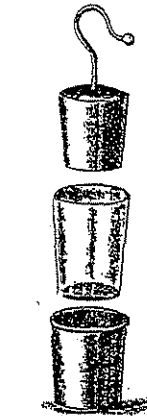


Fig. 387.—Condensador desarmable para comprobar que el dieléctrico almacena energía eléctrica.

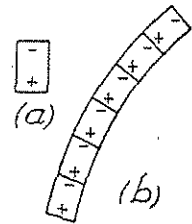


Fig. 386.—Polarización del dieléctrico por ordenamiento de los dipolos elementales.

y la polarización residual da origen a la formación de nuevas cargas en las armaduras.

§ 258.—**Electrómetros.**—En todo el curso de la electrostática hemos tenido necesidad de referirnos a experiencias en que se median cantidades de electricidad o diferencias de potencial, y en todos los casos hemos dicho que se realizaban con un electrómetro.

El electrómetro tiene una capacidad electrostática C de modo que, al establecer una diferencia de potencial V entre las hojas y la caja, adquieren una carga $q = CV$.

Se comprueba entonces que es equivalente decir que la separación leída depende de la cantidad de electricidad o de la diferencia de potencial.

En todos los casos es necesaria una *calibración* del electrómetro, realizada experimentalmente, pues no es posible deducir teóricamente la ley de variación de la separación de las hojas en función de la carga o la diferencia de potencial. En ella influye el peso de las hojas, las dimensiones, la distancia de la caja, etc., factores todos difíciles de determinar.

Entre los tipos más corrientes de electrómetros podemos señalar los siguientes:

1º **Electrómetro de hojuelas de Exner** (fig. 388).—El modelo construido por Elster y Geitel es un electrómetro común con dos hojuelas colocadas a los lados de una varilla central. En un anteojo auxiliar se lee la separación de las hojuelas mediante un espejo plano que da la imagen de una escala en el plano de las hojuelas (escala virtual).

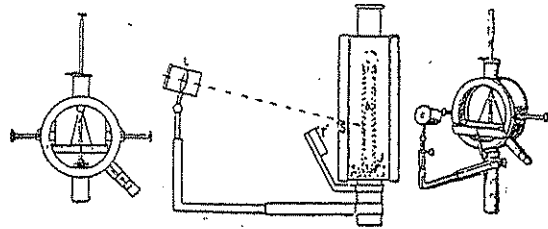


Fig. 388.—*Electrómetro de Exner según Elster y Geitel.*

2º **Electrómetro bifilar de Wulf** (fig. 389).—Utilizado para medir diferencias de potencial aproximadamente entre 5 y 300 voltios.

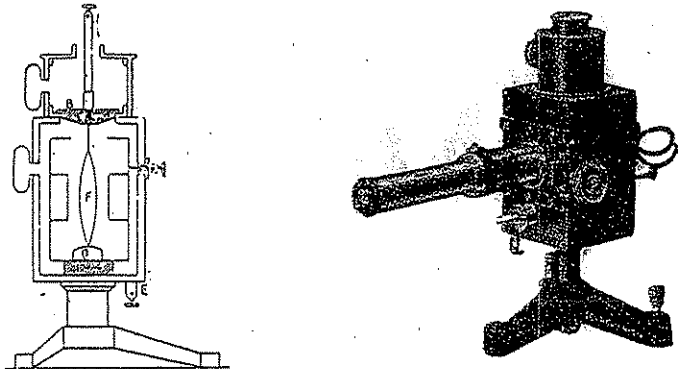


Fig. 389.—*Corte y vista de un electrómetro bifilar de Wulf.*

Consta de dos hilos de cuarzo platinado, cuya separación se mide con un microscopio con escala en el ocular.

En la figura se ve un corte del aparato en que se observan los hilos unidos en ambos extremos, dentro de la caja metálica que aumenta su separación. Además, se reproduce una vista de conjunto del aparato.

3º **Electrómetro unifilar de Einthoven.**—Con un microscopio se

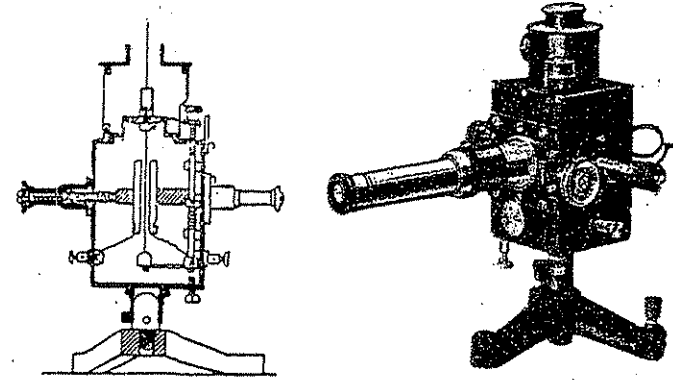


Fig. 390.—*Corte y vista de un electrómetro unifilar de Einthoven, según Wulf.*

leen las desviaciones de un hilo delgado colocado entre dos placas entre las que se establece una diferencia de potencial auxiliar. Al cargar el hilo se desvía en el campo eléctrico de las placas. Modificando el potencial auxiliar y la separación de las placas, puede variarse mucho la

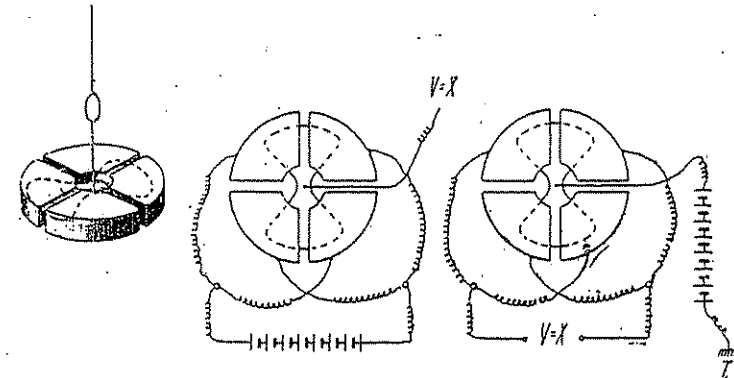


Fig. 391.—*Esquema y conexiones en un electrómetro de cuadrantes.*

sensibilidad y campo de aplicación de este electrómetro, que se utiliza para potenciales desde el milésimo de volt hasta varios cientos de volt.

En la fig. 390 se reproducen un esquema y el modelo según Wulf.

4º **Electrómetro de cuadrantes de Lord Kelvin** (J. J. Thomson).—

Consiste en cuatro cuadrantes huecos, en cuyo interior está suspendida una aguja en forma de 8, como muestran las figuras 391 y 392.

Puede utilizarse fundamentalmente de dos maneras: si se unen los pares de cuadrantes opuestos a puntos de potenciales iguales y de signo contrario, se medirán los potenciales de la aguja, pues colocada simétricamente con respecto a los cuadrantes cuando está descargada, se desvía al recibir cargas. Por el método de anteojo, escala y espejo, se leen las desviaciones.

El otro montaje consiste en dar un potencial fijo a la aguja y medir, por su desviación, la diferencia de potencial entre los pares de cuadrantes opuestos.

En el primer caso se utiliza para medir potenciales relativamente elevados, en el segundo es más sensible a las pequeñas diferencias si se da un potencial elevado a la aguja.

Se lo aplica para potenciales desde el orden del milésimo de volt hasta algunos miles de volt.

5° *Electrómetro absoluto de Lord Kelvin.*—Este electrómetro se denomina absoluto, pues con él se mide el potencial en base a la medida de una fuerza (fig. 393).

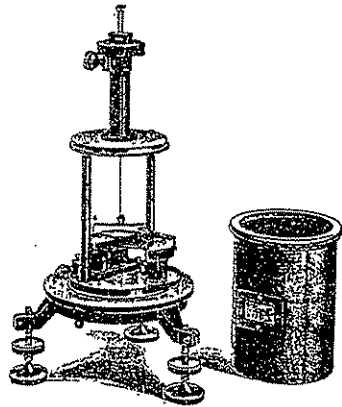


Fig. 392.—Electrómetro de cuadrantes.

Consiste en un condensador plano cuya armadura superior está suspendida de una balanza y unida a tierra. La armadura inferior, aislada, se carga al potencial V que se desea medir. El campo eléctrico en el interior del condensador está dado por la fórmula:

$$E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon_0} \quad [19']$$

siendo σ la densidad de carga en el platillo

La diferencia de potencial es:

$$V = E \cdot d = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon_0} d \quad [20]$$

La carga $q = \sigma S$ de cada platillo estará sometida a la acción de una fuerza debido a la del otro platillo, la que, por unidad de carga, es $\frac{1}{2} E$. Luego (por 19')

$$F = \frac{1}{2} E q = \frac{1}{2} E \sigma S = \frac{2\pi}{\epsilon_0} \sigma^2 S \quad [21]$$

Esta fuerza se mide con la balanza.

Despejando el valor σ en [20] y reemplazando en [21]:

$$F = \frac{\epsilon_0 V^2}{8\pi d^2} S = k V^2 \quad [22]$$

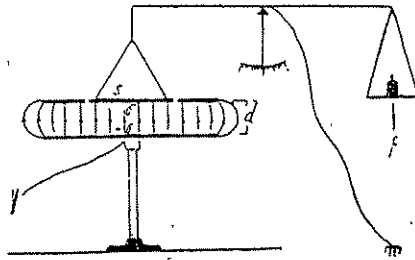


Fig. 393.—Esquema del electrómetro absoluto de Lord Kelvin.

Como se ve, la fuerza de atracción es proporcional al cuadrado de la diferencia de potencial.

Como el factor de proporcionalidad es fácil de calcular, en función de las dimensiones del aparato, resultará sencillo determinar el potencial una vez medida la fuerza F .

Debe tenerse en cuenta que, para que estas fórmulas sean exactas, el campo debe ser rigurosamente uniforme entre las armaduras del condensador. Con ese objeto y para evitar la deformación que se produce en los bordes, se coloca alrededor de la placa superior un anillo de protección, separado de la balanza, pero al mismo potencial, lo que hace que en la zona correspondiente al platillo el campo sea uniforme. La sección S que figura en la fórmula, es la de la parte móvil del platillo.

§ 259.—Energía de las cargas y energía del campo eléctrico.—Al estudiar la energía de un conductor o de un condensador cargado hemos llegado a la fórmula:

$$W = \frac{1}{2} Q V$$

En las teorías sustanciales de la electricidad en que se admite la existencia del fluido eléctrico, se supone que esta energía está localizada en las cargas eléctricas.

En la teoría de Maxwell, en cambio, se supone que esta energía se encuentra distribuida en todo el medio en que se manifiesta el campo eléctrico, en el cual la existencia del campo significa un particular estado de tensión. En el caso de un condensador plano formado por dos placas de superficie S y separación d , con una carga q , en cada una de ellas,

la diferencia de potencial, por ser $-\frac{q}{S} = \sigma$, es de acuerdo con la 19':

$$V = E \cdot d = \frac{4\pi q}{\epsilon S} d$$

La energía será:

$$W = \frac{1}{2} q V = \frac{1}{2} q \left(\frac{4\pi q}{\epsilon S} d \right)$$

o sea:

$$W = \frac{2\pi q^2}{\epsilon S} d$$

Pero como:

$$E = \frac{4\pi q}{\epsilon S}$$

despejando q y reemplazando en W , resulta:

$$W = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} S d \quad [23]$$

El producto $S \cdot d$ es igual al volumen del dieléctrico, por lo tanto podemos suponer que la energía del condensador cargado está uniformemente distribuida en el dieléctrico, siendo:

$$W_i = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} \quad [24]$$

la energía por unidad de volumen.

En general, se admite que en todo campo eléctrico la expresión [24] de W , da la energía localizada en el dieléctrico por unidad de volumen.

Podemos citar en apoyo de esta teoría la experiencia ya mencionada del condensador desmontable.

Debe notarse, sin embargo, que en todos los casos, el cálculo de la energía, ya sea como energía de las cargas o como energía distribuida en el dieléctrico, conduce exactamente a los mismos resultados.